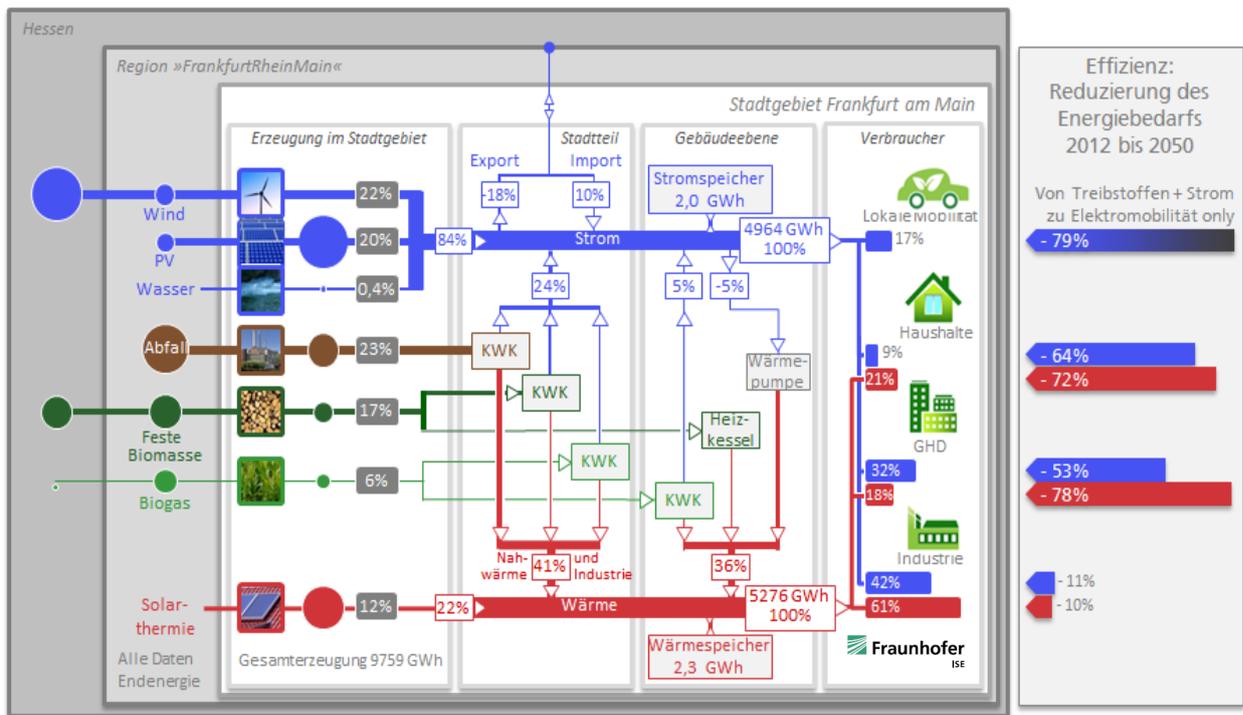


# Generalkonzept im Rahmen des Masterplans **„100% Klimaschutz“** der Stadt Frankfurt am Main



Empfohlenes Zielenergiesystemszenario für die Stadt Frankfurt am Main, in Kooperation mit dem Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE

IBP-Bericht ES-342-01/2014

# Masterplan 100% Klimaschutz – Frankfurt am Main – Generalkonzept

Durchgeführt im Auftrag des  
Energierreferats der Stadt Frankfurt am Main

Der Bericht umfasst

339 Seiten Text

15 Tabellen

207 Abbildungen

Bearbeiter (Fraunhofer-IBP):

Patrick Schumacher, Kilian Stroh, Marlen Schurig,  
Charlotte Ellerbok, Andreas Ramonat, Sascha Link

Kassel, 20. Mai 2015

Institutsleiter

Univ.-Prof. Dr.-Ing.  
Klaus Sedlbauer

**Fraunhofer-Institut für  
Bauphysik IBP**

Nobelstraße 12 | [70569  
Stuttgart](http://www.ibp.fraunhofer.de)

Telefon +49 711 970-00

Telefax +49 711 970-  
3395

Abteilungsleiter

Dr.-Ing  
Dietrich Schmidt

Standort Holzkirchen

Fraunhoferstr. 10 | 83626  
Valley

Telefon +49 8024 643-0

Telefax +49 8024 643-  
366

Bearbeiter

M.Sc.  
Patrick Schumacher

Standort Kassel

Gottschalkstr. 28a | 34127  
Kassel

Telefon +49 561 804-1870

Telefax +49 561 804-3187

## Zusammenfassung

Die Stadt Frankfurt hat sich das Ziel gesetzt, ihre Energieversorgung bis zum Jahr 2050 nahezu klimaneutral zu gestalten. Sie gehört zu den 19 Finalisten-Städten im Förderprogramm „Masterplan 100 % Klimaschutz“ des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

Für seine Aktivitäten zum Klimaschutz hat Frankfurt am Main bereits zahlreiche Auszeichnungen erhalten, unter anderem war die Stadt „Klimaschutzkommune 2010“ und Finalist des Wettbewerbs „European Green Capital“ 2014. Sie ist außerdem Gründungsmitglied im „Klima-Bündnis europäischer Städte“.

Der vorliegende Bericht – das Generalkonzept des „Masterplans 100 % Klimaschutz“ – beschreibt, wie die beiden folgenden Hauptziele erreicht werden können. Der Endenergieverbrauch des Jahres 2010 (rund 22 TWh) soll in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr um rund 50 Prozent reduziert werden, die verbleibenden 50 Prozent der Endenergie im Jahr 2050 sollen aus städtischen und regionalen erneuerbaren Energien erzeugt werden. Abbildung 1 gibt einen Überblick über die vielfältigen Bestandteile, Module und Konzepte, die in den Bericht einfließen.



Abbildung 1: Module und Bestandteile des Generalkonzepts, eigene Darstellung (IBP).

Das Generalkonzept berücksichtigt die Klimaziele der Bundesregierung und des Landes Hessen. Auch die Energiepotenziale der Region RheinMain spielen eine Rolle. Deren regenerative Energiepotenziale wurden unter Federführung der Klima und Energieeffizienz Agentur (KEEA) mit dem Fraunhofer IWES ermittelt (Bausteine zum Regionalen Energiekonzept FrankfurtRheinMain 100 % - effizient und erneuerbar).

Eine stündliche Simulation der fluktuierenden erneuerbaren Energien wurde in die Szenarienberechnung integriert (Fraunhofer ISE Ergebnisbericht – Berechnung zeitlich hoch aufgelöster Energieszenarien für eine 100% erneuerbare Energieversorgung der Stadt Frankfurt am Main, KomMod4FFM). Sie erlaubt, den stündlichen Energiebedarf im Jahr 2050 mit den lokalen und regionalen Potenzialen abzugleichen. Auch diese Erkenntnisse sind ins Generalkonzept eingeflossen.

In einer umfassenden Analyse des Status Quo ermittelt der Bericht, wie viel Strom und Wärme die Frankfurter Haushalte, die Gewerbe-, Handels-, Dienstleistungs- (GHD) und Industriebetriebe verbrauchen. Auch der Verbrauch im privaten und öffentlichen Verkehrssektor wird betrachtet.

Dabei lag der regenerative Anteil in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr im Jahr 2013 bei rund sechs Prozent. Durch Effizienz- und Sparmaßnahmen können 50 Prozent der Gesamtenergie eingespart werden. Potenziale bietet beispielsweise der Umtausch alter gegen effizientere Geräte in Haushalte und den vorherrschenden GHD Betrieben. Best Practice Beispiele innerhalb und außerhalb Deutschlands verdeutlichen dies.

Im Wärmesektor zeigen die bereits umgesetzten und künftigen Modellvorhaben, dass eine umfassende energetische Sanierung weit mehr als die Hälfte des Wärmeverbrauchs einsparen kann. Neben einfachen Maßnahmen wie dem Austausch von ineffizienten Umwälzpumpen werden integrierte und auf mehrere Jahre aufbauende Maßnahmen auf Quartiersebene beschrieben. Deren Auswirkungen auf die Umwelt (Berechnung der Einsparung und der CO<sub>2</sub>-Emissionen) fließen ebenso ein wie eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Die Nah- und Fernwärmeverdichtung, die Nutzung unterschiedlicher Wärmequellen wie Rechenzentren, Abwärme aus der Industrie und Abwasser sind nur einige Beispiele der beschriebenen Maßnahmen.

Neben Effizienz- und Versorgungsmaßnahmen im Strom- und Wärmesektor besitzt der Verkehr bzw. die gesamte Mobilität der städtischen Einwohner sowie der Zu- und Auspendler einen hohen Stellenwert. Der Verkehr Frankfurts, ohne Flug- und Schiffsverkehr, verbraucht nicht nur 20 Prozent der Gesamtenergie, sondern beeinflusst durch seinen Flächenverbrauch und seine direkten Emissionen (CO<sub>2</sub>, Ruß, Lärm) die Lebensqualität der Stadt entscheidend.

Weitere Schwerpunkte sind deshalb Maßnahmen, um die Pkw-Dichte zu reduzieren und den Anteil des ÖPNVs und der Nahmobilität, also das Zurücklegen von Strecken per Fahrrad und zu Fuß, zu stärken. Die Fragen, wie die Elektrifizierung von Bussen, E-Pkw und Pedelecs gefördert und der Carsharing-Anteil erhöht werden kann, spielen gleichermaßen eine Rolle.

Neben dem technischen Ansatz liegt ein zweiter Fokus auf der gesellschaftlichen Perspektive. Dafür werden eine Akteurs- und Hemmnisanalyse beschrieben, außerdem nichttechnische Maßnahmen, um eine nachhaltige Entwicklung in Frankfurt am Main zu fördern. Die Bildung und Beteiligung der Bürger durch Beratungsangebote und Beteiligungsrunden ist hierbei ein wesentlicher Punkt, auf dem im Generalkonzept zurückgegriffen wird.

In Kapitel 3 des Generalkonzepts werden die Energieflüsse in der Stadt detailliert analysiert, in den folgenden Kapiteln – Kapitel 4 (Strom), 5 (Wärme) und 6 (Mobilität) – die Maßnahmen dazu beschrieben. Auf Basis dieser Maßnahmen und den dazu durchgeführten Workshops – jeweils zwei Workshops zu den Themen Gebäude/Wohnen, Energieversorgung/GHD/Industrie sowie Mobilität – werden in Kapitel 8 zwei unterschiedliche Szenarien für die Stadt Frankfurt und ihre Energiezukunft entwickelt. Das Referenzszenario geht vom „Business as usual“ aus, das Maßnahmenzenario greift die zuvor dargestellten Maßnahmen in den Berechnungen auf. Dabei werden auch die städtischen und regionalen Energiepotentiale eingebunden. Gestützt werden die Szenarien durch die vom Fraunhofer ISE auf stündlicher Basis durchgeführten Simulationen. Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass eine Deckung des Endenergiebedarfs im Jahr 2050 durch Erneuerbare Energien möglich ist.

Insgesamt ist das Generalkonzept als eine Art Fahrplan zu verstehen. Die dort entwickelten technischen Maßnahmen sollen keinesfalls als verpflichtend für die einzelnen Beteiligten angesehen werden. Vielmehr sollen sie Anregung verstanden werden, um sie auf ihren Handlungsfeldern zu aktivieren.

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Aufbau und Methodik</b>	<b>12</b>
2.1	Module des Masterplans	12
2.2	Aufgabenverteilung	13
2.3	Aufbau der Arbeit	13
2.4	Prinzip - technische / nicht-technische Maßnahmen	14
2.5	Die Anpassung an den Klimawandel mit denken	15
<b>3</b>	<b>Energetische Ausgangslage der Stadt Frankfurt</b>	<b>17</b>
3.1	Gesamt Endenergieverbrauch	17
3.2	Aktualisierte CO <sub>2</sub> -Bilanz der Stadt Frankfurt am Main	18
3.3	Beschreibung der Ausgangslage im Stromsektor	20
3.3.1	Haushalte	23
3.3.2	Gewerbe, Handel, Dienstleistung (GHD)	26
3.3.3	Industrie	33
3.3.4	Versorgungsstruktur der Stromerzeugung	34
3.3.5	Vergleich innerstädtische Stromerzeugungskapazität und Verbrauch	38
3.4	Beschreibung der Ausgangslage im Wärmesektor	40
3.4.1	Gesamtwärmeverbrauch	41
3.4.2	Wärmeverbrauch in Wohngebäuden	42
3.4.3	Gewerbe, Handel, Dienstleistung	44
3.4.4	Industrie	45
3.4.5	Versorgungsstruktur der Wärmeversorgung	46
3.4.6	Vergleich innerstädtische Wärmeerzeugungskapazität und Verbrauch	50
3.5	Beschreibung der Ausgangslage im Verkehrssektor	51
3.5.1	Entwicklung der Verkehrsnachfrage im Motorisierter Individualverkehr (MIV)	52
3.5.2	Entwicklung der Verkehrsnachfrage im Öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV)	54
3.5.3	Entwicklung der Verkehrsnachfrage im Straßengüterverkehr (Lkw & LNF)	58
3.5.4	CO <sub>2</sub> -Bilanz des Verkehrssektors	59
3.5.5	Modal Split der Ausgangslage	62
3.6	Beschreibung der Ausgangslage Abfall und Stoffkreisläufe	66
3.6.1	Abfallmengen in Frankfurt	66

3.6.2	Bisherige Schritte zur weiteren Abfallbeseitigung der Stadt	68
<b>4</b>	<b>Maßnahmen – Energieeinsparpotentiale und Einsatz von erneuerbaren Energien im Sektor Strom</b>	<b>71</b>
4.1	Einleitung	71
4.2	Haushalte	73
4.2.1	Effizienzmaßnahmen Haushalte	76
4.2.2	Eigenstromlösungen	83
4.3	Gewerbe, Handel, Dienstleistung (GHD)	87
4.3.1	Energieeffizienzmaßnahmen im GHD Sektor	88
4.3.2	Effiziente Rechenzentren	105
4.3.3	Eigenstromlösungen im GHD Sektor	112
4.3.4	Effiziente Gewerbeparks und Infrastrukturmaßnahmen	113
4.4	Industriesektor	121
4.4.1	Entwicklung von Effizienzmaßnahmen	122
4.5	Fazit zur Stromeinsparung im Haushalts-, GHD- und Industriesektor	128
4.6	Erneuerbare Energiepotentiale aus der Region in der Stadt-Land Interaktion	130
4.6.1	Stromverbrauch der Region	130
4.6.2	Erzeugungspotential aus erneuerbaren Energien	130
4.6.3	Photovoltaik	131
4.6.4	Windenergie	132
4.6.5	Biomasse/Biogas	133
<b>5</b>	<b>Maßnahmen – Energieeinsparpotentiale und Einsatz von erneuerbaren Energien im Sektor Wärme</b>	<b>136</b>
5.1	Einsatz von erneuerbaren und dezentralen Anlagen in Wohn- und Nichtwohngebäuden	136
5.1.1	Blockheizkraftwerke	136
5.1.2	Solarthermie	137
5.1.3	Wärmepumpen	142
5.1.4	Bioenergie	152
5.1.5	Einsatz von thermischen Speichern	155
5.2	Energetischer Standard im Neubau	157
5.3	Energetische Sanierung der Wohn- und Nichtwohngebäude	160
5.4	Effiziente Anlagentechnik und Wärmeverteilung	174
5.5	Netzgebundene Lösungen	180
5.5.1	Ausbau und Verdichtung der Fernwärmeversorgung	182
5.5.2	Senkung der Netztemperaturen	186

5.5.3	Inselnetze „kalte Fernwärme“	192
5.5.4	Integration von erneuerbaren Energien in Wärmenetzen	195
5.5.5	Abwärme aus Abwasser	207
5.5.6	Power to Gas	210
5.6	Effizienzmaßnahmen im Industriesektor	211
5.7	Visionären Maßnahmen im Wärmesektor	218
<b>6</b>	<b>Maßnahmen – Steigerung der Effizienz und einer nachhaltigen Mobilität im Sektor Verkehr</b>	<b>220</b>
6.1	Einführung in die nachhaltige Mobilität	220
6.2	Verkehrsvermeidung – Nahmobilität	220
6.2.1	Fußgänger	221
6.2.2	Fahrrad	223
6.2.3	Pedelecs und E-Bikes	224
6.2.4	Fahrradverleihsysteme	229
6.3	Motorisierter Individualverkehr (MIV)	233
6.3.1	Vermehrter Einsatz von Elektro-Pkw	233
6.3.2	Carsharing (CS)	239
6.4	Öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV)	243
6.4.1	Elektro- / Hybridbusse, Schnellbusse	243
6.4.2	U-, S-, Regional- und Straßenbahnen	246
6.5	Lastkraftwagen / Citylogistik	246
6.6	Marketing, Wettbewerbe & Werbekampagnen	249
6.7	Visionäre Maßnahmen	252
6.8	Entwicklungen des Verkehrssektors für Referenz- und Maßnahmenszenario	253
6.8.1	Entwicklungen des Verkehrssektors im Referenzszenario	253
6.8.2	Entwicklung des motorisierten Individualverkehrs	254
6.8.3	Entwicklung des öffentlichen Personennahverkehrs	258
6.8.4	Entwicklung des Straßengüterverkehrs (LNF und Lkw > 3,5 Tonnen)	259
6.8.5	Fiktiver Modal Split im Referenzszenario	261
6.9	Entwicklungen des Verkehrssektors im Maßnahmenszenario	262
6.9.1	Entwicklung des motorisierten Individualverkehrs	263
6.9.2	Entwicklung des öffentlichen Personennahverkehrs	266
6.9.3	Entwicklung des Straßengüterverkehrs (LNF und Lkw > 3,5 Tonnen)	268
6.9.4	Visionärer Modal Split im Maßnahmenszenario	270
6.10	Zusammenfassung der Ergebnisse Maßnahmen- und Referenzszenario	272

<b>7</b>	<b>Kosten und Finanzierung zur Umlenkung der bisherigen Ausgaben für Energie in Frankfurt am Main und Region</b>	<b>273</b>
7.1	Einleitung	273
7.2	Methodik	275
7.3	Bisherige Energiekosten der Stadt Frankfurt am Main	276
7.4	Strom und Erdgas und sein Einfluss auf die innerstädtische Wertschöpfung	278
7.5	Heute und künftige Entwicklung unterschiedlicher Energieträgerkosten	282
7.6	Reduzierung der Energieausgaben bei Umsetzung ausgewählter Maßnahmen	284
7.6.1	Reduzierung der Energieausgaben durch Energieeinsparung	284
7.6.2	Verschiebung und Reduzierung der Ausgaben durch Energieeffizienzmaßnahmen	286
7.7	Finanzierungsmodelle zur Erreichung der Klimaschutzziele	288
7.7.1	Bestehende Förderungsinstrumente für den Ausbau von regenerativen Energien	288
7.7.1.1	Erneuerbare Energiegesetz EEG – Reform und deren Auswirkungen auf regenerative Energieprojekte im Stromsektor	288
7.7.1.2	Marktanreizprogramm für regenerative Energieanlagen im Wärmesektor	289
7.7.2	Neue Finanzierungsformen außerhalb der bestehenden Förderungsprogramme	290
7.7.2.1	Staatliche Anreizinstrumente steuerlicher Art	291
7.7.2.2	Effizienzfonds und Energiesparfonds	291
7.7.2.3	Crowdfunding	293
7.7.2.4	Contracting	293
7.7.2.5	Stiftungen	294
7.7.3	Maßnahmen der Stadtverwaltung	295
7.7.3.1	Querschnittsaufgabe Klimaschutz in der Stadtverwaltung – Etablierung einer Arbeitsgruppe	295
7.7.3.2	Abbau von Hemmnissen (rechtlich, ökonomisch, technisch, sozial)	295
7.8	Zusammenfassung	296
<b>8</b>	<b>Entwicklung der Szenarien der Stadt Frankfurt am Main bis 2050</b>	<b>297</b>
8.1	Demographische Entwicklung und Flächenentwicklung	297
8.1.1	Haushaltssektor	297
8.1.2	Gewerbe, Handel und Dienstleistungssektor (GHD)	297
8.2	Szenario des Frankfurter Stromsektors	298

8.2.1	Referenzszenario – Strombedarf	298
8.2.2	Maßnahmenszenario - Strombedarf	299
8.3	Szenario des Frankfurter Wärmesektors	302
8.3.1	Referenzszenario – Wärmebedarf	302
8.3.2	Maßnahmenszenario – Wärmebedarfs	303
8.4	Verkehrssektor	305
8.4.1	Referenzszenario – Endenergie Verkehr	305
8.4.2	Maßnahmenszenario - Endenergie Verkehr	306
8.5	Energieszenarien für eine 100% erneuerbare Energieversorgung der Stadt Frankfurt am Main (KomMod4FFM) (Fraunhofer ISE)	309
8.5.1	Betrachtungsraum und Datengrundlage	309
8.5.2	Methodisches Vorgehen und Szenarien	310
8.5.3	Betrachtete Szenarien	312
8.6	Ergebnisse Szenarien 2050	315
8.6.1	Empfohlenes Szenario: »Stadt mit Bundesland, 10% Stromimport«	315
8.6.2	Szenarien der Potenzialvariante »Stadt mit Bundesland«	320
8.6.3	Szenarien der Potenzialvariante »Stadt und Region«	323
8.6.4	Szenario »Ohne Restriktionen«	323
8.6.5	Szenarien »Begrenzung Stromimport«	325
8.6.6	Szenarien der Potenzialvariante »Stadt«	329
8.6.7	Zeitlich aufgelöste Detailanalyse	332
8.6.8	Kritische Würdigung der Optimierungsrechnungen	336
8.6.8.1	Mehrwert durch die zeitliche Auflösung gegenüber Jahresbilanzen	336
8.6.8.2	Einschränkung durch die fehlende räumliche Auflösung	337
8.6.8.3	Weitere Einschränkungen	337
8.6.9	Zusammenfassung der Simulationsrechnung KomMod	338
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung der Ergebnisse</b>	<b>341</b>
<b>1 0</b>	<b>Anhang</b>	<b>344</b>
10.1	Anhang A: Roadmaps	344
10.2	Anhang B: Maßnahmenkatalog	348
10.3	Anhang C: Mitgestaltung der Frankfurter Bürgerinnen und Bürger	377
<b>1 1</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>382</b>
<b>1 2</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>394</b>

# 1 Einleitung

Weltweit ziehen jährlich rund 60 Millionen Menschen vom Land in die urbanen Zentren. Dies führt dazu, dass die heutigen dicht besiedelten Städte nur rund zwei Prozent der Erdoberfläche bedecken, aber nach dem Living Planet Report des WWF drei Viertel aller Ressourcen verbrauchen und für rund 80 Prozent aller Emissionen verantwortlich sind.

Auch in Deutschland ziehen mehr und mehr Menschen in die Ballungszentren und Städte. Die Bevölkerung der Stadt Frankfurt am Main ist seit der ersten Volkszählung im Jahr 1817 von rund 41.000 Einwohnern auf über 690.000 Einwohner im Jahr 2013 gestiegen. Städte wie Frankfurt am Main ziehen Menschen aus dem Umland an, da sie durch ihre Infrastruktur, durch Arbeitsplätze, Wohnraum, Kultur- und Freizeitangebote eine hohe Lebensqualität bieten. Auch in Frankfurt am Main bündelt sich durch die hohe Bevölkerungsdichte und große Gewerbeflächen der Energieverbrauch auf einer begrenzten Fläche. Dies führt dazu, dass Frankfurt am Main eine der am dichtesten bebauten Städte Deutschlands ist.

Für Haushalte, Gewerbe- und Industriebetriebe sowie für die Mobilität innerhalb der Stadt muss Strom und Wärme in unterschiedlichen Energieformen bereitgestellt werden. Für diese Bedürfnisse wurden im Jahr 2010 rund 22.600 GWh und damit knapp ein Prozent der deutschen Endenergie verbraucht. Davon wurden über 95 Prozent importiert und somit außerhalb Frankfurts und in der Regel auch außerhalb der Region erzeugt. Dies führt dazu, dass, wie in der Wertschöpfungsbetrachtung aufgeführt, der größte Anteil der jährlichen Energiekosten außerhalb Frankfurt am Mains erschlossen wird. Die innerstädtische und regionale regenerative Energieerzeugung ist für die Klimaschutzstrategie der Stadt Frankfurt am Main neben einer hohen Lebensqualität von großer Bedeutung und soll nach Möglichkeit weiter ausgebaut und gefördert werden. Bei einer effizienten Umsetzung kann somit die innerstädtische Wertschöpfung erhöht, nötige Finanzmittel in der Stadt gehalten und das städtische Klima nachhaltig verbessert werden.

Seit über 20 Jahren, mit dem Beschluss der Gründung des Energiereferates und der Beitrittserklärung zum Klimabündnis, ist Frankfurt am Main aktiv im Klimaschutz tätig. Im März 2012 beschlossen die Stadtverordneten, die Energieversorgung der gesamten Stadt bis zum Jahr 2050 auf 100 Prozent Erneuerbare Energien umzustellen, und den „Masterplan 100% Klimaschutz“ zu erstellen. Das Projekt startete Anfang 2013 und wurde im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative (NKI) der Bundesregierung durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) gefördert. Die folgende Arbeit zeigt auf, wie sich durch den Ausbau einer größtenteils lokalen regenerativen Energieerzeugung und durch Effizienzmaßnahmen in allen Sektoren der Energieverbrauch und die damit verbundenen Emissionen

reduzieren lassen. Gleichzeitig führt die Umstrukturierung zu einer Steigerung der lokalen Wertschöpfung, die Finanzströme aus der Kommune reduziert und die Lebensqualität in Frankfurt nachhaltig steigert.

Die im „Masterplan 100% Klimaschutz“ gesetzten Ziele gehen mit den nationalen und internationalen Zielen einher. Für Frankfurt am Main bedeutet dies konkret, den Endenergiebedarf bis 2050 zu halbieren und den Anteil aus regenerativen Energieträgern auf 50 Prozent des Basisjahres 2010 zu erhöhen, so dass im Jahr 2050 eine 100prozentige Versorgung der Stadt Frankfurt am Main aus erneuerbaren Energiequellen gewährleistet ist.

Im Folgenden werden für die Stadt Frankfurt am Main Maßnahmen und Wege aufgezeigt, welche nötig, aber auch möglich sind, um diese Ziele zu erreichen.

## 2 Aufbau und Methodik

### 2.1 Module des Masterplans

Der Masterplan 100% Klimaschutz kann als Gesamtwerk einer Vielzahl unterschiedlicher Module und Konzepte gesehen werden. Dabei besteht die hier vorliegende Arbeit, das Generalkonzept, aus unterschiedlichen Teilarbeiten, wie beispielsweise der Integration der Ziele und Entwicklungen auf Bundesebene (Nationale Einbindung), einer stündlichen Simulation der zukünftigen regenerativen Erzeugung im Jahr 2050 (Simulation des Fraunhofer ISE) sowie aus Bestandteilen des Regionalkonzeptes mit seiner Potentialanalyse. Abbildung 2 stellt die Konzepte und Module des gesamten Masterplans der Stadt dar.

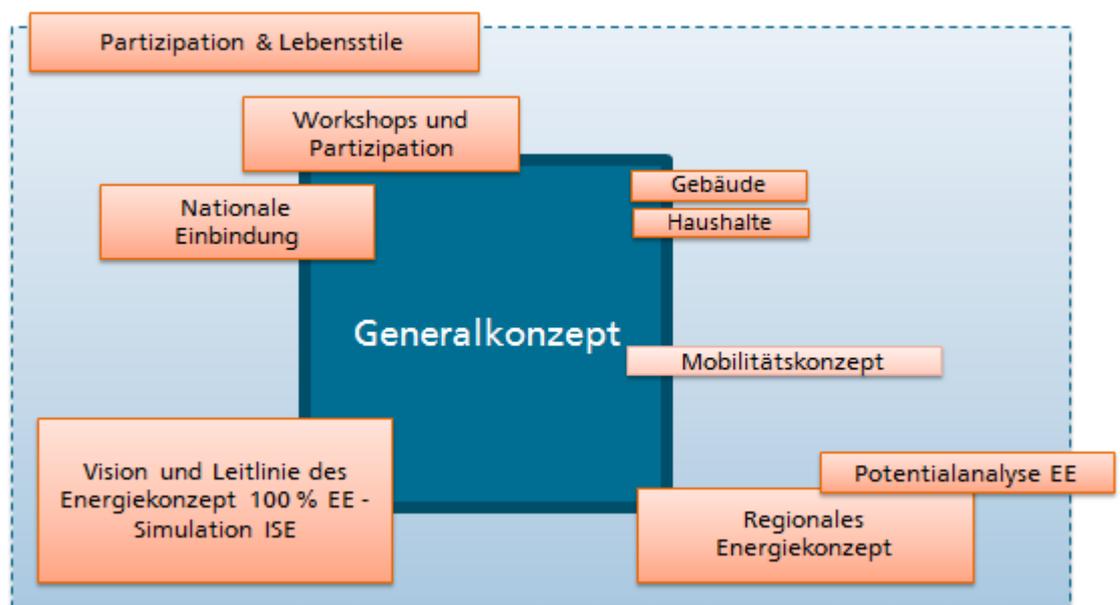


Abbildung 2: Module des Masterplans 100% Klimaschutz

Ein weiterer Bestandteil während der Projektlaufzeit war die Durchführung von jeweils zwei Arbeitsworkshops zu den folgenden drei Schwerpunkten:

- Bauen, Wohnen, Stadtplanung
- Energieversorgung: Strom und Wärme im Gewerbe, Handel, Dienstleistung und Industriesektor
- Mobilität

Die insgesamt sechs Workshops wurden mit Vertretern der Stadt (Energierreferat, Stadtplanungsamt, Referat Mobilitäts- und Verkehrsplanung), Hochschulen und Universitäten (FH Frankfurt, Imperial College London) sowie Industrievertretern (Stadtwerke Frankfurt, Mainova AG, ABGnova GmbH, Infracore, IHK Frankfurt am Main, Fraport AG, Wirtschaftsförderung) durchgeführt.

Die Workshops beinhalteten neben der Vorstellung der Ergebnisse des Masterplans gezielte Aufgabenstellung wie die Erarbeitung erster Projektvorschlä-

ge, Identifikation und Erarbeitung von Lösungsvorschlägen zum Abbau von Hemmnissen sowie die Steigerung der Kooperation zwischen den einzelnen Akteuren. Neben den Workshops wurden zahlreiche Bürgerbeteiligungsveranstaltungen mit über 800 teilnehmenden Frankfurterinnen und Frankfurtern durchgeführt, deren Ideen in den vorliegenden Masterplan mit einfließen werden.

Zudem wurde festgehalten, dass zukünftig weitere Workshops während des Arbeitsprozesses zum Masterplan durchgeführt werden sollten. Wir bedanken uns an dieser Stelle bereits bei den Mitgliedern des Klimaschutzbeirates, den Bürgern und Vertretern der Stadt für das aktive Mitwirken und die guten Vorschläge in den Workshops.

## 2.2 Aufgabenverteilung

Die folgende Arbeit entstand im Auftrag des Energierates der Stadt Frankfurt am Main. Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) wurde mit der Bearbeitung des Generalkonzepts 100% Klimaschutz beauftragt.

## 2.3 Aufbau der Arbeit

Nach der Einleitung (Kapitel 1) erfolgte in Kapitel 2 die Einordnung des Generalkonzepts in den Masterplan „100% Klimaschutz“.

In Kapitel 3 wird die energetische Ausgangssituation für Frankfurt am Main auf Datengrundlage des Instituts für Energie und Umwelt (Ifeu) dargestellt. Dafür wurde eine Aktualisierung der Ifeu Daten von 2007 vorgenommen. Weiter werden für die Bereiche Strom, Wärme und Verkehr detaillierte Analyse der Ist-Situation vorgenommen.

Soweit die Datenqualität es zulässt werden die Strom, Wärme und Treibstoffverbräuche auf die Sektoren Haushalte, GHD und Industrie verteilt. Eine Verteilung der Verbräuche nach Anwendungen in den einzelnen Sektoren ist lediglich für die Haushalte und GHD-Betriebe möglich. Neben der Verbrauchsseite wird die innerstädtische Erzeugungsseite beleuchtet. Hierbei werden die in Frankfurt am Main zur Erzeugung von Wärme und Strom verwendeten zentralen Großkraftwerke als auch die kleinen dezentralen Erzeugungsanlagen berücksichtigt. Im Verkehrssektor wird durch die detaillierte Beschreibung des Modal Splits die Ausgangssituation in Frankfurt am Main dargestellt.

In Kapitel 4 erfolgt die Vorstellung von technischen Maßnahmen und deren Energieeinsparpotentiale strombasierter Anwendungen in den Sektoren Haushalte, GHD und Industrie. Weiter werden Möglichkeiten zum Einsatz von erneuerbaren Energien für strombasierten Anwendung beschrieben. Den Abschluss des Kapitels bildet die Darstellung des erneuerbaren Energiepotentials (Strom) aus der Region in der Interaktion von Stadt und Land. Die dort vorgestellten Daten des Regionalkonzeptes beruhen auf den Ergebnissen der Potentialstudie des Fraunhofer Institut für Wind- und Energiesysteme (IWES). Weiter werden Maßnahmen, die auf die Steigerung der Akzeptanz in der Bevölkerung und der damit verbundenen Partizipation abzielen vorgestellt.

Analog zu Kapitel 4 werden in Kapitel 5 Einsparmaßnahmen und ihre Wirkung im Wärmebereich für die Sektoren Haushalte, GHD und Industrie dargestellt. Neben der energetischen Modernisierung der Gebäudehülle (Dämmung) liegt der Fokus der Maßnahmen auf einer effizienten Wärmeerzeugung bzw. der Nutzung von innerstädtischen Abwärmepotentialen. Weiter werden Möglichkeiten zur Integration von erneuerbaren Energien in der Wärmeversorgung von Frankfurt am Main aufgezeigt. Abschließend werden in diesem Kapitel visionäre Maßnahmen zur Endenergieeinsparung vorgestellt.

Kapitel 6 widmet sich vollständig dem Verkehr. Nachdem in Kapitel 3 die Ausgangslage im Verkehrssektor dargestellt wurde, erfolgt in diesem Kapitel die Vorstellung von Maßnahmen zur Reduktion der Pkw-Dichte, dem Ausbau des Öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) und der Erhöhung des Fahrradfahreranteils am Modal Split. Diese orientieren sich an ausgewählten nationalen und internationalen „Best-Practice“ Beispielen, die sich auf Frankfurt am Main übertragen lassen. Analog zu Kapitel 5 erfolgt abschließend die Vorstellung von visionären Maßnahmen im Verkehrssektor.

In Kapitel 7 werden die monetären Ausgaben der Stadt Frankfurt am Main für Energie in allen vier Sektoren beziffert. Inwieweit sich die Ausgaben verändern und welche Anteile der Kosten innerhalb der Stadt als regionale Wertschöpfung gehalten werden können, wird ebenfalls betrachtet. Neben groben Wirtschaftlichkeitsrechnungen ausgewählter Maßnahmen werden auch unterschiedliche Finanzierungsformen mit ihren Vor- und Nachteilen diskutiert.

In Kapitel 8 werden auf Basis der in Kapitel 4, 5 und 6 vorgestellten Einsparmaßnahmen Szenarien über die Entwicklung des Strom-, Wärme- und Treibstoffbedarfs in den Sektoren Haushalte, GHD und Industrie bis 2050 dargestellt. Dabei wird zwischen einem Referenz- und Maßnahmenzenario unterschieden. Des Weiteren werden die Ergebnisse, der vom Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) durchgeführten Energieszenarien für eine 100% erneuerbare Energieversorgung der Stadt Frankfurt am Main, vorgestellt. Diese orientieren sich an dem vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) entwickelten Maßnahmenzenario.

## 2.4 Prinzip - technische / nicht-technische Maßnahmen

Die zu entwickelnden Maßnahmen lassen sich in zwei Hauptgruppen gliedern. Dies sind zum einen technische Maßnahmen, die vorrangig der Umsetzung neuer Technologien dienen:

- Maßnahmen zur Hebung der Einspar- und Effizienzpotenziale sowie zur Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien;
- Maßnahmen zur Vernetzungsstrategien und zur Integration von EE-Strom im Wärmesektor;
- Optimierung der urbanen Infrastruktur (Wärme, Strom, Verkehr) sowie der Gebäude;

Sowie nicht-technische Maßnahmen zur Gewinnung von strategischen Schlüsselmultiplikatoren und zur Breitenaktivierung:

- Image- und Marketingkampagnen;
- Bildung der Bürger und Bürgerinnen (Sensibilisierung der Einwohner mit dem Thema Energie);
- Wettbewerbe im GHD- und Industriesektor;
- Maßnahmen zur Erhöhung der Akzeptanz beim Bürger durch Berücksichtigung von sozialen Aspekten (Energiearmut, Generation 65+);
- Maßnahmen zum Ausbau einer unabhängigen Beratung, Information und Aufklärung;
- Aktivierung aller Akteure der Stadtgesellschaft - der Zivilgesellschaft, der Privatwirtschaft, der Politik und der Verwaltung zur Umsetzung der technischen Maßnahmen und einem effizienten Umgang mit Energie;

Für die Erreichung des Klimaschutzzieles mit den jeweiligen CO<sub>2</sub>-Reduzierungspotentialen ist ein Mix aus den technischen- und nicht-technischen Maßnahmen notwendig. Besonders die Umsetzung und der Erfolg der sozio-kulturellen Maßnahmen beeinflussen in einem hohen Grad den Erfolg und somit die Höhe der Einsparungen.

## 2.5 Die Anpassung an den Klimawandel mit denken

Neben den Bemühungen um 100 % Klimaschutz, gilt es für die Stadt Frankfurt am Main auch, sich Folgen des globalen Klimawandels zu stellen.

Die Stadt Frankfurt am Main hat zur Koordinierung dieser Aufgabe 2008 eine eigene Koordinierungsgruppe Klimawandel (KGK) eingerichtet, in der von Anfang an auch das Thema Klimaschutz mit einbezogen wurde. Vertreter des städtischen Energiereferates zählen zu den ständigen Mitgliedern der Koordinierungsgruppe, so dass eine enge Verzahnung beider Bereiche sichergestellt ist. Auch in der 2014 beschlossenen Frankfurter Anpassungsstrategie an den Klimawandel sind die Bezüge zum Klimaschutz verankert.

Oftmals sind die Verbindungen zwischen Klimaschutz und Klimaanpassung indirekt und somit nicht auf den ersten Blick erkennbar. Entscheidungen für einen bestimmten Verkehrsträger z.B. bedingen auch entsprechende Verkehrswege, die wiederum ganz unterschiedliche Auswirkungen auf das Stadtklima haben können.

Auch die Form der Energieversorgung und der Siedlungsplanung, die möglicherweise aus Klimaschutzgründen eine bestimmte Form präferiert, kann mit Blick auf die Bemühungen um möglichst günstige klimatische Verhältnisse in einem anderen Licht erscheinen. Beide Aspekte sind daher frühzeitig in die Betrachtungen mit einzubeziehen.

Der Schattenwurf großer klimafördernder Laubbäume konkurriert mit dem Lichtbedarf von PV-Anlagen. Aber es gibt auch sich unterstützende Effekte. So heizen sich z.B. gut isolierte helle Fassenden von Passivhäusern weniger stark auf und schonen den innerstädtischen Wärmehaushalt. Begrünte Dächer unterstützen mit ihrer kühlenden Wirkung im Sommer die Effektivität von PV-Anlagen.

Auch die gegenseitige Beeinflussung von Außenklima / Stadtklima und Innenraumklima / -nutzung rückt stärker in den Fokus der Wissenschaft und wird Teil von Strategien zur Siedlungsentwicklung.

Insgesamt zeigt sich die enge Verwandtschaft von Klimaschutz und Klimaanpassung in vielen Punkten. Die wechselseitige Berücksichtigung ist daher Grundvoraussetzung einer erfolgreichen Strategie zu 100 % Klimaschutz und einer klimawandelgerechten Stadtentwicklung in Frankfurt am Main.

### 3 Energetische Ausgangslage der Stadt Frankfurt

#### 3.1 Gesamt Endenergieverbrauch

Der Gesamtendenergiebedarf der Stadt Frankfurt am Main wird in die Bedarfssektoren Strom, Wärme und Verkehr untergliedert. Insgesamt wurden im Jahr 2010 rund 22.650 GWh Wärme, Strom und Verkehr im Stadtgebiet verbraucht. Der Anteil Wärme dominiert mit ca. 50 Prozent des gesamten Endenergieverbrauchs (Abbildung 3).

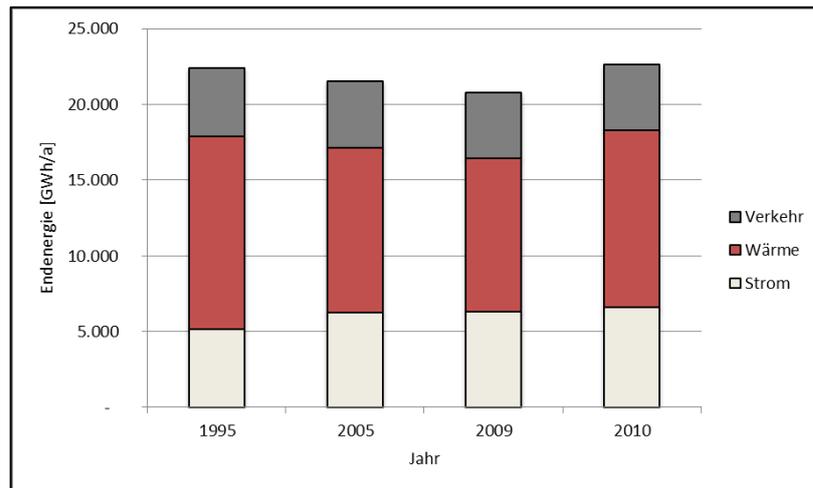


Abbildung 3: Verteilung der Endenergie nach den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr am Gesamtendenergiebedarf, eigene Darstellung (IBP) nach aktualisierten Daten (ifeu 2011).

Wird der Endenergieverbrauch den Nutzungstypen Haushalte (HH), Gewerbe, Handel, Dienstleistung (GHD), Industrie und Verkehr nach aufgegliedert ergibt sich eine Verteilung nach Abbildung 4. Der Industrie und GHD Sektor haben mit rund je 30 Prozent den größten Endenergiebedarf. Auf die Haushalte entfallen rund 22 Prozent des Energieeinsatzes. Mit 19 Prozent der Endenergie liegt der Verkehrssektor auf einem ähnlichen hohen Bedarfsniveau wie die Haushalte.

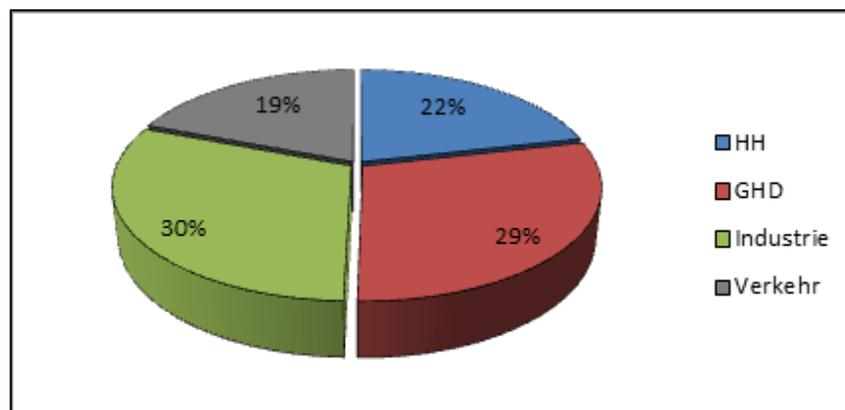


Abbildung 4: Aufteilung des Endenergieverbrauchs nach Nutzungsgruppen, IBP nach (ifeu 2013).

Die Bereitstellung der Endenergie von 2010 verteilt sich prozentual, wie in Abbildung 5 zu sehen, auf zehn Energieträger, wobei auch die Fernwärme zu Anteilen aus Erdgas, Biomasse, Kohle und aus dem Müllheizkraftwerk bereitgestellt wird. Den größten Anteil am Endenergieverbrauch nach Energieträgern für 2010 in Frankfurt am Main hat Strom mit 30 Prozent gefolgt von Erdgas mit rund 25 Prozent. Die über das Fernwärmenetz verteilte Wärme beträgt ca. fünf Prozent (Fernwärme) bzw. 15 Prozent (Ferndampf). Die im Verkehrssektor eingesetzten Kraftstoffe Benzin und Diesel besitzen einen Anteil am Endenergieeinsatz von zehn (Benzin) und neun Prozent (Diesel). Vier Prozent der Endenergie wird durch ölbefeuerte Wärmeerzeuger bereitgestellt. Kohle und Erneuerbare nehmen mit ca. 0,1 Prozent im Jahr 2010 nur einen sehr kleinen Anteil an der Endenergieerzeugung ein.

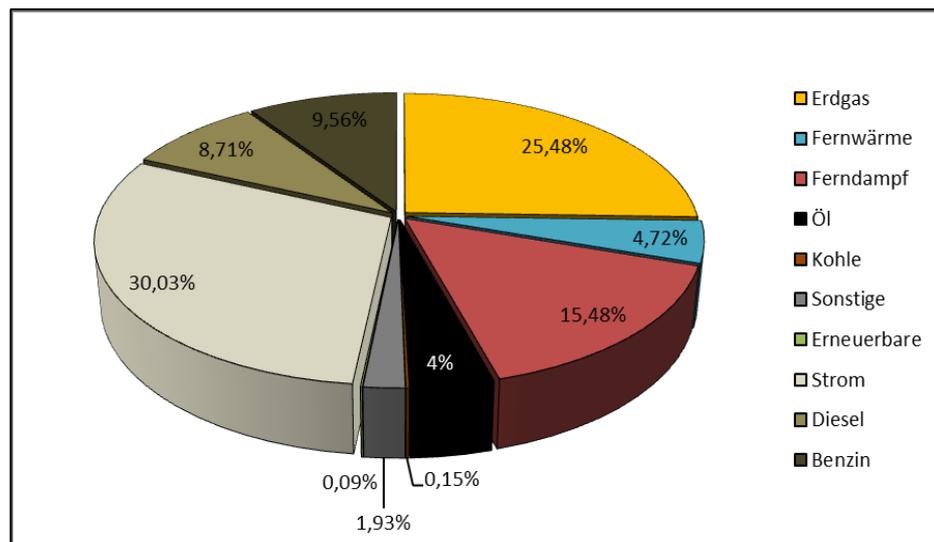


Abbildung 5: Energieträger (inkl. Verkehrssektor) im Jahr 2010, eigene Darstellung (IBP) auf Berechnungsgrundlage der Daten von (Ifeu 2013) und des Energiereferats Frankfurt 2010.

### 3.2 Aktualisierte CO<sub>2</sub>-Bilanz der Stadt Frankfurt am Main

Die Daten aus dem Diagramm basieren auf den aktualisierten Bilanzen des Ifeu Instituts. Zur Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen wurde die neue Systematik des Klima-Bündnisses genommen. Dies bedeutet:

- Keine Witterungskorrektur
- Berechnung der Emissionen immer mit CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (CO<sub>2e</sub>)

Der Endenergieeinsatz im Verkehrssektor kann aufgrund der schlechten Datenlage für die Jahre 1995 bis 2009 nicht nach Energieträger aufgeschlüsselt dargestellt werden. Aus diesen Gründen wird dieser in Abbildung 6 nicht berücksichtigt. Strom verursacht den größten Anteil der CO<sub>2</sub>-Emissionen, blieb jedoch zwischen 1995 und 2010 trotz der leichten Steigerung im Bereich der Endenergie beinahe konstant (Abbildung 6). Erdgas liegt bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen auf Platz zwei deutlich hinter dem Energieträger Strom (bei beinahe gleicher Endenergiemengen). Grund dafür sind die besseren CO<sub>2</sub>-

Äquivalente von Erdgas gegenüber dem derzeitigen Strommix. Insgesamt haben sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen vom Jahr 1995 bis 2010 um rund acht Prozent reduziert. Pro Einwohner gerechnet reduzierten sich die Emissionen aufgrund des Zuzugs sogar um 13 Prozent. Für das Jahr 2000 lagen leider keine Daten vor.

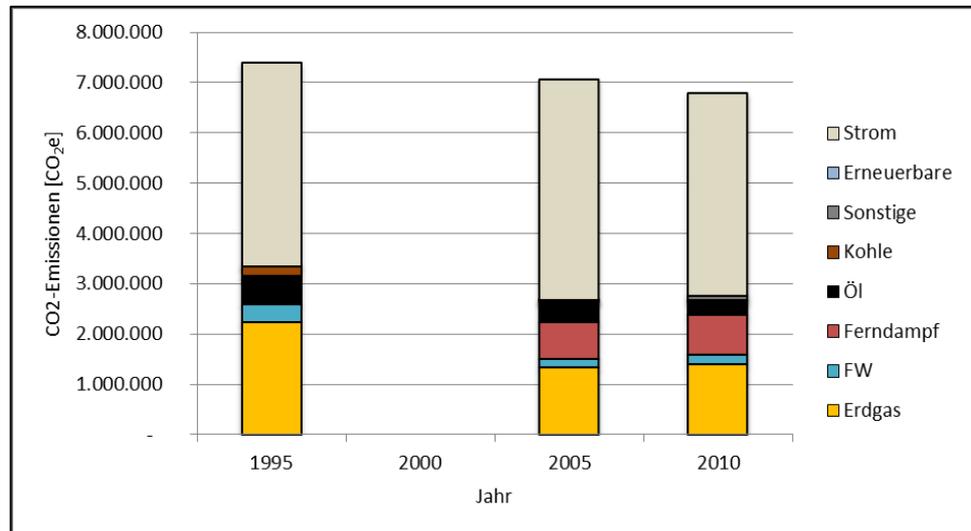


Abbildung 6: CO<sub>2</sub>-Emissionen in Frankfurt (exklusive Verkehr), (Energierreferat der Stadt Frankfurt am Main, 2014), (Insitut für Energie- und Umweltforschung, 2011).

Für das Jahr 2010 konnten durch die Datenerfassung der Stadt (Energierreferat der Stadt Frankfurt am Main, 2014), die CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Energieträgern auch im Verkehrssektor berechnet werden. Dadurch kommt es zur Abweichungen bei der Verteilung der CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Energieträger der in Abbildung 5 und 6 dargestellten Werte. Abbildung 7 verdeutlicht, dass Strom den größten prozentual Anteil (ca. 51 Prozent) an den Emissionen verursacht. Erdgas hat einen Anteil von rund 17 Prozent. Durch die Fernwärme und den Einsatz von Ferndampf werden ca. drei bzw. zehn Prozent der Gesamtemissionen verursacht. Die Emissionen im Verkehrssektor (Benzin, Diesel und z.T. Strom) liegen insgesamt bei etwa 17 Prozent. Dabei entfallen je ca. acht Prozent der Gesamtemissionen auf Diesel und Benzin und ein Prozent auf elektrische Anwendungen im Verkehr.

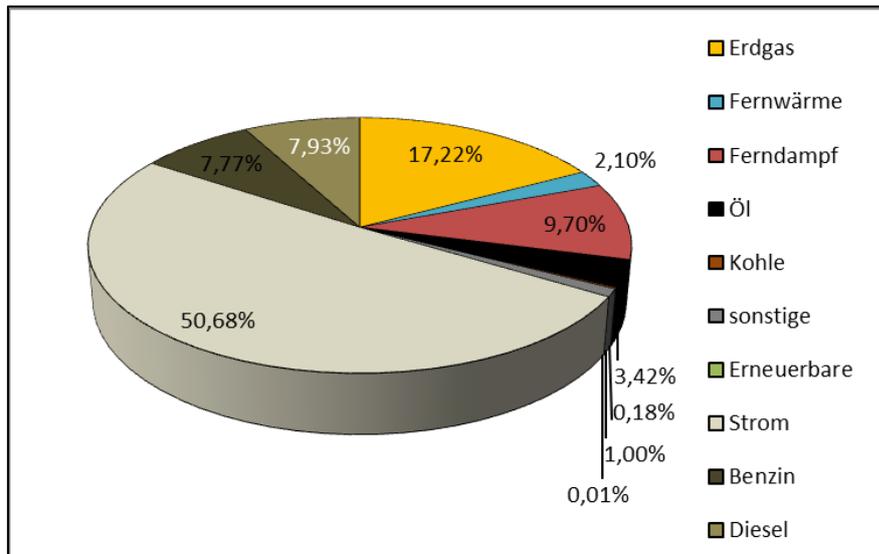


Abbildung 7: CO<sub>2</sub>-Emissionen für 2010 in CO<sub>2</sub> Äquivalente inkl. Verkehr, eigene Darstellung auf Datengrundlage von (Energierreferat der Stadt Frankfurt am Main, 2014) und (ifeu 2011).

Dies verdeutlicht, dass der große Hebel zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Stromsektor durch mehr Energieeffizienz oder den Ausbau der innerstädtischen erneuerbaren Energien zu finden ist. Soll jedoch insgesamt der Endenergieverbrauch reduziert werden, steht der Wärmesektor im Fokus, da dieser wie Abbildung 3 verdeutlichte, über 50 Prozent des Endenergiebedarfs ausmacht.

Im Folgenden wird auf die unterschiedlichen Energiesektoren Strom, Wärme und Verkehr in der Stadt Frankfurt am Main detailliert eingegangen.

### 3.3 Beschreibung der Ausgangslage im Stromsektor

#### Methodik

Die Ermittlung der Ausgangslage des derzeitigen Stromverbrauchs in Frankfurt am Main basiert auf der Aktualisierung von Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen vorhergegangener Studien (Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu), 2011). Ausgehend von den aktualisierten Strombedarfen für das Jahr 2010 werden für die Sektoren Haushalte, GHD sowie Industrie Stromeinsparmaßnahmen vorgestellt. Der Stromeinsatz im Verkehrssektor wird hier nicht betrachtet. Dieser findet sich im Kapitel „Beschreibung der Ausgangslage im Verkehrssektor“ wieder. Der Stromverbrauch von Straßenbeleuchtungen und kommunalen Gebäuden wird im Gewerbe, Handel und Dienstleistungssektor berücksichtigt.

Im Anschluss erfolgt die Bewertung der Maßnahmen hinsichtlich ihrer Umweltwirkung, der Wirtschaftlichkeit und dem Zeithorizont der Umsetzung.

Für die Ermittlung des Strombedarfes der Haushalte wird das statistische Jahrbuch der Stadt Frankfurt am Main genutzt (Stadt Frankfurt, 2011). Die Abschätzung des Einsparpotentials der einzelnen Anwendungen wird dem Leit-

faden „Energiesparen in Haushalten“ der Stadtwerke Tübingen entnommen (Stadtwerke Tübingen, 2010). Der Bestand an Haushalten bis 2050 in der Stadt wurde auf Grundlage der prognostizierten Bevölkerungs- (Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, 2010) und der Haushaltsgrößenentwicklung (Institut für Wohnen und Umwelt, 2013) bis 2050 abgeschätzt.

Der GHD Sektor wurde in vier große Verbrauchergruppen unterteilt. Neben dem „Handel“ sind dies „büroähnliche Betriebe“, „Hotels“ und die „Server- und Rechenzentren, die den GHD-Sektor in der Messe- und Bürostadt Frankfurt am Main prägen. Betriebe, die nicht den Branchen zu zuordnen sind (zum Beispiel: Metzgereien, Bäckereien etc.) werden unter „Sonstige“ zusammengefasst. Der Stromeinsatz für Straßenbeleuchtung wird gesondert ausgewiesen. Ausgehend vom Gesamtstrombedarf des Sektors wurde über die Flächenverteilung und die spezifischen Stromkennwerte der verschiedenen Betriebe der Strombedarf auf die einzelnen Branchen aufgeschlüsselt. Die Verteilung des Stromeinsatzes nach Anwendungen wurden branchenspezifisch aus der Studie „Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2007 bis 2010“ vom Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, 2011) und dem White Paper von Neil Rasmussen „*Electrical Efficiency Modeling for Data Centers*“ entnommen (Rasmussen, N., 2011). Die für die Straßenbeleuchtung eingesetzte Strommenge wurden den Angaben der Mainova AG entnommen (Mainova AG, 2012). Die spezifischen Einsparpotentiale der einzelnen Anwendungen wurden an Hand der Studien „2050: 100% - Klimaziel 2050“ des Umweltbundesamt (UBA) aus dem Jahr 2010 (Umweltbundesamt, 2010), „Modell Deutschland Klimaschutz bis 2050“ des World Wide Fund For Nature (WWF) erstellt durch das Öko-Institut und der Prognos AG (Öko-Institut e.V., Prognos AG, 2009) und dem „Stromsparkonzept Heidelberg Bahnstadt“ des Amtes für Umweltschutz, Gewerbeaufsicht und Energie der Stadt Heidelberg (Hellmann, 2012) abgeschätzt.

Eine Prognose der zukünftigen Flächenentwicklung im GHD Sektor, die eng mit dem Wirtschaftswachstum einhergeht, ist nur schwer zu treffen. Aufgrund unzureichender Literaturangaben erfolgt die Abschätzung der Flächenentwicklung mittels Hochrechnung auf Basis und Entwicklung historischer Daten.

Die Ausgangssituation im Sektor Industrie wird auf Basis der aktualisierten Endenergiebilanz des ifeu Instituts sowie des „Carbon Footprint“ Berichts vom Standortbetreiber des Industrieparks Höchst „Infraserv Höchst“ dargestellt (Infraserv Höchst, 2012). Unter Industrie werden alle Betriebe des produzierenden Gewerbes verstanden, die Prozesswärme in den Produktionsprozessen verwenden. Das Stromeinsparpotential der Frankfurter Industrie wurde der Studie „Energieeffizienz: Potenziale, volkswirtschaftliche Effekte und innovative Handlungs- und Förderfelder für die Nationale Klimaschutzinitiative“ des Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) sowie dem Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES) entnommen

(Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Institut für Energie- und Umweltforschung, et al, 2011) . In dieser Studie werden dynamische Größen wie Produktion und Wirtschaftswachstum berücksichtigt.

Analog zum Mobilitäts- und Wärmekonzept wird auch im Stromkonzept zwischen einem Referenz- und Maßnahmenzenario unterschieden. Das Referenzzenario zeigt eine Trendentwicklung unter Berücksichtigung der letzten zehn Jahre bis zum Jahr 2050. Im Maßnahmenzenario werden die nachfolgend vorgestellten Maßnahmen und ihre Einsparpotenziale zusammengefasst und quantifiziert. Abschließend erfolgt die Gegenüberstellung des ambitionierten Maßnahmenzenarios und des Szenarios der Fortschreibung der Trendentwicklung.

#### *Gesamtstrombedarf der Stadt*

Die Ermittlung des Strombedarfs basiert auf der Aktualisierung der Daten aus der Vorstudie des Ifeu-Instituts. Mittels der von der Stadt Frankfurt am Main zu Verfügung gestellten Daten kann eine detaillierte Aufschlüsselung für den Stromverbrauch nach Sektoren für das Jahr 2010 vorgenommen werden. Abbildung 8 stellt den gesamten Stromverbrauch der Stadt nach den Sektoren HH, Industrie und GHD inklusive Straßenbeleuchtung dar.

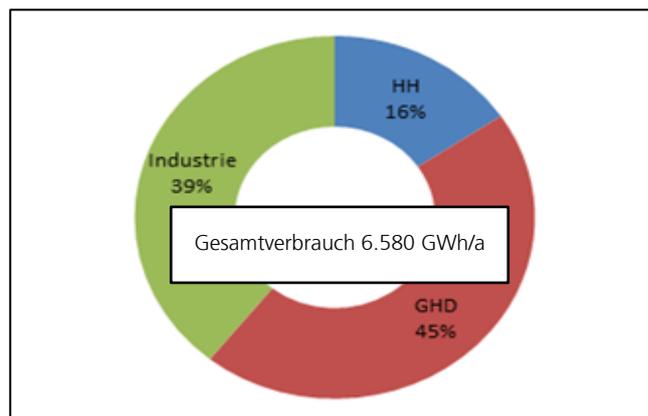


Abbildung 8: Stromverbrauch nach Sektoren 2010 in Frankfurt, eigene Darstellung (IBP) nach aktualisierten Daten (Energierreferat der Stadt Frankfurt am Main, 2014), (Ifeu 2011).

Im Jahr 2010 betrug der Stromverbrauch rund 6.580 GWh, dies bedeutet rund 29 Prozent der eingesetzten Endenergie. Der geringste Anteil am Gesamtstromverbrauch entfällt mit rund 15 Prozent (1.024 GWh) auf den Haushaltssektor. Im GHD-Sektor betrug der Stromeinsatz rund 2.582 GWh. Somit ist der GHD-Sektor mit einem Anteil von rund 43 Prozent die größte Stromverbrauchergruppe. Weitere 38 Prozent (2.582 GWh) sind der Industrie zu zuordnen.

In Abbildung 9 wird die Entwicklung der Stromverbräuche in den Sektoren (Haushalt, GHD, Industrie) von 1995 bis 2010 dargestellt. Bis zum Jahr 2010 ist in fast allen Sektoren ein Anstieg des Stromverbrauches gegenüber 1995 festzustellen. Der Stromverbrauch der Haushalte stieg im Zeitraum von 1995 bis 2005 um rund 18 Prozent an. Bei einer in diesem Zeitraum fast gleichblei-

benden Bevölkerungszahl ist der Anstieg mit einem höheren technischen Ausstattungsgrad an Multimediaanwendungen (Laptops, Handys, Fernseher, Vollautomaten etc.) in den Haushalten zu erklären. Dagegen konnte von 2005 bis 2010 trotz steigender Einwohner- und Haushaltszahlen der Energieverbrauch um rund ein Prozent u.a. durch den Austausch alter gegen neue effiziente Geräte gesenkt werden. Der Anstieg zwischen 2005 und 2009 ist nicht wie erwartet auf das hohe Wachstum im Industriesektor zurückzuführen sondern liegt in einer veränderten Bilanzierungsform des Endenergieeinsatzes. Im Sektor GHD und seinen Rechenzentren erhöhte sich der Stromverbrauch im oben genannten Zeitraum um 12 Prozent. Die Ursache dafür liegt in einem Wandel vom produzierenden hin zu einem dienstleistungsintensiven Gewerbe. Beispielsweise lag der Büroflächenzuwachs im Zeitraum von 2010 bis 2013 bei rund 25 Prozent.

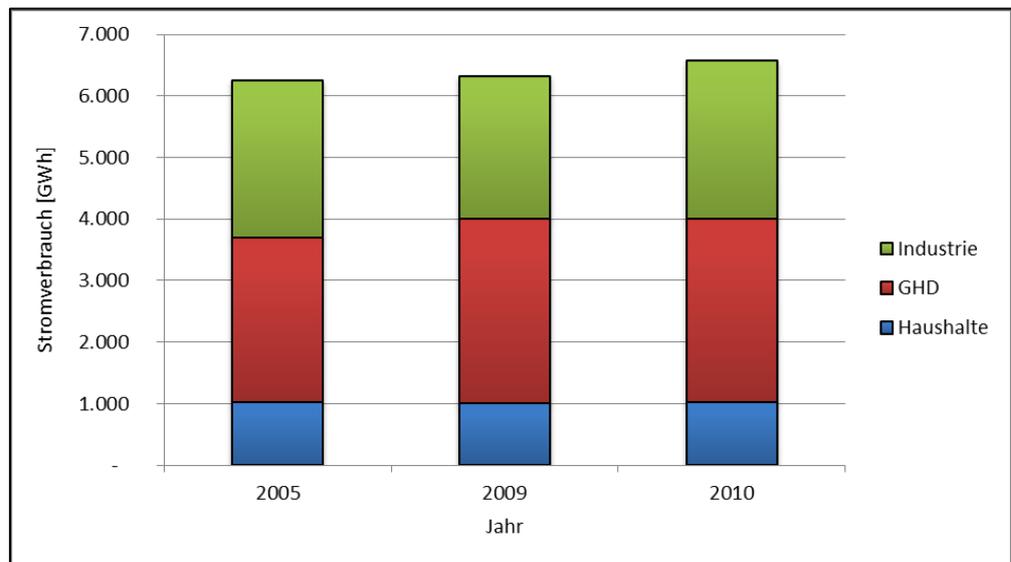


Abbildung 9: Entwicklung der Stromverbräuche von 1995 bis 2010 nach Sektoren, eigene Darstellung (IBP) nach (Energierreferat Stadt Frankfurt am Main, 2011).

### 3.3.1 Haushalte

Im Sektor Haushalte werden im Bundesdurchschnitt 71 Prozent der Endenergie für Heizzwecke, 14 Prozent für die Warmwasserbereitung und fünf Prozent für sonstige Prozesswärme (Kochen, Backen, Trocknen, Spülen, Waschen) aufgewendet. Weiter entfallen auf sonstige Klimakälte (Kühlen, Gefrieren) rund vier Prozent. Mechanische Energie (ein Prozent), IKT (drei Prozent) und Beleuchtung (zwei Prozent) beanspruchen rund sechs Prozent des Endenergieverbrauchs. Geht man nach Angaben der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. beträgt der Anteil des Stroms am Endenergiebedarf eines durchschnittlichen Haushalts rund 19 Prozent (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2013).

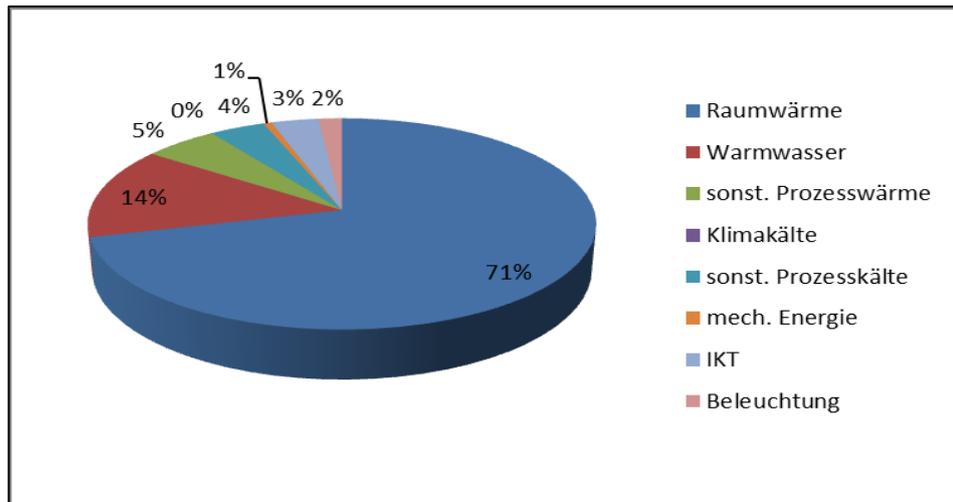


Abbildung 10: Endenergie nach Anwendungen im Haushaltssektor, eigene Darstellung (IBP) nach (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2013).

Aufgrund der Datenlage in Frankfurt in Main ist eine Aufteilung der Stromverbräuche im Haushalt nach Anwendungen nicht möglich. Um trotzdem eine Verteilung vornehmen zu können, wird an dieser Stelle auf die Verteilung strombasierter Anwendungen in Haushalten nach (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2013) zurückgegriffen. Bei der ausschließlichen Betrachtung von Stromanwendungen im Haushaltssektor ergibt sich eine Aufteilung nach Abbildung 11. Dort wird der Einsatz von Strom im Sektor Haushalte nach Anwendung für das Jahr 2011 dargestellt. Insgesamt wurden durchschnittlich acht Prozent des Haushaltsstroms zur Raumwärmeerzeugung eingesetzt. Weitere 14 Prozent entfallen auf die Warmwasserbereitung. Anwendungen wie Kochen, Backen, Waschen, Trocknen und Spülen werden unter sonstige Prozesswärme zusammengefasst und verbrauchen nach Angaben der „AG Energiebilanzen“ rund 28 Prozent des Haushaltsstroms. Der Einsatz von Strom für Klimakälte in Haushalten geht derzeit noch gegen Null. Anwendungen wie Kühlen und Gefrieren fallen unter die Kategorie „Sonstige Prozesskälte“. Demnach werden rund 21 Prozent des Stroms für den Betrieb von Kühl- und Gefrierschränken in den Haushalten verwendet. Einen geringen Anteil am Stromverbrauch hat die mechanische Energie. Lediglich drei Prozent des Haushaltsstroms werden für den Antrieb von Motoren im Haushalt beansprucht. Der Anteil Informations- und Kommunikationstechnologie am Gesamtstrombedarf ist mit den Jahren deutlich gestiegen. Im Jahr 2011 liegt der Anteil am Stromverbrauch eines Haushalts bei rund 18 Prozent. Aufgrund der erhöhten Nutzungsdauer, der Anzahl an Geräten und der Nutzungsintensität (man schaut Fernsehen und „surft“ bzw. „chattet“ mit Bekannten) ist deren Anteil deutlich mit den Jahren gestiegen. Der Beleuchtung werden rund neun Prozent des Stromverbrauchs eines Haushaltes zugeteilt.

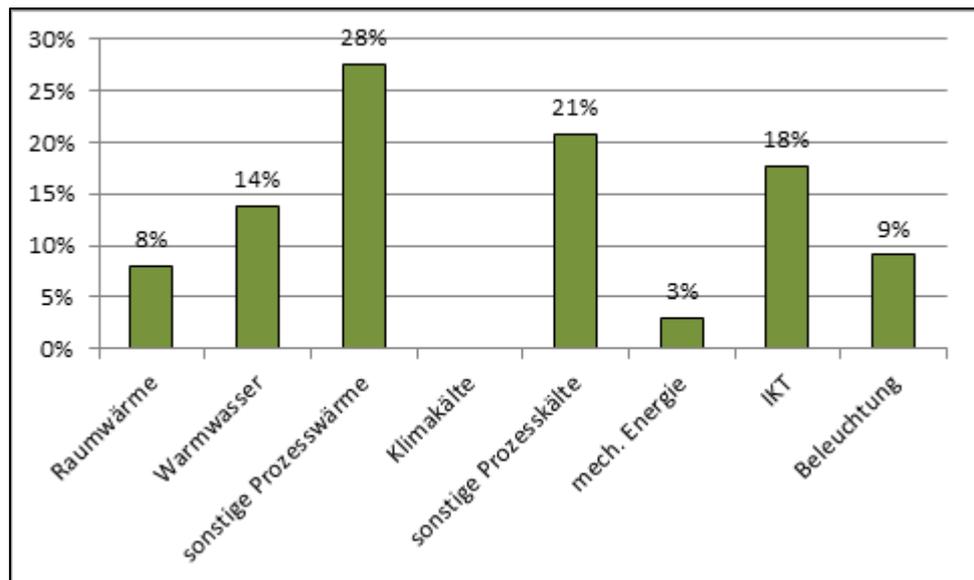


Abbildung 11: Endenergieverbrauch Strom im Sektor Haushalte nach Anwendung (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2013).

Für das Jahr 2010 betrug der Stromverbrauch des Haushaltsektors rund 1.024 GWh (Institut für Energie- und Umweltforschung (Ifeu), 2011). Dies entspricht rund 16 Prozent des Gesamtstromverbrauchs im Jahr 2010. Insgesamt konnte bei einer leicht steigenden Anzahl an Haushalten (Abbildung 12, rote Balken) der Gesamtstromverbrauch der HH in Frankfurt (Abbildung 12, blaue Balken) im gleichen Zeitraum (2005 bis 2010) nahezu konstant gehalten werden. Demzufolge sank in diesem Zeitraum der Stromverbrauch pro Haushalt von 2.947 kWh auf 2.825 kWh (siehe Abbildung 12 (Stadt Frankfurt, 2011)).

Im Vergleich zum Bundesdurchschnitt (3.554 kWh/HH) ist der Frankfurter Strombedarf pro Haushalt um rund 20 Prozent geringer. Als Grund dafür kann der unterdurchschnittlichen Anzahl an Personen pro Haushalt (FFM: 1,81 (Institut für Wohnen und Umwelt, 2013), BRD 2,01 (Statistisches Bundesamt, 2011)) genannt werden. Weiter spiegelt sich in den Zahlen das überdurchschnittliche Engagement Frankfurts bei der Förderung energieeffizienter Geräte wider. Beispielsweise wurden im Rahmen des Programms „Frankfurt spart Strom“ alte ineffiziente Kühlschränke gegen moderne und effizientere Geräte ausgetauscht.

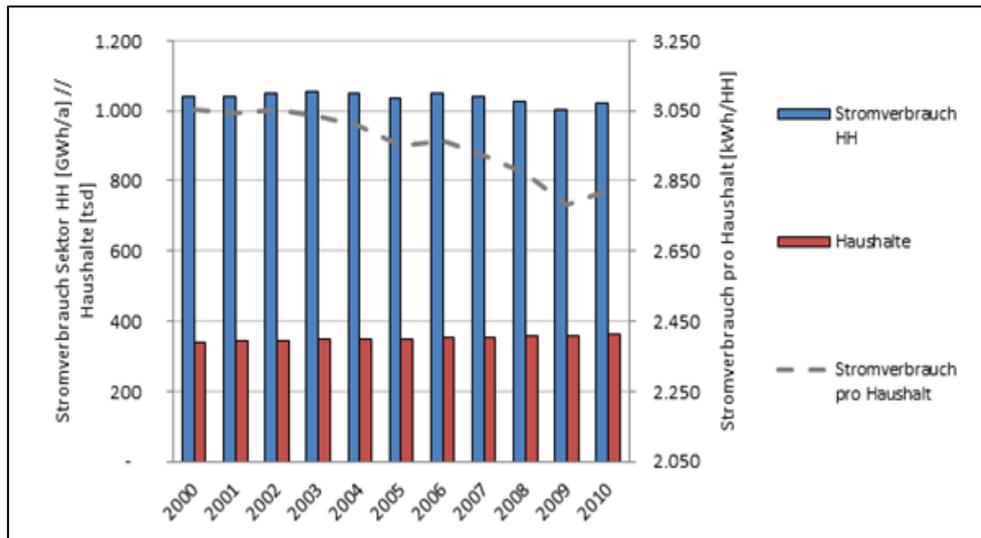


Abbildung 12: Entwicklung des Haushaltsstromverbrauchs pro Haushalt in Frankfurt a.M. von 2000 bis 2010, eigene Darstellung (IBP) nach (Stadt Frankfurt, 2011).

In Abbildung 13 wird die Entwicklung des Stromverbrauchs pro Haushalt in Frankfurt am Main und Deutschland für den Zeitraum von 2000 bis 2010 gegenüber gestellt. Es wird deutlich, dass der Strombedarf der Stadt in den vergangenen zehn Jahren deutlich reduziert werden konnte. Im Bundesdurchschnitt lässt sich dagegen eine eher stagnierende Tendenz erkennen.

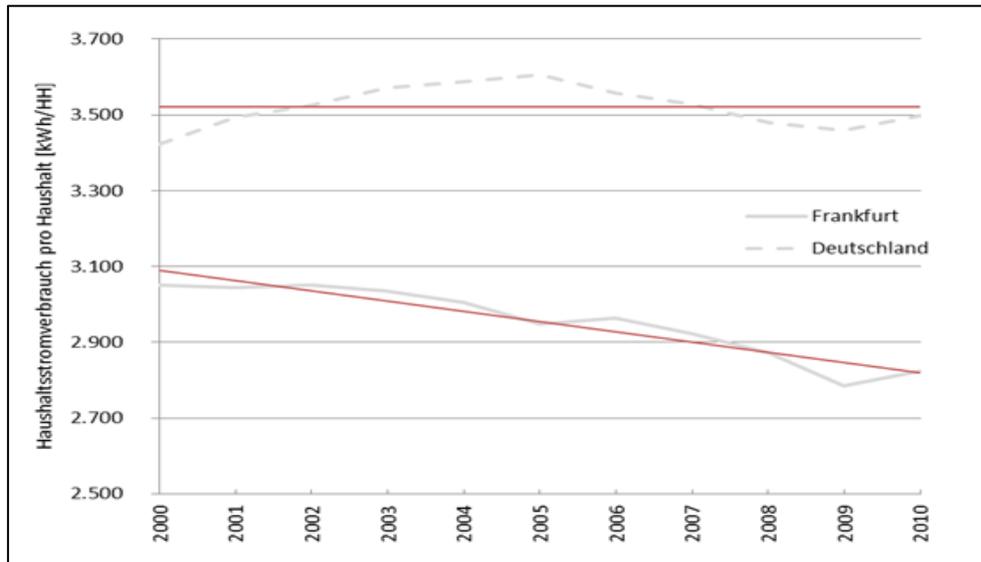


Abbildung 13: Vergleich der Entwicklung des Strombedarfs pro Haushalt in Frankfurt und Deutschland, eigene Darstellung (IBP).

### 3.3.2 Gewerbe, Handel, Dienstleistung (GHD)

Deutschlandweit stieg in den letzten 20 Jahren der Stromverbrauch im GHD Sektor um ca. 21 Prozent. Als Ursache wird der Strukturwandel von der Produktions- hin zu einer Dienstleistungsgesellschaft angeführt (Kohler, 2013). Speziell der Frankfurter GHD-Sektor ist von Dienstleistungen stark geprägt.

Der Großteil der Nachfrage kommt aus der Banken- und Finanzbranche, dem Transportwesen, der öffentlichen Verwaltung und den unternehmensnahen Dienstleistungen (Jones Lang LaSalle, 2011). Beispielsweise benötigen Rechenzentren etwa 21 Prozent des im GHD Sektor eingesetzten Stroms (625 GWh). Diese fortlaufende Entwicklung führt in naher Zukunft voraussichtlich zu einem weiteren Anstieg des Strombedarfs im GHD-Sektor. Aus diesem Grund sind Effizienzmaßnahmen bei Stromanwendungen speziell in diesem Bereich für das Erreichen und Einhalten gesetzter Klimaziele von hoher Bedeutung.

Die heterogene Struktur im Sektor GHD erfordert die Einteilung des Sektors nach Branchen. Dafür wird der Sektor in büroähnliche Betriebe, den Handel, das Hotelgewerbe ohne Restaurants und Cafés sowie Rechenzentren aufgliedert. Betriebe, die nicht den oben genannten Gruppen zuordnen sind werden unter „Sonstige“ zusammengefasst (siehe Abbildung 14). Für jede Branche wird eine Aufschlüsselung des Stromeinsatzes nach Anwendungszwecken vorgenommen. Bei den meisten Branchen lässt sich die Aufteilung des Stromverbrauchs nach den Anwendungen Beleuchtung, mechanische Energie, Prozesswärme, Prozesskälte, Klimakälte, Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) sowie Hilfsenergie (z.B. Umwälzpumpen für die Raumheizung oder Ventilatoren) vornehmen. Lediglich bei der Branche „Rechenzentren“ wird aufgrund der dort vorzufindenden spezifischen Anwendungen von der obigen Verteilung Abstand genommen.

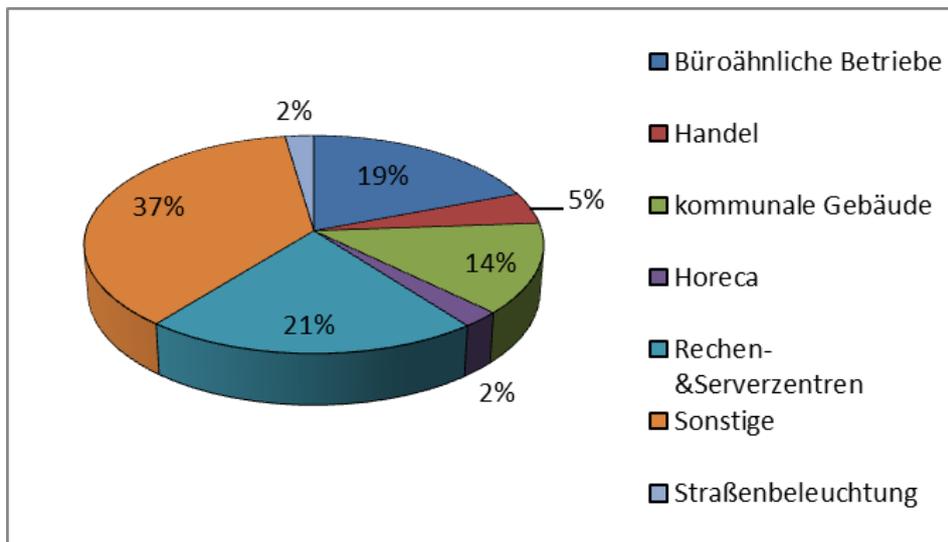


Abbildung 14: Strombedarf in GWh und deren Anteile nach Verbrauchergruppen im Sektor GHD in Frankfurt am Main, eigene Berechnung nach (Bluewien Gesa AG, 2011), (Gesellschaft für Markt- und Absatzforschung, 2009), (Mainova AG, 2013).

Insgesamt wurden im Jahr 2010 jährlich 2.970 GWh Strom im Frankfurter GHD Sektor verwendet. Davon entfiel über ein Drittel (1.100 GWh bzw. 37 Prozent) des Strombedarfs auf die unter „Sonstige“ zusammengefassten Betriebe. Der zweithöchste Strombedarf ist der Verbrauchergruppe „Rechen- & Serverzentren“ zu zuteilen. Deren Bedarf lag im Jahr 2010 bei etwa 625 GWh

bzw. 21 Prozent. Büroähnliche Betriebe hatten 2010 mit 569 GWh einen ähnlich hohen Verbrauch. Den geringsten Anteil am Strombedarf hat der Sektor Handel mit 139 GWh bzw. fünf Prozent sowie das Hotelgewerbe mit 71 GWh (2 Prozent).

Der Strombedarf für die Anwendungen Beleuchtung, mechanische Energie, Prozesswärme, Prozesskälte, Klimakälte, Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) lag im Jahr 2010 bei rund 2.345 GWh. Die restlichen 625 GWh wurden für strombasierte Anwendungen in Rechen- und Serverzentren aufgebracht.

In Abbildung 15 wird der Stromverbrauch nach Anwendungen unabhängig von der Branche dargestellt. Aufgrund der oben erläuterten Sonderstellung der Rechen- und Serverzentren, werden deren strombasierten Anwendungen im Teil „Server- und Rechenzentren“ genauer betrachtet und in der nachfolgenden Grafik nicht berücksichtigt.

Demnach werden in Frankfurt rund drei Prozent des Stroms für die Kälteerzeugung (Klima-, und Prozesskälte), 40 Prozent für Beleuchtungszwecke und 33 Prozent für die Erzeugung mechanischer Energie eingesetzt. Weiter werden weitere sechs Prozent als Hilfsenergie für Wärmeanwendungen (Raumwärme und Prozesswärme) benötigt. Der anteilige Stromverbrauch von Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) liegt bei rund 18 Prozent. Der Stromeinsatz für die Erzeugung von Raumwärme (beispielsweise in Nachtspeicherheizungen) ist nicht Gegenstand der später vorgestellten Effizienzmaßnahmen im Stromteil. Aufgrund des Nutzens der Anwendung wird diese im nachfolgenden Wärmeteil aufgegriffen, jedoch in den Ausgangsbilanzen der einzelnen Branchen berücksichtigt.

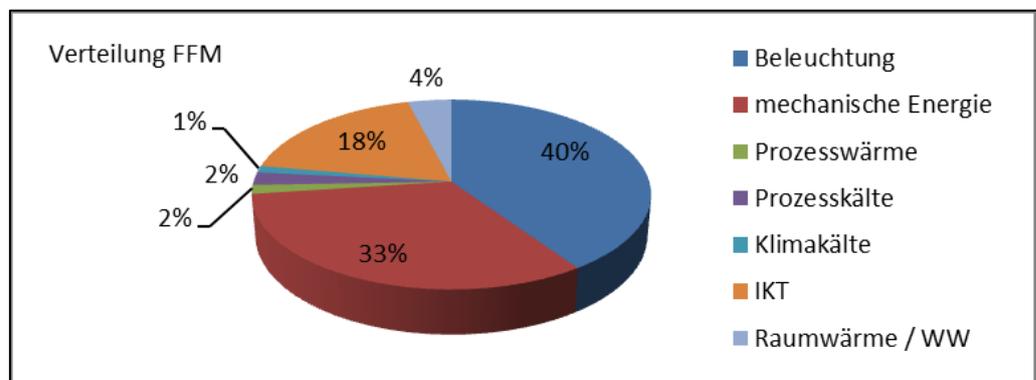


Abbildung 15: Stromverbrauch nach Anwendung im Sektor GHD im Jahr 2010 in FRANKFURT, eigene Berechnung (IBP).

Anders als in Frankfurt verteilt sich der Stromverbrauch des GHDs im Bundesdurchschnitt. Wie aus Abbildung 16 ersichtlich, liegen die Anteile der Anwendungen Beleuchtung und IKT im Bundesdurchschnitt deutlich über den Frankfurter Werten. Unter Berücksichtigung der starken Ausprägung des Dienstleistungssektors in Frankfurt fällt auf, dass insbesondere in den Bereichen Beleuchtung und IKT überdurchschnittlich viele Effizienzmaßnahmen durch-

geführt worden. Dies spiegelt sich auch in der vergleichsweise hohen Anzahl an Green Buildings Zertifizierungen der Frankfurt Gebäudeensembles wieder (Quelle kommt noch von der STADT).

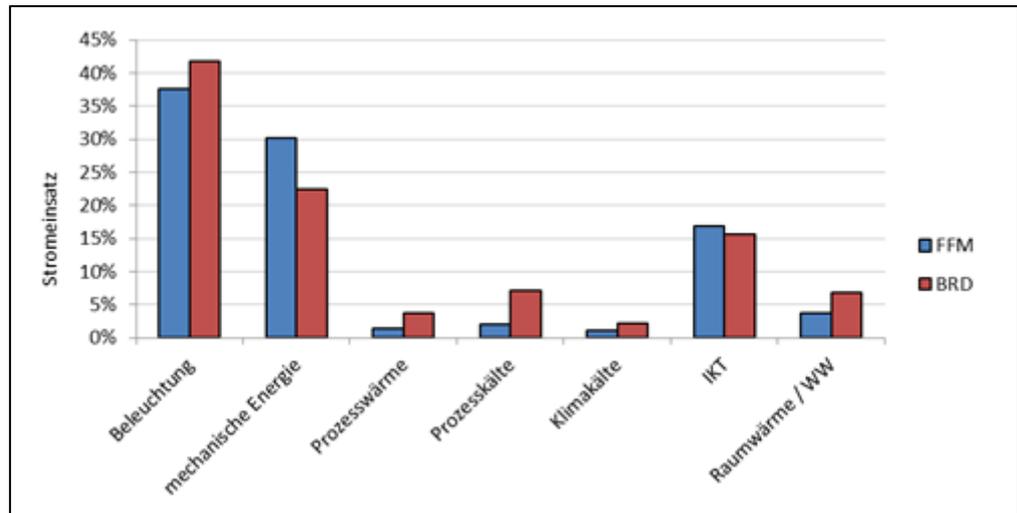


Abbildung 16: Gegenüberstellung des Stromverbrauchs nach Anwendung von Frankfurt (IBP) und dem bundesweiten Durchschnitt (Schlomann, Kleeberger, & al., 2011).

### Strombedarf „Büroähnliche Betriebe“

Mit derzeit rund 11,6 Millionen Quadratmetern Bürofläche hat Frankfurt hinter München (20 Mio. m<sup>2</sup>), Berlin (17 Mio. m<sup>2</sup>) und Hamburg (12,5 Mio. m<sup>2</sup>) den viertgrößten Büroflächenbestand in Deutschland (NAI Apollo Group, 2013). Wird die Bürofläche auf die Einwohneranzahl bezogen liegt Frankfurt mit rund 17 m<sup>2</sup><sub>Bürofläche</sub>/EW deutschlandweit auf Platz eins. Beim Anteil der Leerstandflächen nimmt Frankfurt bei den Büroflächen ebenfalls den Spitzenplatz ein. Zum einen ist die hohe Leerstandrate von derzeit 12 Prozent der „Dot-Com-Blase“ im Jahr 2000 geschuldet, zum anderen werden trotz des bestehenden Büroflächenüberangebots noch neue Büroflächen gebaut (Bluewien Gesa AG, 2011). In der nachfolgenden Strombedarfsermittlung wurde die Leerstandrate im Büroflächenmarkt mit berücksichtigt. Demnach liegt die genutzte Bürofläche bei rund 8,13 Millionen Quadratmetern. Der Strombedarf für einen Quadratmeter Bürofläche liegt zwischen 40 – 70 kWh/m<sup>2</sup>.

Für die Berechnung wird ein spezifischer Stromverbrauch von rund 70 kWh/m<sup>2</sup> angenommen (ProKlima, 2013). Aus dem spezifischen Stromverbrauch und der genutzten Bürofläche ergibt sich ein Strombedarf von rund 569 GWh im Jahr. Somit beanspruchen die büroähnlichen Gebäude rund 19 Prozent des Strombedarfs des gesamten Frankfurter GHD-Sektors für sich. In Abbildung 17 wird der Strombedarf eines büroähnlichen Betriebes nach Anwendungszwecken aufgeschlüsselt dargestellt (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, 2011).

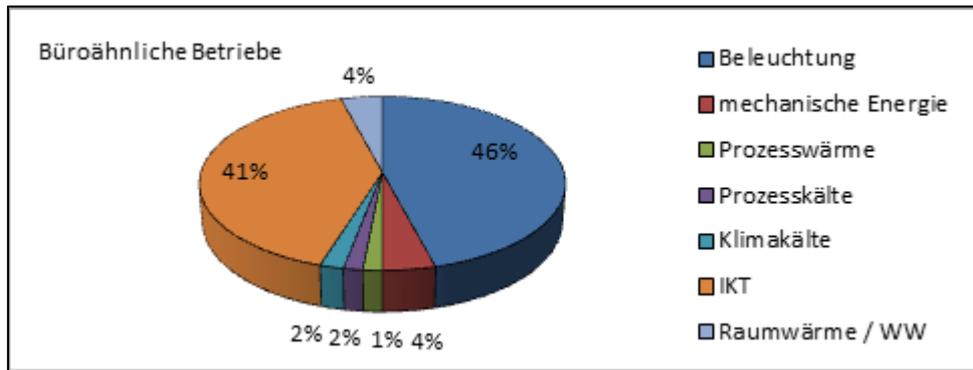


Abbildung 17: Aufschlüsselung des Strombedarfs nach Anwendungszwecken in büroähnlichen Betrieben, eigene Darstellung (IBP) nach (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, 2011).

Demzufolge entfallen rund 46 Prozent des Stromverbrauchs auf die Beleuchtung. Weitere 41 Prozent des Stroms werden für die Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) beansprucht. Die restlichen Prozente verteilen sich zu fast gleichen Anteilen auf die Anwendungen Raumwärme, Klimakälte, Prozesskälte, -wärme und mechanische Energie.

### Strombedarf „Handel“

Die aufsummierte Handelsfläche in Frankfurt beträgt 976.740 m<sup>2</sup> (Gesellschaft für Markt- und Absatzforschung, 2009). Unter dem Handel wurden Geschäfte mit den Sortimenten Nahrungs- und Genussmittel (Lebensmittelhandel, Bäckereien, Metzgereien etc.), Gesundheit und Körperpflege (Drogeriemärkte, Apotheken, Sanitätshäuser etc.), Blumen, Pflanzen und zoologischer Bedarf, Bücher, Spielwaren, Bekleidung, Elektrowaren, Hausrat, Möbel, Einrichtungen und sonstiger Handel zusammengefasst. Der durchschnittlich spezifische Verbrauch liegt bei rund 142 kWh pro m<sup>2</sup> Geschäftsfläche (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, 2011). Insgesamt beträgt der jährliche Stromverbrauch im Handel rund 139 GWh. In Abbildung 18 wird der Strombedarf des Handels nach Anwendungszwecken aufgeschlüsselt.

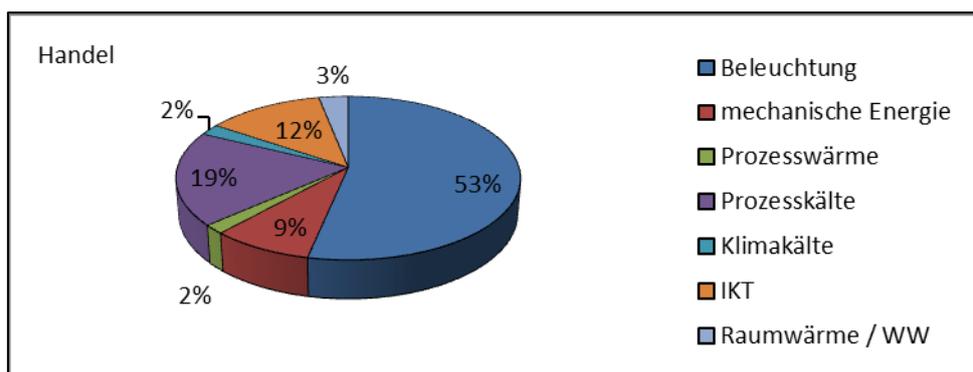


Abbildung 18: Aufschlüsselung des Strombedarfs nach Anwendungszwecken im Handel, eigene Darstellung (IBP), nach (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, 2011).

Für den Anwendungszweck Beleuchtung wird im Handel über die Hälfte (53 Prozent) des Stromeinsatzes genutzt. Am zweithäufigsten wird Strom für die Erzeugung von Prozesskälte (19 Prozent), insbesondere im Lebensmittelhandel, verwendet. Der Einsatz von Strom für IKT und mechanische Energie liegt je zwischen bei neun bzw. 12 Prozent. Den geringsten Anteil am Stromverbrauch haben im Handel die Anwendungen Prozesswärme, Raumheizung und Klimakälte.

### Strombedarf „Hotels“

Wegen fehlenden Daten konnten im Horeca-Sektor (Hotel, Restaurants und Cafés) nur die Hotels betrachtet werden. Im Jahr 2010 wurden in Frankfurt aufgrund zahlreicher Tagungen und Messen wie z.B. die Buchmesse rund 5,9 Millionen Übernachtungen gezählt (Stadt Frankfurt, 2011). Nach der Studie vom Wuppertal-Institut (Voss & Bernard, 2012) liegt der spezifische Stromverbrauch pro Übernachtung bei 12 kWh. Für das Jahr 2010 würden diese den Stromverbrauch auf insgesamt rund 71 GWh erhöhen. Die Aufteilung des Strombedarfes nach Anwendungszwecken wird in Abbildung 19 für den Horeca-Sektor vorgenommen.

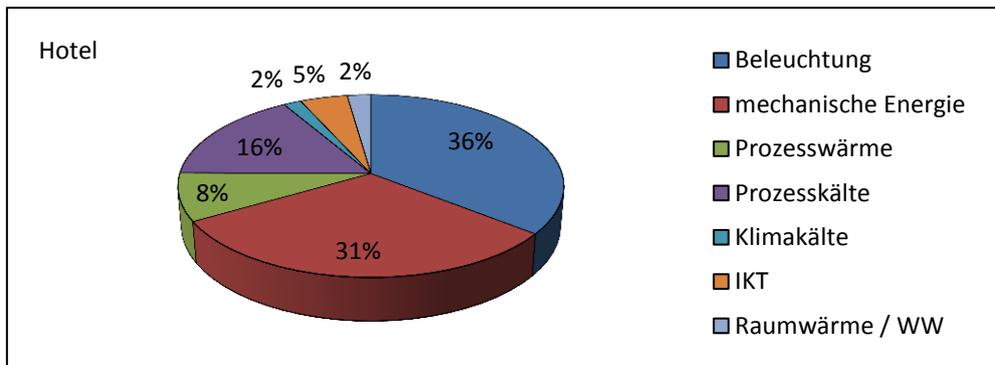


Abbildung 19: Aufschlüsselung des Strombedarfs nach Anwendungszwecken im Hotel/Horeca-Sektor, eigene Darstellung (IBP), nach (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, 2011).

Im Hotel/Horeca-Sektor wird der größte Teil des Strombedarfs für Beleuchtungszwecke (36 Prozent) und die Bereitstellung von mechanischer Energie<sup>1</sup> (31 Prozent) wie beispielsweise für Lüftungsventilatoren, Pumpen etc. genutzt. Die Anwendungen Prozess- und Klimakälte beanspruchen in Summe rund 18 Prozent des eingesetzten Strombedarfs. Für die Bereitstellung von Prozesswärme werden acht Prozent des Strombedarfs aufgewendet. Für IKT und Raumheizung werden lediglich in Summe sieben Prozent des Gesamtstrombedarfs im Horeca-Sektor genutzt.

<sup>1</sup> Energie zum Antrieb von Motoren und Pumpen

## Strombedarf der Frankfurter „Rechenzentren“

Die Bedeutung und Relevanz von Rechenzentren im Kontext der Klimapolitik wird bei der Betrachtung der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen besonders deutlich. Im Jahr 2010 lagen die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Rechenzentren mit rund zwei Prozent auf dem Niveau des Flugverkehrs. In Deutschland wurden nach Angaben des Borderstep Instituts rund 9,7 Terrawattstunden (TWh) Strom in Rechen- und Serverzentren verbraucht. Dies entspricht 1,8 Prozent des Gesamtstrombedarfs Deutschlands (Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gemeinnützige GmbH, 2012).

Frankfurt ist die Hauptstadt der Rechenzentren in Europa. In keiner anderen europäischen Stadt ist eine so hohe Dichte an Server- und Rechenzentren zu finden. Weiter befindet sich, gemessen am Durchsatz der Datenmenge, der weltweit größte Internetknoten „DE-CIX“ in Frankfurt. Insgesamt werden rund 80 Prozent des deutschen Internetverkehrs über Frankfurt abgewickelt. Im Rhein-Main Gebiet stellt die energieintensive IKT-Branche derzeit die zweithöchste Verbrauchergruppe nach dem Frankfurter Flughafen dar. Insgesamt haben sich über 35 kommerzielle Anbieter, an mehr als 50 Standorten auf einer Fläche von über 400.000 m<sup>2</sup> in Frankfurt angesiedelt (Mainova AG, 2013). Nach einer angenommenen Hochrechnung, basierend auf Angaben der (Mainova AG, 2013), beträgt der jährliche Strombedarf der gesamten Frankfurter Rechenzentren rund 625 Gigawattstunden. In Abbildung 20 wird der Stromverbrauch in Rechenzentren nach Anwendungen aufgeschlüsselt dargestellt.

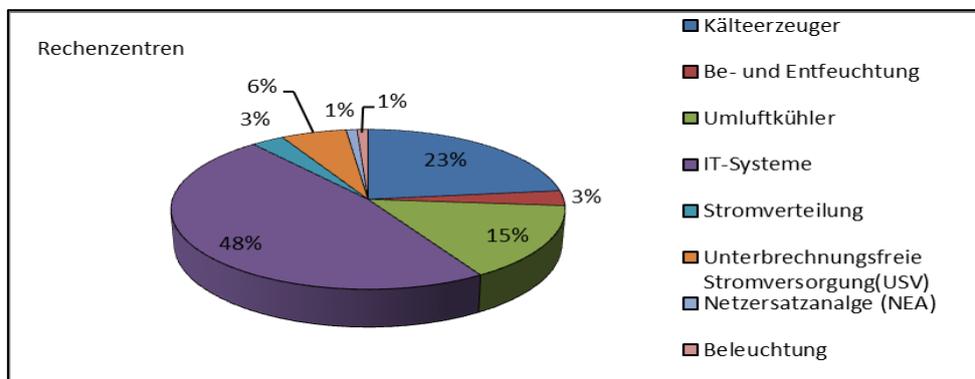


Abbildung 20: Aufschlüsselung des Strombedarfs in Rechenzentren nach Anwendungszwecken, eigene Darstellung (IBP), nach (Rasmussen, N., 2011).

Auf den Betrieb der IT-Systeme (48 Prozent) und die Kälteerzeugung (23 Prozent) entfallen gut zwei Drittel des eingesetzten Stroms. Weiter werden sechs Prozent der Strommenge zur Sicherung einer unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) eingesetzt. Rund 15 Prozent des Strombedarfes werden für die Kühlung der Umluft und rund drei Prozent für die Ansteuerung der Stromverteilereinheiten (PDU) benötigt. Netzersatzanlagen, die Beleuchtung und die Be- und Entfeuchtung der Luft im Serverraum benötigen in Summe weitere fünf Prozent. Aufgrund des hohen Strombedarfs in den Anwendungen Kälteerzeugung und Kühlung der Umluft (in Summe ca. 38 Prozent) entstehen

speziell in den Sommermonaten sehr hohe Lastspitzen. Ein verstärkter Ausbau der Rechenzentren führte in den vergangenen Jahren zu einer Verschiebung der Stromlastspitzen im Netz von den Winter- in die Sommermonate. Seit dem Jahr 2000 hat sich die Lastspitze von 664 MW auf 777 MW, damit um rund 17 Prozent erhöht (Roß, 2013). Bleibt der Trend weiter bestehen, muss langfristig über den Ausbau der Netzkapazität nachgedacht werden.

### **Strombedarf des „Verkehrs und der Straßenbeleuchtung“**

Wie in der Einleitung beschrieben, wird der Stromverbrauch des Verkehrssektors im Stromkonzept nicht aufgegriffen. Der Stromverbrauch im Verkehrssektor, z.B. durch den Bahnverkehr, ist Gegenstand des Mobilitätskonzepts und wird dort ausführlich behandelt. Somit wird in diesem Abschnitt nur auf den Stromverbrauch der Straßenbeleuchtung eingegangen.

Die Stadt Frankfurt besitzt insgesamt 72.955 Leuchten. Davon werden 92 Prozent der Leuchten elektrisch und die restlichen acht Prozent mit Gas betrieben. Insgesamt wurden im Jahr 2010 rund 32,6 GWh Strom für den Betrieb der 67.118 elektrischen Lampen aufgewendet. Für die restlichen 5.467 Gasleuchten lag der Endenergieeinsatz 2010 bei 41,5 GWh (Erfert, 2014). Obwohl der Austausch der Gasleuchten gegen Elektroleuchten aus wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten zu empfehlen ist, wurde lange Zeit der Rückbau der Gasleuchten aufgrund einer Bürgerinitiative zum Erhalt der Gasleuchten nicht vorangetrieben (Makowski, 2014).

Aus Kosten-, Sicherheits-, Komfort- und Umweltgründen hat sich die Stadt Frankfurt entgegen der Bürgerinitiative nun doch für eine Umrüstung der Gaslaternen auf Elektroleuchten entschieden. Damit sollen nach dem Stadtverordnetenbeschluss im Jahr 2014 die restlichen 5.467 Gasleuchten bis zum Jahr 2025 vollständig durch elektrische Leuchten ausgetauscht werden.

### 3.3.3 Industrie

Der Anstieg des Stromverbrauchs wie in Abbildung 21 dargestellt ist nicht einem erhöhten Stromverbrauch zurückzuführen sondern auf eine Änderung im Bilanzierungsverfahren zurückzuführen. Aus diesen Gründen sind die Stromverbrauchswerte der Industrie erst ab 2005 vergleichbar. Zwischen 2005 und 2010 ist der Stromverbrauch mit rund 2.600 GWh im Industriesektor nahezu gleichgeblieben (Institut für Energie- und Umweltforschung (Ifeu), 2011).

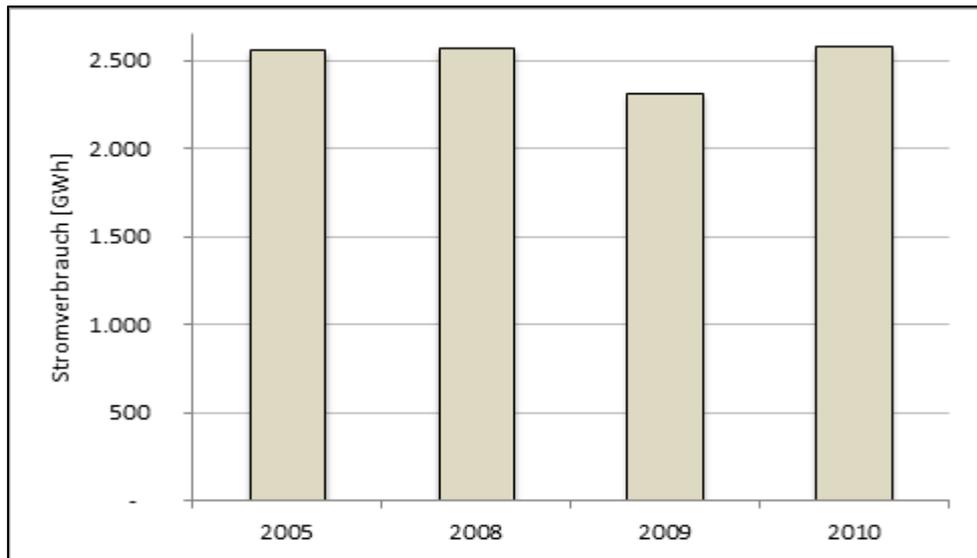


Abbildung 21: Stromverbrauch Sektor Industrie für 1995 bis 2010, Quelle: (Institut für Energie- und Umweltforschung (Ifeu), 2011)

Der Industriepark Höchst nimmt in Frankfurt eine Sonderrolle ein. Dort wurden im Jahr 2010 rund 70 Prozent des „Industrie-Stroms“ eingesetzt. Der Stromverbrauch lag somit bei rund 1.820 GWh.

Der Endenergieverbrauch eines Industriebetriebes kann, wie in Abbildung 22 dargestellt, aufgeschlüsselt werden. Dies verdeutlicht, dass der Energieträger Strom im Durchschnitt größtenteils für mechanische Energie (Motoren, Pumpen etc.) genutzt wird.

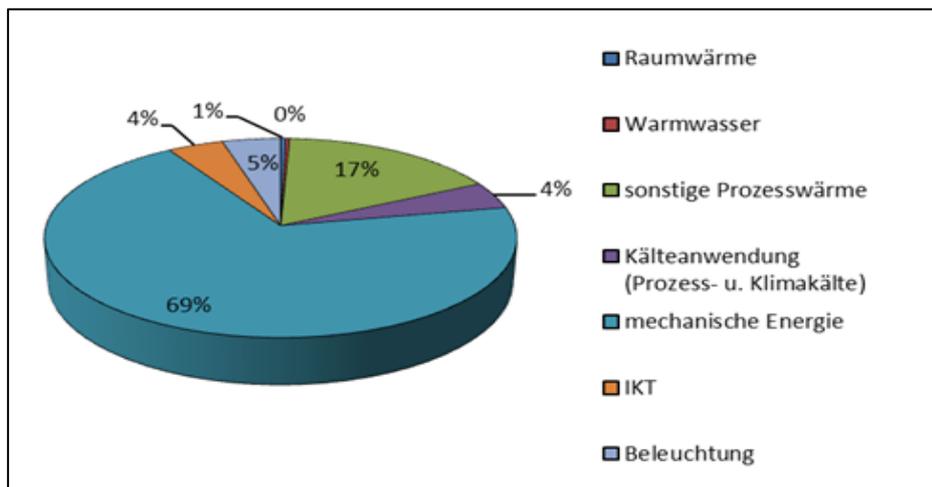


Abbildung 22: Aufteilung des Endenergieverbrauchs nach Anwendungsfall, eigene Darstellung nach (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2013).

### 3.3.4 Versorgungsstruktur der Stromerzeugung

Die Stromversorgung von Frankfurt basiert auf nationalen sowie innerstädtischen Erzeugungskapazitäten. Der in Frankfurt ansässige Energieversorger, die Mainova AG ist mit rund 664.400 Kunden der größte Stromversorger

Frankfurts. Deren Erzeugungskapazitäten genüchten, um rund 24 Prozent des Strombedarfs von Frankfurt (6.580 GWh) zu decken. Insgesamt werden rund 1.601 GWh Strom innerstädtisch mittels Großkraftwerken, dezentralen BHKWs und Solaranlagen seitens der Mainova und innerstädtischen Beteiligungen an Erzeugungsanlagen (Müllheizkraftwerk) erzeugt. Des Weiteren beteiligt sich die Mainova AG deutschlandweit an diversen Windparks und anderen Kraftwerken (Mainova AG, 2013). Abbildung 23 gibt einen Überblick über die bestehenden Erzeugungsanlagen der Mainova AG im innerstädtischen Bereich.

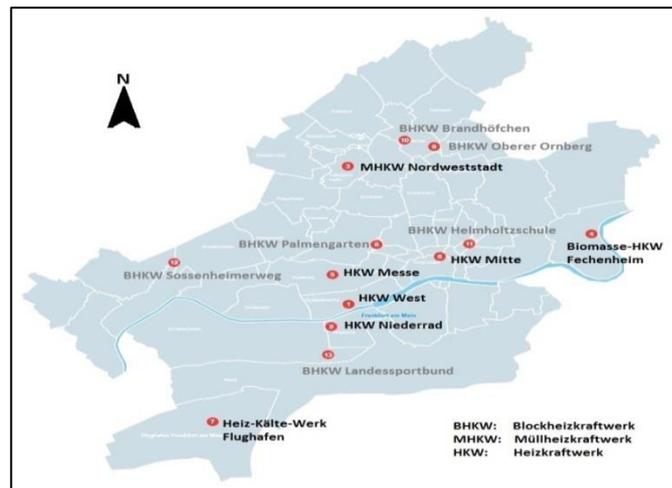


Abbildung 23: Überblick über die bestehenden Erzeugungsanlagen der Mainova AG im innerstädtischen Bereich, (Mainova AG)

Neben der Mainova AG ist mit der Süwag AG ein weiterer großer Energieversorger in Frankfurt ansässig. Über die Netze der Tochterfirma Syna werden die Stadtteile Höchst, Nied, Sindlingen, Sossenheim, Zeilsheim und Unterliederbach mit Elektrizität versorgt (Syna, 2013).

Im Folgenden wird zwischen zentralen und dezentralen innerstädtischen Erzeugungsanlagen unterschieden.

### Zentrale Stromerzeugung in Frankfurt

Der innerstädtische Erzeugungspark der Mainova AG hat eine elektrische Leistung von insgesamt 442,5 MW (inklusive BKF und MHKW, und inklusive der innerstädtischen Beteiligung an innerstädtischen Erzeugungsanlagen). Im Vergleich zum nationalen Energieträgermix aus dem Jahr 2013 enthält der Strommix der Mainova keine Kernenergie. Derzeit dominieren die im Kraft-Wärme-Kopplungs-Betrieb (KWK-Betrieb) geführten Kohle- und Gaskraftwerke die Erzeugungsstruktur. Neben diesen werden 13 Prozent des Stromes der Mainova (ebenfalls im KWK-Betrieb) in der Abfallverbrennungsanlage (AVA) Nordweststadt erzeugt. Zudem hat sich in den letzten Jahren der Anteil erneuerbarer Energien durch die deutschlandweite Beteiligung an Wind- und Solarparks erhöht. Im Jahr 2013 lag der Anteil erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung bei rund 13 Prozent (Biomasse: 5%, Wind 6%, Solar: 2%) (Abbildung 24).

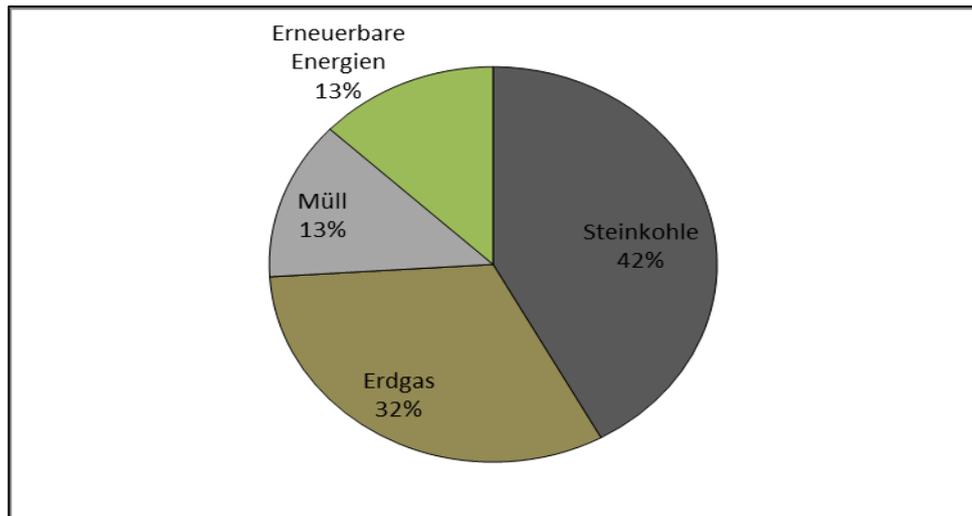


Abbildung 24: Stromerzeugungsmix der Mainova AG, Frankfurt am Main 2010, eigene Darstellung IBP nach (Mainova AG, 2013)

Die Süwag AG besitzt keine Großkraftwerke in Frankfurt. Bei den nachfolgend aufgeführten dezentralen Anlagen wurden die Erzeugungsanlagen der Süwag AG mit berücksichtigt. Aufgrund der schlechten Datenlage konnten diese nicht gesondert ausgewiesen werden. Aus Angaben der Syna geht hervor, dass die im Jahr 2013 von der Süwag abgesetzte Strommenge in den oben genannten Stadtteilen rund 96 GWh betrug.

#### Dezentrale Stromerzeuger in Frankfurt

Der Entwicklung von dezentralen Erzeugungseinheiten (BHKW, Photovoltaik, Biomasse-KWK) in Frankfurt ist dynamisch. Waren es im Jahr 2010 noch rund 899 Erzeuger sind es Anfang 2014 mehr als 1.359. Zum Ende des Jahres 2010 wurden insgesamt rund 152 GWh Strom mittels der oben genannten Technologien eingespeist. Im Jahr 2013 konnten die Einspeisungen aufgrund des starken Ausbaus der Photovoltaik und der BHKW auf rund 200 GWh gesteigert werden. Der erhöhte Anteil an Strom aus Biomasse-KWK im Jahr 2013 gegenüber 2010 konnte durch die Umstellung der BHKWs von Gas auf Bioerdgas, Biomethan und Biokompost realisiert werden. Neben den kleinen dezentralen Erzeugungseinheiten werden durch ein Flusswasserkraftwerk in Griesheim rund 35 GWh Strom regenerativ erzeugt. Weiter befindet sich eine Biogas-/Klärgas Anlage auf dem Gelände des Industriepark Höchst, die jährlich rund 40 GWh Strom erzeugt. Ebenfalls auf dem Gelände befinden sich zwei Gasturbinen mit einer elektrischen Leistung von zweimal 50 MW<sub>el</sub> und 40 MW<sub>el</sub>. Diese erzeugten 2013 rund 700 GWh Strom<sup>2</sup> und dienen der Stromverbrauchsdeckung im Industriepark.

<sup>2</sup> Abschätzung bei 5.000 Vollaststunden

Tabelle 1: Übersicht dezentraler Erzeuger in Frankfurt für die Jahre 2010 und 2013, eigene Berechnung (IBP) nach Energiereferat (2014).

Anlagentyp	Anzahl	Leistung [MW <sub>el</sub> ]	Strom [GWh <sub>el</sub> ]
<b>Zentrale Erzeuger</b>			
<b>Gasturbinen KWK (Industrie)</b>	1/3	40 / 140	200 / 700
<b>Biogas/Klärgas/Deponiegas</b>	1	ca. 8	ca. 40
<b>Wasserkraft</b>	1	ca. 4,4	ca. 35
<b>Ersatzbrennstoffanlage</b>	1	70	derzeit Pilotphase
<b>Dezentrale Erzeuger</b>			
<b>Photovoltaik</b> (2010/2013)	709 / 1.059	13,6 / 21,9	14,3 / 22,96
<b>BHKW<sub>Gas &lt; 5 MW</sub></b> (2010/2013)	ca. 188 / 294	26,9 / 31,72	134 / 159
<b>Biomasse KWK</b> (2010/2013)	2 / 6	0,69 / 3,58	3,45 / 17,9
<b>Gesamt:</b> (2010/2013)	899 / 1.359	41,2 / 57,2	151,75 / 199,86

Neben den oben genannten dezentralen und erneuerbaren Energieerzeugern gibt es in Fechenheim einen weiteren Großherzeuger. Das Biomasseheizkraftwerk Fechenheim (Mainova AG mit 90 Prozent beteiligt) hat eine Leistung von rund 12,4 MW<sub>el</sub>. Durch die Verbrennung von Biomasse wurden im Jahr 2010 in etwa 70,92 GWh bzw. 2013 ca. 91 GWh regenerativer Strom bereitgestellt. Desweiteren wurden im Jahr 2010 rund 256,2 GWh Strom durch die Verbrennung von Müll erzeugt. Im Jahr 2013 konnte die Auslastung des Kraftwerks verbessert werden, sodass die Stromproduktion auf 281,9 GWh anstieg. Neben der Müllverbrennung, dem Biomasse Kraftwerk in Fechenheim, dem Wasserkraftwerk und den dezentralen erneuerbaren Erzeugern (PV, Biomasse-KWK) in der Stadt werden weitere 40 GWh Strom durch die Bio-, Klärgas erzeugt.

Insgesamt lag die Stromproduktion aus erneuerbaren Energien im Jahr 2010 bei rund 420 GWh. Bis 2013 konnte die eingespeiste Strommenge auf rund 487 GWh erhöht werden. In der nachfolgend Abbildung 25 wird der erneuerbare Strom nach Erzeuger aufgegliedert dargestellt (links 2010; rechts 2013).

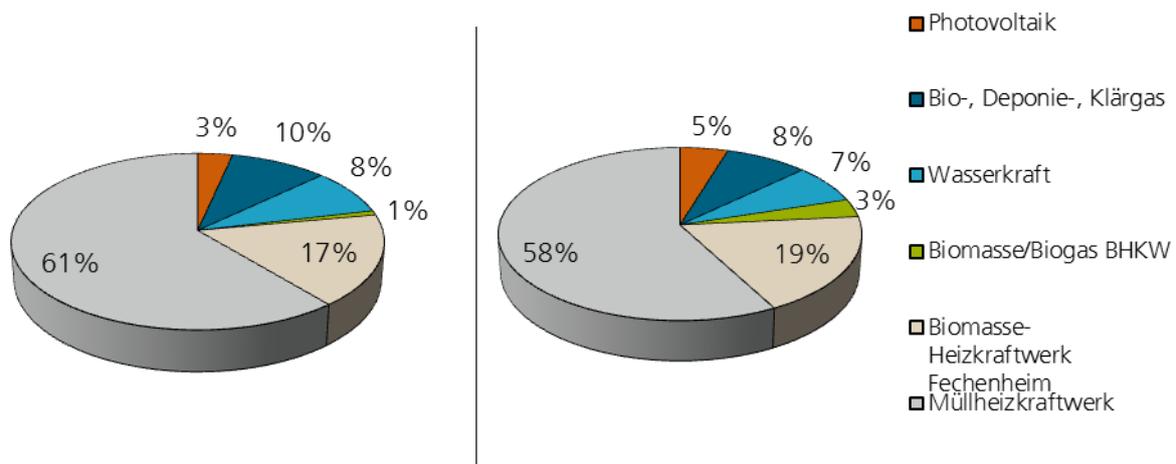


Abbildung 25: Erneuerbarer Strom nach Erzeugungstyp in Frankfurt (links 2010; rechts 2013), eigene Berechnung (IBP), (Energierferat 2014).

Die Grafik verdeutlicht, dass 2013 fünf Prozent der Erzeugung aus Photovoltaik kam. Es ist nicht gleichzusetzen mit einem Anteil von fünf Prozent am Stromverbrauch.

### 3.3.5 Vergleich innerstädtische Stromerzeugungskapazität und Verbrauch

Unter Berücksichtigung des innerstädtischen Erzeugungspark der Mainova AG inklusive Beteiligungen (MHKW und BKF) und der Erzeuger aus Tabelle 1 (enthält die Stromerzeugung der SÜWAG und Infraser) beträgt die gesamte innerstädtische Stromerzeugungskapazität ca. 2.108 GWh. Damit konnten im Jahr 2010 rund 32 Prozent des Strombedarfs durch innerstädtische Erzeugungskapazitäten abgedeckt werden. Der Anteil innerstädtisch erzeugter CO<sub>2</sub>-freier Strom am Gesamtstromverbrauch lag im Jahr 2010 mit ca. 420 GWh bei rund 6 Prozent. Bis zum Jahr 2013 stieg der Anteil auf rund 8 Prozent.

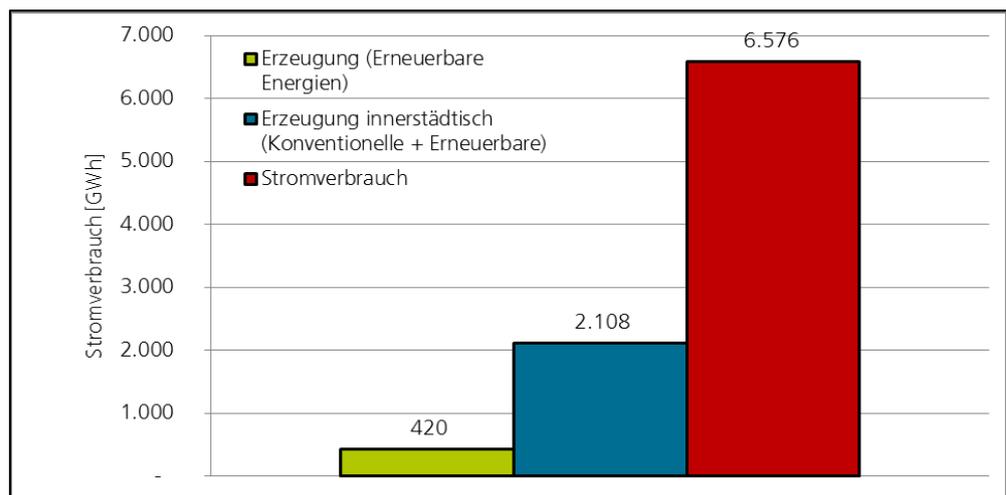


Abbildung 26: Stromverbrauch versus innerstädtische Stromerzeugung im Jahr 2010, eigene Darstellung (IBP).

Unter Berücksichtigung des Strombezuges aus dem vorgelagerten Netzen steigt der erneuerbare Anteil nochmals an. Trotz allem liegt dieser noch deutlich unterhalb der gesetzten Klimaziele (25 Prozent Erneuerbarer Energieerzeugung am Endenergiebedarf bis 2050) der Stadt Frankfurt am Main. Eine Einhaltung der Zielvorgabe ist nur dann möglich, wenn die Stromnachfrage der Verbraucher (HH, GHD, Verkehr und Industrie) in Zukunft deutlich sinkt und die Potentiale der innerstädtischen Erzeugung voll ausgeschöpft werden. Dafür hat sich die Stadt Frankfurt das Ziel gesetzt bis 2050 den Endenergieeinsatz um 50 Prozent gegenüber 2010 zu reduzieren. Durch die Halbierung der Strombezugsmenge von 2010 würde der heutige Anteil erneuerbaren Stroms auf rund 13 Prozent ansteigen.

### 3.4 Beschreibung der Ausgangslage im Wärmesektor

#### Methodik

Die Ermittlung des Wärmebedarfs der Wohngebäude erfolgt auf Grundlage der vom Ingenieurgesellschaft Bischoff und Maaß mbH aufgestellten Gebäudetypologie für Frankfurt (Ingenieurgesellschaft Bischoff und Maaß, 2011). Auf Basis der Gebäudetypologie konnten spezifische Wohnflächen für die jeweiligen Gebäudetypen und Baualtersklassen ermittelt werden. Diese wurden anschließend mit dem modifizierten spezifischen Energiebedarf und der Anzahl der in Frankfurt stehenden Gebäudetypen nach IWU Gebäudealtersklassen multipliziert. Hierbei wird der unterschiedliche Gebäudestandard berücksichtigt. Nach Angaben der Allianz für Gebäude-Energie-Effizienz (geea) wurden bis heute an rund 70 Prozent der Wohngebäuden die vor 1979 erbaut wurden noch keine Dämmmaßnahmen durchgeführt (Allianz für Gebäude-Energie-Effizienz, 2011). Lediglich bei 20 Prozent der Wohngebäude wird von einer Teilsanierung ausgegangen, diese aber kaum quantifizierbar sind, da Daten zur Qualität der Sanierung fehlen. Die restlichen zehn Prozent gelten als vollsaniert (Deutsche Energie Agentur, 2011).

Den Heizenergieverbrauch der mehr als 1.000 durch die Stadt Frankfurt am Main genutzten Liegenschaften wurde aus dem Seminarprogramm „Energiecontrolling in öffentlichen Gebäuden“ für die Energiebeauftragten der Stadt Frankfurt am Main aus dem Jahr 2011 entnommen. Das Einsparpotential durch Sanierung der Liegenschaften auf EnEV-Niveau liegt laut Jahresbericht des Hochbauamtes (Hochbauamt Stadt Frankfurt am Main Abteilung: Energiemanagement, 2013) bei rund 40 Prozent. Eine bestmögliche Sanierung über den EnEV Standard hinaus würde eine zusätzliche Reduktion in Höhe von 30 Prozent mit sich bringen. Der Heizenergieverbrauch der kommunalen Gebäude wird nachfolgend im Sektor GHD berücksichtigt.

Im Vorfeld der Ermittlung des Wärmebedarfes im GHD Sektor wurde dieser in drei Hauptgruppen unterteilt. Die erste Gruppe stellt den in Frankfurt hohen Anteil an Bürofläche dar. Weiter wird der Einzelhandel separat erfasst. Die restlichen Betriebe (wie z.B. Gaststätten, Metzgereien etc.) werden unter „Sonstige“ zusammengefasst. Die Anzahl der Büroflächen in Frankfurt wurden wie im Stromsektor aus der Veröffentlichung der NAP Apollo „Büromarkt Frankfurt am Main“ entnommen (NAI Apollo Group, 2013). Dabei finden freistehende Büroflächen (Leerstand) keine Berücksichtigung in der Berechnung. Der Wärmebedarf der Bürogebäude wurde aus der Tabelle des Wärmekonzepts der Ingenieur Gesellschaft Bischoff und Maaß mbH entnommen (Ingenieurgesellschaft Bischoff und Maaß mbH, 2011). Für die Ermittlung des Wärmebedarfs im Einzelhandel wurden die Verkaufsflächen aus dem Gutachten der Gesellschaft für Markt- und Absatzforschung (GMA) aus dem Jahr 2009 herangezogen (Prediger, 2011). Die Verkaufsfläche wurde mit den spezifischen Wärmebedarfswerten aus den Tabellen des Wärmekonzepts der Ingenieurgesellschaft Bischoff und Maaß mbH multipliziert (Wärmekonzept-tabelle). Aufgrund der Datenqualität konnten die restlichen GHD Betriebe

nicht detailliert aufgegliedert werden. Für die Ermittlung des Wärmebedarfs der „Sonstigen“ bzw. restlichen GHD Gebäude wurde die Differenz aus den vom Ifeu 2010 ermittelten Wärmeverbräuchen für den GHD Sektor und der Summe aus dem Wärmebedarf der Büro- und Einzelhandelsgebäude gebildet. Der Wärmeverbrauch des Industriesektors beruht auf den aktualisierten Daten des Ifeu Instituts.

### 3.4.1 Gesamtwärmeverbrauch

Insgesamt wurden im Jahr 2010 ca. 11.713 GWh Wärme bzw. 52 Prozent der Endenergie für die Bereitstellung von Wärme verwendet. Seit 1995 reduzierte sich der Wärmeverbrauch in Frankfurt um acht Prozent.

Den größten Anteil am Wärmeverbrauch hatte im Jahr 2010 die Industrie mit rund 4.306 GWh. Damit wurden ca. 37 Prozent der Endenergie von den Industriebetrieben in Anspruch genommen. Auf den Haushalts- und GHD Sektor entfielen 30 bzw. 33 Prozent des Wärmeverbrauchs (Abbildung 27).

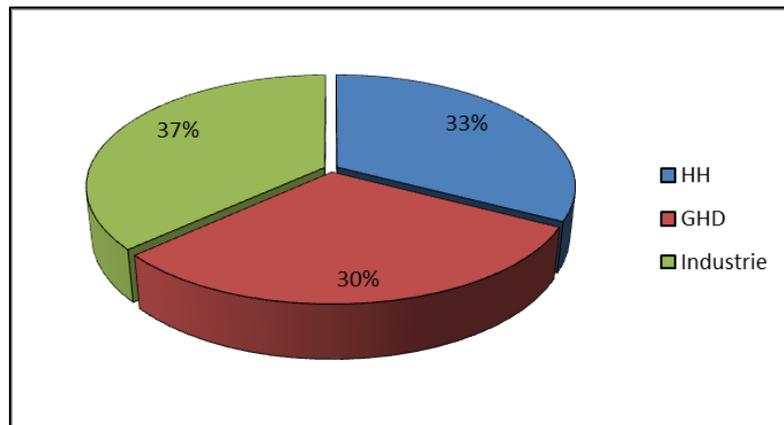


Abbildung 27: Anteile am Wärmeverbrauch nach Sektoren in Frankfurt 2010, Quelle (ifeu 2011).

Deutschlandweit wurden im Jahr 2010 rund 36 Prozent der Endenergie für Wärmeanwendungen im Industrie-, 17 Prozent im GHD und 46 Prozent in den Haushalten aufgewendet. Die Gegenüberstellung mit der Frankfurter Verteilung (siehe Abbildung 27) zeigt eine große Abweichung im Bereich GHD, die auf die überdurchschnittliche Ausprägung des GHD-Sektors in Frankfurt zurückzuführen ist.

Die Wärmeversorgung der Stadt Frankfurt basiert zu knapp 50 Prozent auf Gas als direkter Energieträger. Durch die Auskopplung von Fernwärme und Ferndampf aus Gaskraftwerken erhöht sich der Anteil an Wärme aus Gas weiter auf rund 88 Prozent. Weitere 7,5 Prozent der Wärme wurden durch die Verbrennung von Öl bereitgestellt. Hauptsächlich wurde Öl in den Heizungsanlagen privater Haushalte eingesetzt. Durch die Deklaration von Müll als „erneuerbare“ Energie liegt der Anteil der regenerativen Energien an der Wärmeversorgung bei rund 2,5 Prozent (2010) bzw. 3,14 Prozent (2013) bei einem angenommenen gleichbleibenden Energiebedarf. Der Anteil des Ener-

gieträgers Kohle konnte seit 1995 kontinuierlich reduziert werden, sodass er 2010 nur noch bei knapp 0,51 Prozent lag.

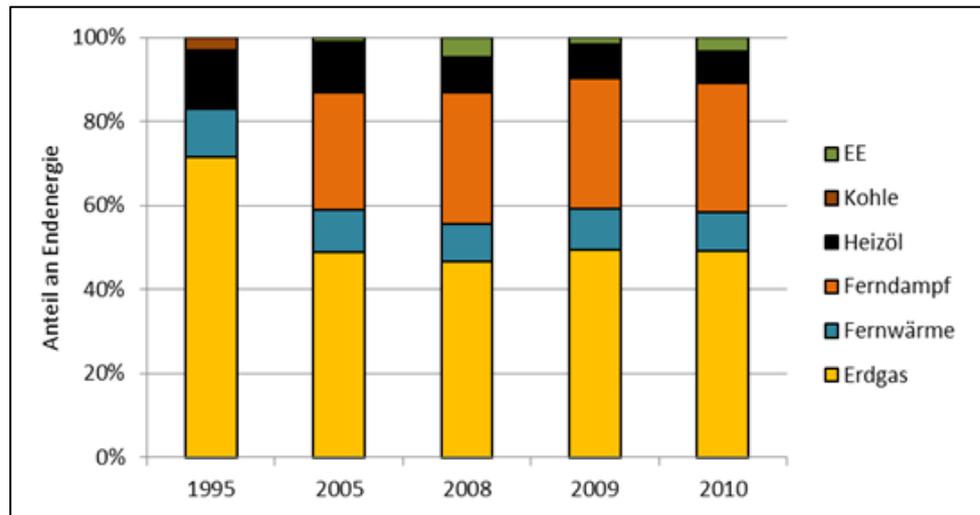


Abbildung 28: Anteile der Energieträger im Wärmesektor, Quelle (ifeu 2011).

### 3.4.2 Wärmeverbrauch in Wohngebäuden

Von 2005 bis 2010 hat sich aufgrund steigender Bevölkerungszahlen und den damit verbunden Zubau von Wohnungen der Wärmeverbrauch der Haushalte um rund sechs Prozent erhöht. Gleichzeitig sank der spezifische Wärmeverbrauch von rund 153 kWh/m<sup>2</sup> auf etwa 140 kWh/m<sup>2</sup>. Der Wärmeverbrauch der Haushalte lag im Jahr 2010 bei rund 3.830 GWh. Davon wurden rund 80 Prozent der Wärme durch Erdgas erzeugt. Der Anteil an Fernwärme liegt bei rund neun Prozent (330 GWh). Weitere zehn Prozent werden mittels dezentraler Öl-Einzelheizungen in den Privathaushalten bereitgestellt.

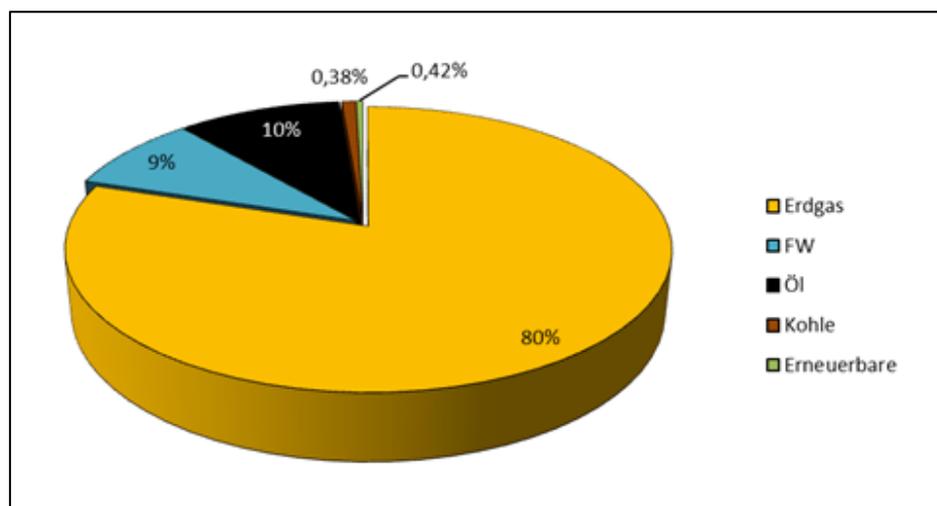


Abbildung 29: Wärmeversorgungsstruktur nach Energieträgern bei Wohngebäuden nach KEEA-Daten (Energierferat 2011).

Der Anteil von Kohle liegt derzeit noch bei rund 0,9 Prozent. Die Wärmeversorgung aus dezentralen erneuerbaren Energien beträgt 0,42 Prozent des Wärmeverbrauchs der Wohngebäude. Die Wärme wird zu 99 Prozent aus solarthermischen Anlagen auf den Dächern der Privathaushalte gewonnen. Ein verschwindend geringer Anteil der Wärme aus erneuerbaren Energien stammt aus kleinen dezentralen Biomasseanlagen wie Pelletsöfen.

Die Verteilung des Wärmeverbrauchs nach Haustypen in Frankfurt ergibt sich aus Abbildung 30. Rund 74 Prozent der Wärme werden durch mittlere und große Mehrfamilienhäuser in Anspruch genommen. Ein- und Zweifamilienhäuser besitzen lediglich einen Anteil von rund 26 Prozent.

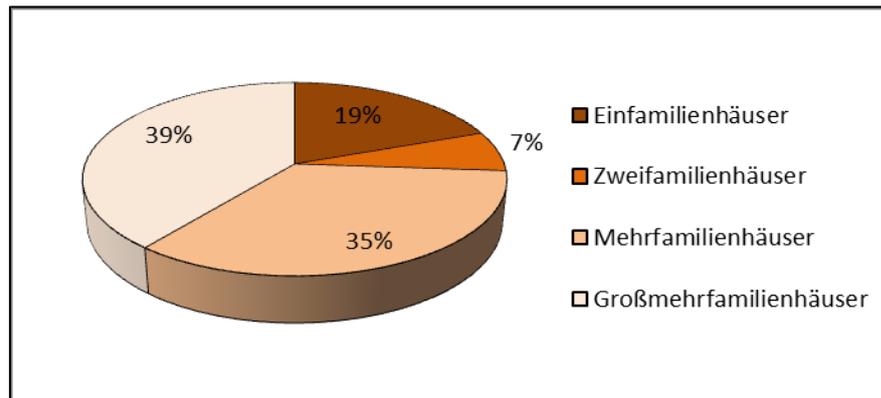


Abbildung 30: Wärmeverbrauch nach Häusertypen, eigene Darstellung (IBP).

Die genaue Aufschlüsselung des Gesamtwärmebedarfs nach Gebäudetyp und Baualterklasse wird in Abbildung 31 vorgenommen. Den höchsten Wärmebedarf haben demnach Mehrfamilienhäuser und große Mehrfamilienhäuser aus den Jahren vor 1918 und der Nachkriegszeit. Insgesamt beträgt der kumulierte Wärmebedarf der Wohngebäude bis 1958-1968 rund 78 Prozent des heutigen Gesamtwärmebedarfs und steht somit im Hauptfokus der energetischen Sanierung.

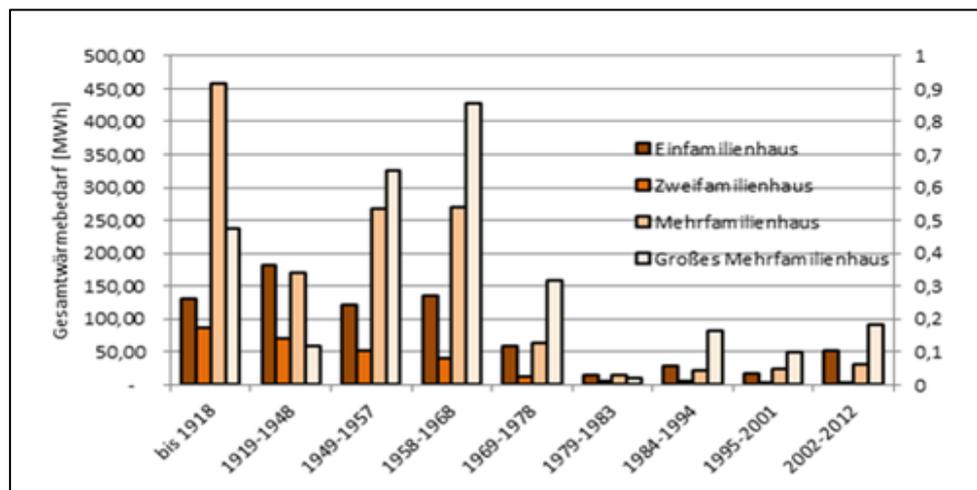


Abbildung 31: Verteilung des Wärmebedarfs nach Baualterklassen und Gebäudetypen, eigene Darstellung (IBP).

Der hohe Energiebedarf ist insbesondere auf den schlechten energetischen Baustandard der Jahre vor 1948 und die Nachkriegszeit zurückzuführen. Besonders in den Bauten der Nachkriegszeit begründet sich der hohe Energiebedarf durch den damaligen Mangel an Baumaterialien in der Zeit des Wiederaufbaus. Neben den hohen Energiebedarfen stellen die Bauten dieser Zeit auch den höchsten Wohnflächenanteil in Frankfurt (Abbildung 32). Erst ab dem Jahr 1978 wurde ein energetischer Baustandard in Deutschland festgesetzt.

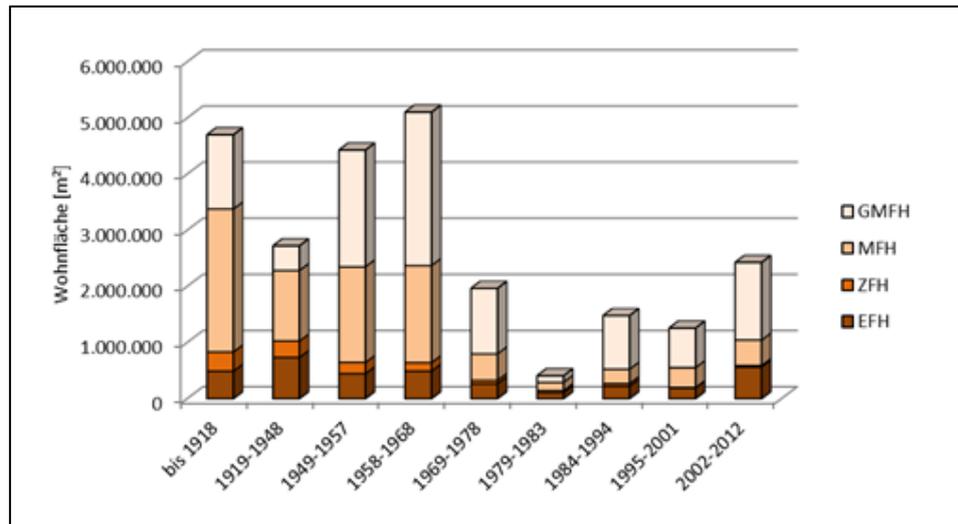


Abbildung 32: Wohnfläche nach Baualterklasse und Gebäudetypen, eigene Darstellung (IBP).

### 3.4.3 Gewerbe, Handel, Dienstleistung

Im GHD Sektor wurden 2010 rund 3.576 GWh an Wärme (Heizung und Warmwasser) verbraucht. Von 1990 bis 2010 sank dieser um rund zehn Prozent. Wie Abbildung 33 darstellt, werden 47 Prozent der Wärme im GHD Sektor mit Erdgas erzeugt. Weiter haben Ferndampf (ca. 20 Prozent) und die Fernwärme (ca. 16 Prozent) einen hohen Anteil an der Wärmeversorgung. Der Energieträger Öl hat an der Wärmeerzeugung im GHD Sektor einen Anteil von 13 Prozent. Die restlichen Prozente entfallen auf Sonstige (vier Prozent) und die erneuerbaren Energien (0,38 Prozent).

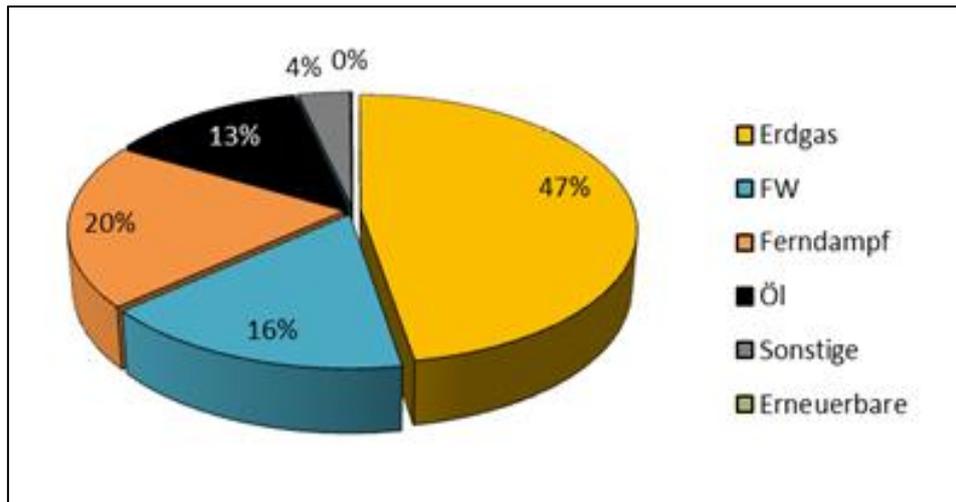


Abbildung 33: Wärmebereitstellung nach Energieträgern im Sektor GHD, eigene Darstellung (IBP) nach KEEA-Daten (Energierreferat 2011).

#### 3.4.4 Industrie

Insgesamt wurden im Jahr 2010 rund 4.306 GWh Wärme in Form von Prozess- und Raumwärme in der Industrie eingesetzt. Auf dem Gelände des Industriepark Höchst haben sich über 90 Unternehmen aus den Bereichen Pharma, Chemie, Biotechnologie und Dienstleistungen angesiedelt. Insgesamt befinden sich an diesem Standort rund 800 Labor und Bürogebäude sowie in etwa 120 Produktionsanlagen. Der Wärmebedarf (Prozess- und Raumwärme) betrug im Jahr 2010 rund 3.000 GWh. Im Industriepark befinden sich gas- und kohlebefeuerte Heizkraftwerke, die rund 2.400 GWh Dampf auskoppeln. Weiter werden rund 300 GWh Abwärme von anderen Betrieben sowie 300 GWh Abwärme aus einer Abfallentsorgungsanlage bereitgestellt. Somit versorgt sich der Industriepark weitestgehend autark (Infraserv Höchst, 2012). Die restlichen 1.276 GWh Wärme verteilen sich auf Industrieanlagen außerhalb des Standorts Industriepark Höchst.

In Abbildung 34 wird die prozentuale Verteilung der im Sektor Industrie eingesetzten Energieträger bzw. -formen dargestellt. Die Fernwärme und insbesondere der Ferndampf werden im Wesentlichen durch Gas- und Kohleheizkraftwerke bereitgestellt. Zu 24 Prozent wird Gas direkt in Prozess- bzw. Raumwärme umgewandelt ohne in das Ferndampfnetz bzw. Fernwärmenetz eingespeist zu werden. Die rund sieben Prozent Wärme, die als „Sonstige“ deklariert werden, sind genutzte Abwärmepotentiale anderer Betriebe. Heizöl trägt lediglich 0,5 Prozent zur bereitgestellten Wärme bei. Es wird hauptsächlich nur kurzfristig zum Abfahren von Lastspitze, Anfahren von Kraftwerken oder als Redundanz vorbehalten.

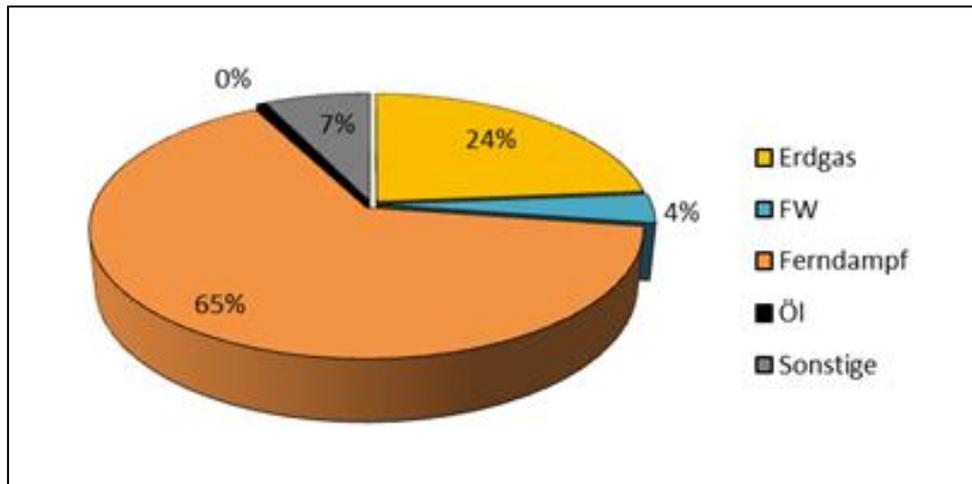


Abbildung 34: Wärmebereitstellung nach Energieträgern im Sektor Industrie, eigene Darstellung (IBP) nach KEEA-Daten (Energierreferat 2011).

### 3.4.5 Versorgungsstruktur der Wärmeversorgung

Analog zu Kapitel 3.3.4 wird nachfolgend die Struktur der innerstädtischen Wärmeerzeugung dargestellt. Die Wärmeversorgung basiert auf unterschiedlichen Quellen und Technologien. Dabei kann zwischen einer leitungsgebundenen und nicht leitungsgebundenen Versorgung unterschieden werden. Unter leitungsgebundene Versorgung zählen die Fernwärme- bzw. Ferndampfleitungen, Nahwärmenetze aber auch dezentrale Gaseinzelfeuerungsstätten. Als nicht leitungsgebundene Wärmeversorgungssysteme ist die Bereitstellung von Wärme durch Öleinzelfeuerungsanlagen, solarthermische Kollektoren und Wärmepumpen (solange diese nicht an ein Nahwärmenetz angeschlossen sind) nennen. Anders als bei der nichtleitungsgebundenen Versorgung (dezentral) kann bei der leistungsgebundenen Versorgung zwischen Dezentralen und Zentralen Erzeugern unterschieden werden. Als dezentrale Erzeuger sind die Gaseinzelfeuerungsanlagen in den Haushalten zu nennen. Zentrale Erzeuger sind Großkraftwerke, die über die Verbrennung von Gas und Kohle Fern- bzw. Nahwärme oder Ferndampf bereitstellen.

#### **Status Quo**

##### **Zentrale Wärmeversorgung - Große Heizkraftwerke**

Die in Kapitel 3.3.4 genannten Großkraftwerke der Mainova AG koppeln als Nebenprodukt der Stromproduktion Wärme, welche in das Ferndampf- bzw. Fernwärmenetz von Frankfurt eingespeist wird, aus. Im Jahr 2010 wurden rund 1.946 GWh Wärme durch zentrale Heizkraftwerke erzeugt (Mainova AG, 2012). Als Brennstoff kamen verstärkt Gas und Kohle zum Einsatz (siehe Kapitel 3.3.4). Weiter befinden sich auf dem Gelände des Industrieparks Höchst Heizkraftwerke mit einer Gesamtleistung von rund 140 MW, die die Wärmeversorgung des Industrieparks übernehmen. Die dort ausgekoppelte Wärmemenge lag im Jahr 2010 bei 3.030 GWh.

## **Blockheizkraftwerke**

In Frankfurt ist der Bestand an BHKWs beständig gewachsen. Im Jahr 2010 (vgl. Kapitel 3.3.4) waren rund 188 Anlagen mit einer thermischen Gesamtleistung von rund  $39,5 \text{ MW}_{\text{th}}$  innerstädtisch installiert. Die ausgekoppelte Wärmemenge im Jahr 2010 wird auf rund  $197,5 \text{ GWh}_{\text{th}}$  geschätzt (Annahme: 5.000 Volllaststunden). Seit Ende 2010 konnten bis Anfang 2014 die Leistung um 7 MW ausgebaut werden. Die Wärmeproduktion betrug 2013 somit rund  $230 \text{ GWh}_{\text{th}}$ . Neben den meist mit Gas befeuerten BHKWs sind derzeit ca. sechs Biomasse KWK-Anlagen mit einer thermischen Leistung von  $4,43 \text{ MW}_{\text{th}}$  in Frankfurt installiert. Deren Wärmeproduktion liegt schätzungsweise bei rund  $22,2 \text{ GWh}_{\text{th}}$  (2013). Im Jahr 2010 wurden viele der Biomasse BHKWs noch mit Erdgas befeuert. Folglich lag die installierte Leistung von Biomethan BHKWs im Jahr 2010 bei lediglich  $0,85 \text{ kW}_{\text{th}}$ . Die Wärmeproduktion betrug  $4,2 \text{ GWh}_{\text{th}}$ . Insgesamt wurden somit im Jahr 2010 rund  $201,7 \text{ GWh}$  Wärme durch dezentrale KWK-Anlagen innerstädtisch erzeugt. Bis Ende des Jahres 2013 konnte der Wärmeanteil aus dezentralen KWK-Anlagen auf  $252,2 \text{ GWh}_{\text{th}}$  gesteigert werden. Tabelle 2 gibt eine Übersicht zu den bestehenden KWK Anlagen im Jahr 2010 und 2013 in Frankfurt.

Tabelle 2: Übersicht dezentraler Erzeuger in Frankfurt 2013 (2010 / 2013), eigene Berechnung (IBP) nach Energiereferat (2014).

Anlagentyp	Anzahl	Leistung [MW <sub>th</sub> ]	Wärme [GWh <sub>th</sub> ]
<b>BHKW<sub>Gas</sub></b>	188 / 294	39,5 / 46,6	197,5 / 230
<b>Biomasse KWK</b>	2 / 6	0,85 / 4,43	4,2 / 22,2
<b>Gesamt:</b>	190/300	40,35 / 51,03	201,7 / 252,2

## Solarthermie

Nach Angaben des Energiereferates der Stadt Frankfurt am Main sind bis zum Abschluss des Jahres 2013 im gesamten Städtegebiet 1.733 solarthermische Anlagen mit einer Gesamtkollektorfläche von 20.171 m<sup>2</sup> installiert worden. Die im Jahr 2014 erhobenen Anlagen durch Luftbildauswertung konnte nicht berücksichtigt werden. Im Vergleich zum Bilanzierungsjahr 2010 konnte somit die Fläche um rund 14 Prozent erhöht werden (Stand 2010: 1.486 Anlagen; 16.829 m<sup>2</sup>). In der nachfolgenden Grafik ist die Entwicklung des Kollektorzuwachses vom Jahr 1986 bis zum Jahr 2013 dargestellt. Die größte Zunahme an Kollektorfläche ist im Jahr 2009 (2.840 m<sup>2</sup>) zu verzeichnen.

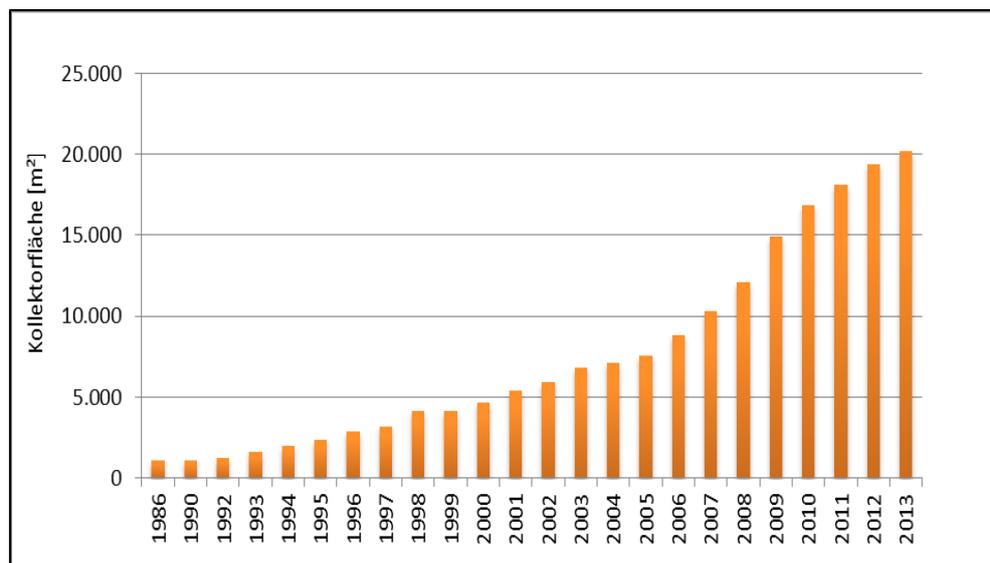


Abbildung 35: Entwicklung der kumulierten Kollektorfläche von solarthermischen Anlagen, Quelle (Energiereferat 2014).

Für die Abschätzung des Anteils an Wärme aus solarthermischen Kollektoren am Gesamtwärmeverbrauch wurde die Gesamtkollektorfläche mit dem spezifischen Ertrag von 300 kWh/m<sup>2</sup> multipliziert. Demnach wurden im Bilanzierungsjahr rund 5,04 GWh Wärme solarthermisch erzeugt. Bei einem Wärmeverbrauch von rund 11.713 GWh lag der Deckungsanteil bei knapp einem

halben Promille. Für das Jahr 2013 steigt der prozentuale Anteil der Wärmeversorgung am Wärmeverbrauch trotz des Ausbaus nicht wesentlich.

### **Wärmepumpen**

Nach Angaben der unteren Wasserbehörde lag die kumulierte Leistung aller installierten Wärmepumpen in Frankfurt am Main im Jahr 2013 bei rund 11.689 kW (Energierreferat 2013). Neben den Angaben der unteren Wasserbehörde ist noch eine Vielzahl weiterer Wärmepumpen nach Angaben der oberen Wasserbehörde und der Bergbehörde zu berücksichtigen. Insgesamt kann von einer installierten Sole-Wasser- und Wasser-Wasser-Wärmepumpenleistung von rund 25.000 kW ausgegangen werden. Diese Angaben beziehen sich auf Erdsondenanlagen (50-150 m Tiefe) und geothermische Brunnenanlagen (10-160 m). Für die Berechnung der thermisch erzeugten Energie kann von einer relativ hohen Jahresarbeitszahl für Sole-Wasser-Wärmepumpen von rund 3,8 und typischen Volllaststunden im Bereich von rund 1.600 bis 2.000 Stunden ausgegangen werden. Weitere Großwärmepumpen befinden sich in der Innenstadt (Bankenviertel), in der Nähe des Römers, in Sachsenhausen (Städel), dem Westen entlang des Mains (Gutleutviertel bis Höchst), im Gewerbegebiet Martinszehnten und Rödelheim. Weiter befinden sich im Banken- und im Gutleutviertel mittelgroße Anlagen zur Versorgung von größeren Wohngebäuden. Kleinanlagen zur Versorgung von Einfamilienhäusern befinden sich eher in der Peripherie wie beispielsweise im Neubaugebiet Riedberg, Kalbach, Bergen-Enkheim, Unterliederbach, Sossenheim, Nieder-Erlenbach und Nieder-Eschbach. Zudem werden vermehrt Wärmepumpen zur Versorgung von Neubauten in den Stadtteilen Bornheim, Sachsenhausen, Bockenheim, den Villen auf dem Lerchesberg, in Nähe der Rennbahn und in Umgebung des Unicampus-West eingesetzt. Nach Informationen des Hochbauamtes (Stand Juni 2013) liegt die kumulierte Wärmeleistung der fünf Großanlagen (Luft-Sole-WP) mit einer durchschnittlichen Bohrtiefe von rund 100 m bei 855 kW. Das Ordnungsamt in der Kleyerstraße 86 wird seit 2009 über eine Wärmepumpe mit einer Wärme- und Kälteleistung 600 kW versorgt (Hochbauamt Frankfurt, 2013). Zu den Luft-Wasser-Wärmepumpen liegen leider bisher keine genauen Zahlen vor.

Insgesamt wird die Wärmeproduktion der Wärmepumpen auf 166 GWh im Jahr 2013 geschätzt.

### **Bioenergie**

Die Wärmeproduktion des Biomassekraftwerks in Fechenheim (Betreiber: Mainova AG und der WISA) lag im Jahr 2010 bei rund 49 GWh (Mainova AG, 2012). Der dort ausgekoppelte Dampf wird durch die Verbrennung von Grünschnitt und Holzabfällen bereitgestellt und vor Ort für die Dampfversorgung des Allessa Chemieparks verwendet. Weiter befinden sich in Frankfurt rund

42 MW installierte Leistung an dezentralen Biomasseheizwerken<sup>3</sup> und Biomasseheizkraftwerken. Diese erzeugten im Jahr 2010 weitere 84 GWh Wärme. Neben den Heizkraftwerken existiert seit 1999 die Bioabfallbehandlungsanlage der RMB Rhein-Main Biokompost GmbH. In dieser werden Bioabfälle aus privaten und gewerblichen Bereich verwertet. Neben der Herstellung von Komposterde, erfolgt durch Vergärung der Abfall die Gewinnung von Biogas, welches in das öffentliche Versorgungsnetz eingespeist wird. Durch die Verbrennung in dezentralen Heizkesseln können weitere 1,7 GWh Wärme innerstädtisch erzeugt werden. Die Wärmeerzeugung aus Biomasse betrug in Frankfurt am Main insgesamt rund 134 GWh, sodass rund 1,2 Prozent des Gesamtwärmebedarfs über Biomasse gedeckt werden konnte. Damit hat Biomasse derzeit den höchsten Anteil an regenerativ erzeugter Wärme<sup>4</sup> in Frankfurt am Main.

### 3.4.6 Vergleich innerstädtische Wärmeerzeugungskapazität und Verbrauch

Insgesamt wurden im Bilanzierungsjahr 2010 rund 5.482 GWh Wärme durch innerstädtische Erzeugungsanlagen bereitgestellt. Damit konnten 46,8 Prozent der Wärme durch Anlagen in Frankfurt am Main erzeugt werden. Der Anteil erneuerbarer Wärme lag im Jahr 2010 bei 376 GWh, Abfall inklusive. Bezogen auf den Gesamtwärmeverbrauch vom Jahr 2010 konnten somit rund 3,2 Prozent der benötigten Wärme regenerativ erzeugt werden (Abbildung 36).

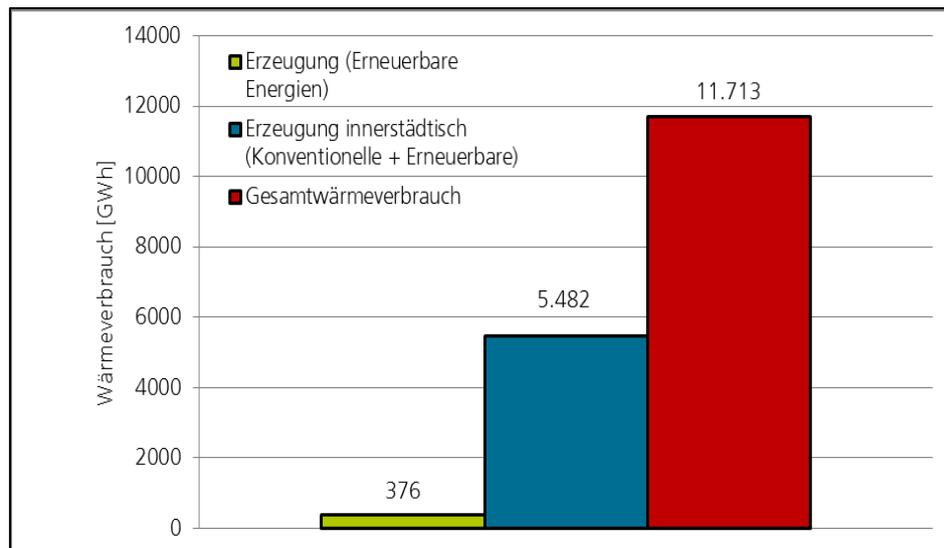


Abbildung 36: Wärmeverbrauch versus innerstädtische Wärmeerzeugung im Jahr 2010, eigene Darstellung (IBP).

<sup>3</sup> Kleine Blockheizkraftwerke und Heizwerke die auf Basis von Biomasse betrieben werden.

<sup>4</sup> nur der Anteil von Wärme aus Abfall ist höher

### 3.5 Beschreibung der Ausgangslage im Verkehrssektor

#### Methodik

Für die Darstellung der Ausgangssituation wurde auf Daten aus dem Statistischen Jahrbuch 2012 von der Stadt Frankfurt, auf das Klimaschutzkonzept vom Institut für Energie und Klimaforschung (ifeu) aus dem Jahr 2008 und auf deren aktualisierten Daten (November 2013) sowie auf Datenmaterial des Referats für Mobilitäts- und Verkehrsplanung der Stadt Frankfurt am Main zurückgegriffen.

Auf Grundlage dieser Datenbasis erfolgt die Skizzierung der einzelnen Szenarien. Mit Hilfe von Kennzahlen wie beispielsweise der „Pkw-Dichte“ oder „Personenkilometer/Nutzkilometer“ bei öffentlichen Verkehrsmitteln werden die unterschiedlichen Entwicklungen der einzelnen Szenarien gegenübergestellt. Anhand der Zielwerte können die theoretischen CO<sub>2</sub>-Einsparpotentiale bis 2050 verschiedener Technologiepfade im Personenverkehrssektor bestimmt werden. Die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Fracht- und Lieferverkehr erweist sich in der Gesamtbetrachtung als schwierig einzuschätzen. Anders als im Personennahverkehr sind die Chancen der Einflussnahme auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Lkw-Durchgangsverkehr sowie den Fernverkehr auf der Schiene, dem Wasser und in der Luft auf regionaler Ebene stark begrenzt. In diesen Sektoren müssen Maßnahmen auf Bundes- und Landesebene getroffen werden, um beispielsweise den Lkw-Verkehr auf klimafreundlichere Transportwege wie Schiene oder Wasser zu verlagern.

Nachfolgend liegt der Fokus auf dem lokalen Verkehr in Frankfurt sowie dem Quell- und Zielverkehr zwischen der Stadt und dem Umland. Maßnahmen nach nationalen und internationalen Best Practice werden präsentiert und deren Wirkung auf die Situation in Frankfurt bis 2050 abgeschätzt. Es steht außer Frage, dass die Entwicklung des Verkehrs bzw. neuer Technologien bis 2050 nur schwer vorherzusehen sind. Um trotzdem einen begrenzten Blick in die Zukunft werfen zu können, stützt sich die Prognose auf die Basis historischer Daten.

Bei der späteren Betrachtung des Personen- und Güterverkehrs wird davon ausgegangen, dass sich die Elektromobilität gegen eine Mobilität auf Basis von Wasserstoff durchsetzt. Zentraler Bestandteil für die Abschätzung der Umweltwirkung ist die künftige Entwicklung der Stromerzeugung. Die für die Berechnung angenommenen Werte werden dem Szenario A der Leitstudie 2011 des Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrums (DLR) und dem Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) entnommen (Nitsch, 2012). Die dort veranschlagten spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen pro kWh in der Erzeugung werden als Berechnungsgrundlage für die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Elektromobilität zu den jeweiligen Betrachtungszeitpunkten (2010, 2020, 2030, 2040, 2050) herangezogen.

Das nachfolgend vorgestellte Mobilitätskonzept zielt primär auf die Reduzierung der zurückgelegten Kilometerleistungen von Pkw und Lkw ab. Das Erset-

zen von fossilen Antrieben durch Elektromobilität allein stellt noch kein nachhaltiges Mobilitätskonzept dar. Dies hat vielmehr zum Ziel, möglichst viele Fahrten im motorisierten Individualverkehr (MIV) zu vermeiden oder auf andere Verkehrsträger – zu Fuß gehen, Rad fahren, Busse und Bahnen des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) – zu verlagern. Der verbleibende Kfz-Verkehr sollte effizient, emissionsarm und verträglich abgewickelt werden.

Im nachfolgenden Kapitel wird die Ausgangssituation im Verkehrssektor dargestellt. Dafür wird der Verkehrssektor auf die am Verkehr beteiligten Gruppen MIV, ÖPNV, Transportfahrzeuge, Radfahrer und Fußgänger unterteilt.

### 3.5.1 Entwicklung der Verkehrsnachfrage im Motorisierter Individualverkehr (MIV)

Der Motorisierte Individualverkehr (MIV) umfasst neben Pkw auch Motorräder. Aufgrund des geringen Anteils an Endenergie und CO<sub>2</sub>-Emissionen am Gesamtenergiebedarf/-emissionen von einem Prozent wird das Motorrad nicht gesondert betrachtet, sondern in der Berechnung des MIV unter Pkw mitgeführt. Die Motorisierung der Bewohner durch Personenkraftwagen (Pkw) hat sich im Einklang mit der Bestandsentwicklung seit 1990 stetig erhöht. In Abbildung 37 wird in Anlehnung an das statistische Jahrbuch die Entwicklung des Pkw-Bestands pro 1.000 Einwohner in Frankfurt dargestellt. Aus Gründen der späteren Vereinfachung in den Szenarien, wurde durch das Fraunhofer IBP eine von der Definition im statistischen Jahrbuch abweichende Definition der Pkw-Dichte vorgenommen. Dabei bilden die Daten „Anzahl Pkw“ und „Einwohnerzahl“ die Datenbasis für die Berechnung. Der Divisor aus den beiden Datensätzen ist die vom IBP ermittelte Pkw-Dichte. Diese unterscheidet sich insoweit von der Pkw-Dichte des statistischen Jahrbuchs, als die Anzahl der Pkw auf die Gesamteinwohnerschaft bezogen wird und nicht nur auf die Fahrtberechtigten. Die Abschätzung der demografischen Entwicklung sowie eine Prognose der Führerscheinausstellungen in Frankfurt bis 2050 ist zu komplex und umfangreich, so dass eine Berechnung der Pkw-Dichte nach oben beschriebener Vorgehensweise sinnvoll und angemessen erscheint.

Während der Pkw-Motorisierungsgrad 1990 noch bei 493 Pkw/1.000 Einwohner lag (Umweltreferat Frankfurt, 1997), erreicht er im Jahr 2006 einen Wert von 512 Pkw/1.000 Einwohner. Der Einbruch der Fahrzeugdichte im Jahr 2007 ist mit der Änderung des statistischen Erhebungsverfahrens zu erklären. Ab 2007 wurden nur noch die im Zulassungsbezirk Frankfurt angemeldeten Fahrzeuge erfasst, ohne vorübergehende Außerbetriebsetzungen und ohne Fahrzeuge aus anderen Zulassungsbezirken mit Standort Frankfurt (Stadt Frankfurt, 2011). Von 2007 bis 2010 stieg die Pkw-Dichte durchschnittlich um 0,68 Prozent pro Jahr.

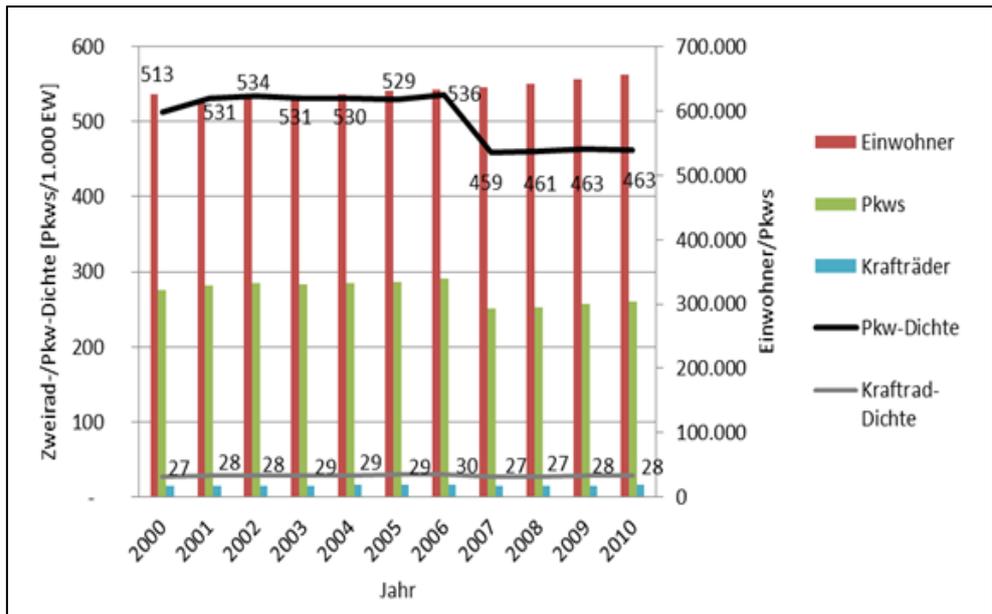


Abbildung 37: Pkw-Dichte pro 1.000 Einwohner in Frankfurt, eigene Darstellung (IBP) auf Basis von (Stadt Frankfurt, 2011).

Neben den Pkw waren im Jahr 2010 rund 18.490 Krafträder in Frankfurt angemeldet. Bei der Zweiraddichte in Frankfurt lässt sich seit 2000 kein größerer Anstieg verzeichnen.

Die in Frankfurt zurückgelegte Kilometerleistung von Pkw betrug im Jahr 2010 rund 4,1 Mrd. Fahrzeugkilometer (Institut für Energie und Umweltforschung, 2010). Nach Angaben des Ifeu verteilt sich die Jahresfahrleistung im Jahr 2010 nach Abbildung 38. Demnach entfallen über die Hälfte (57 Prozent) der zurückgelegten Kilometer auf den Quell- und Zielverkehr (Pendler). Des Weiteren entfallen rund 24 Prozent auf den Durchgangsverkehr. Die restlichen 19 Prozent werden durch innerstädtische Fahrten zurückgelegt.

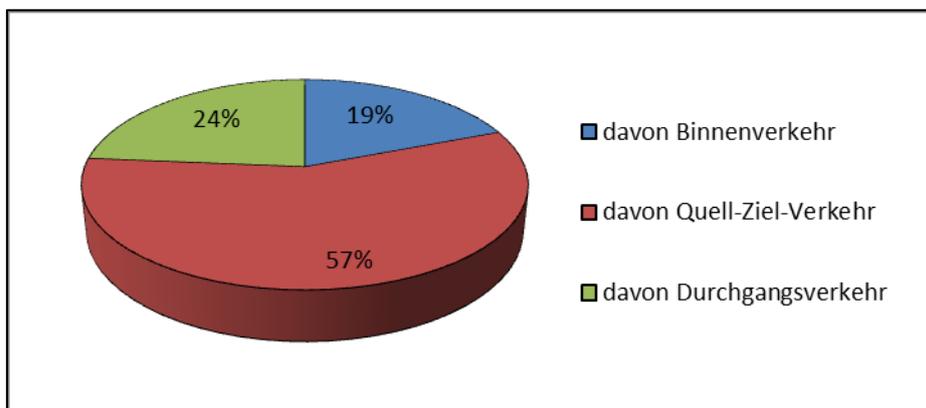


Abbildung 38: Verteilung der Kilometerleistung von Pkw nach Verkehrsart, eigene Darstellung (IBP) auf Datengrundlage (Institut für Energie und Umweltforschung, 2010).

Die zurückgelegte jährliche Kilometerleistung aller motorisierten Zweiräder im Stadtgebiet Frankfurt betrug im Jahr 2010 ca. 79 Mio. Kilometer. Analog zu den Pkw wird in Abbildung 39 die Kilometerleistung der MZR nach Verkehrsart dargestellt.

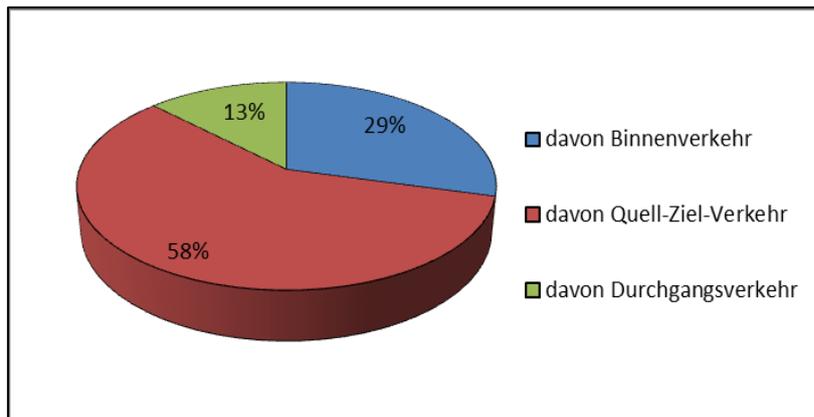


Abbildung 39: Verteilung der Kilometerleistung von MZR nach Verkehrsart, eigene Darstellung (IBP) auf Datengrundlage (Institut für Energie und Umweltforschung, 2010).

Ähnlich wie bei den Pkw wurden rund 58 Prozent der Kilometerleistung durch den Pendlerverkehr verursacht. Der Anteil der innerstädtischen Fahrten ist mit 29 Prozent deutlich höher als bei den Pkw. Der Durchgangsverkehr macht bei den motorisierten Zweirädern lediglich 13 Prozent der jährlichen Fahrleistung aus.

Für Frankfurt am Main wurde ein dem nationalen Durchschnitt entsprechendem Pkw-Bestand unterstellt. Demnach wurden 72 Prozent der Kilometerleistung durch Pkw Benzin-, 27 Prozent Diesel- und ein Prozent Hybrid-Fahrzeugen zurückgelegt. Insgesamt wurden durch den motorisierten Individualverkehr ca. 242 Mio. Liter Benzin und 72 Mio. Liter Diesel benötigt. Die jährlichen Gesamtausgaben für die Kraftstoffe Diesel und Benzin lagen bei Annahme von durchschnittlichen Jahrespreisen (Diesel: 1,20 €/l; Benzin: 1,39 €/l) (Allgemeiner Deutscher Automobil Club, 2010) von 2010 bei rund 427 Mio. Euro.

### 3.5.2 Entwicklung der Verkehrsnachfrage im Öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV)

Zur Ermittlung der ÖPNV-Nachfrage in den letzten fünf Jahren liegen lediglich Daten der Verkehrsträger Bus, U-Bahn und Straßenbahn vor. In Abbildung 40 wird die durchschnittliche Fahrgastentwicklung pro Tag für die Jahre 2007 bis 2011 dargestellt. Bei allen drei Verkehrsträgern konnte die Fahrgastbeförderung pro Jahr stetig gesteigert werden. Bus und Straßenbahn weisen eine ähnliche hohe durchschnittliche Beförderungsanzahl pro Tag auf. Die U-Bahn ist mit 317.000 Fahrgästen pro Tag (2007) bzw. 322.000 Fahrgästen (2011) das am meisten genutzte öffentliche Verkehrsmittel in Frankfurt (Stadt Frankfurt, 2011).

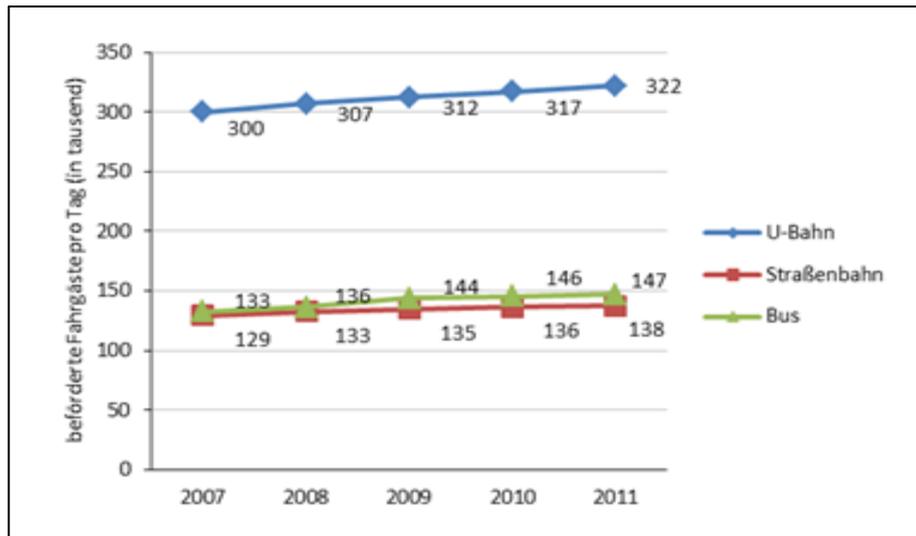


Abbildung 40: Entwicklung der ÖPNV Nutzung in Personen pro Tag von 2007 bis 2011 in Frankfurt am Main, (Stadt Frankfurt, 2011).

In Abbildung 41 wird der Anstieg der durchschnittlichen Fahrgastbeförderungen pro Tag im Index angegeben. Hierbei wird das Jahr 2007 als Referenzjahr (Index = 100) herangezogen. Bei den öffentlichen Verkehrsmitteln U-Bahn und Straßenbahn ist eine ähnlich konstante Steigerung der Fahrgastzahlen auf einem Niveau zu erkennen. Der Verkehrsträger Bus konnte im Zeitraum von 2007 bis 2011 deutlich mehr Fahrgästen pro Tag dazu gewinnen als die anderen beiden Verkehrsmittel (Stadt Frankfurt, 2011).

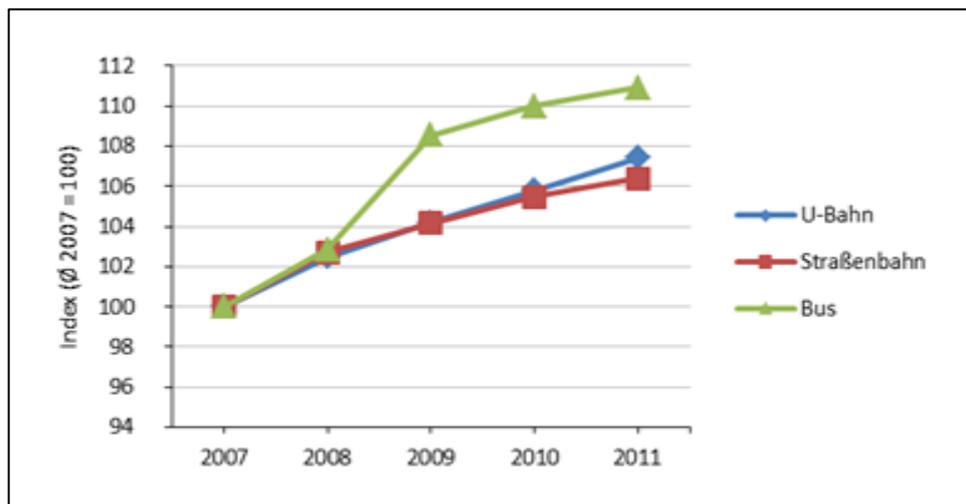


Abbildung 41: Index des Fahrgastaufkommens in den öffentlichen Verkehrsmitteln U-Bahn, Straßenbahn und Bus, (Stadt Frankfurt, 2011).

Der Fahrzeugeinsatz in der Spitze lag im Jahr 2010 bei ca. 208 U-Bahnen, 84 Straßenbahnen und 283 Busse, die den lokalen innerstädtischen Verkehr in Frankfurt beförderten (Stadt Frankfurt, 2011). Insgesamt legten die öffentlichen Verkehrsmittel des lokalen Verkehrs rund 30,9 Mio. Nutzkilometer bzw. 866,4 Personenkilometer zurück (Stadt Frankfurt, 2011). Die von traffiQ be-

triebenen Fahrzeuge des öffentlichen Personenverkehrs werden durch die Fahrzeugflotte des Rhein-Main-Verkehrsverbunds (RMV) ergänzt. Diese werden im statistischen Jahrbuch der Stadt Frankfurt unter Regionalverkehr aufgeführt. Die dort angegebene summierte Nutzkilometerleistung von S-Bahn (5,5 Mio.), Regionalbahn (2,7) und Regionalbus (1,2) betrug im Jahr 2010 ca. 9,4 Mio.km (Stadt Frankfurt, 2011).

Damit sorgen weitere 191 S-Bahnen auf neun S-Bahnlinien, 17 Regionalbahnlinien und 85 Regionalbuslinien für die reibungslose Abwicklung des ÖPNV in Frankfurt und Umland (RheinMainVerkehrsverbund, 2012). In Abbildung 42 wird der Liniennetzplan des RMV-Gebiets mit allen Verbindungen von S-, U- und Regionalbahnen nach Frankfurt dargestellt.



Abbildung 42: RMV Liniennetz Frankfurt, (Rhein-Main-Verkehrsbund, 2014).

Nach Zahlen aus dem statistischen Jahrbuch betrug die Kilometerleistung der von traffiQ und dem RMV eingesetzten Fahrzeuge im Jahr 2010 in Summe rund 39,5 Mio. Nutzkilometer (Stadt Frankfurt, 2011). Nach Angaben der vom Ifeu ermittelten Daten für das Jahr 2010 beträgt die Personenkilometerleistung aller ÖPNV Mittel im Gemarkungsgebiet Frankfurt 2.088 Mio. Personenkilometer. Bei Beibehaltung der Einteilung nach lokalen und regionalen Verkehrsleistungen aus dem statistischen Jahrbuch werden rund 868 Mio. Personenkilometer dem lokalen Verkehr zugeteilt. Demnach entfallen die übrigen 1.220 Mio.-Pkm auf die regionalen Verkehrsmittel S- und Regionalbahn. Trotz der Zuordnung der S-Bahn zum Regionalverkehr muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass diese auch einen großen Anteil des Personentransportaufkommens im Binnenverkehr übernimmt

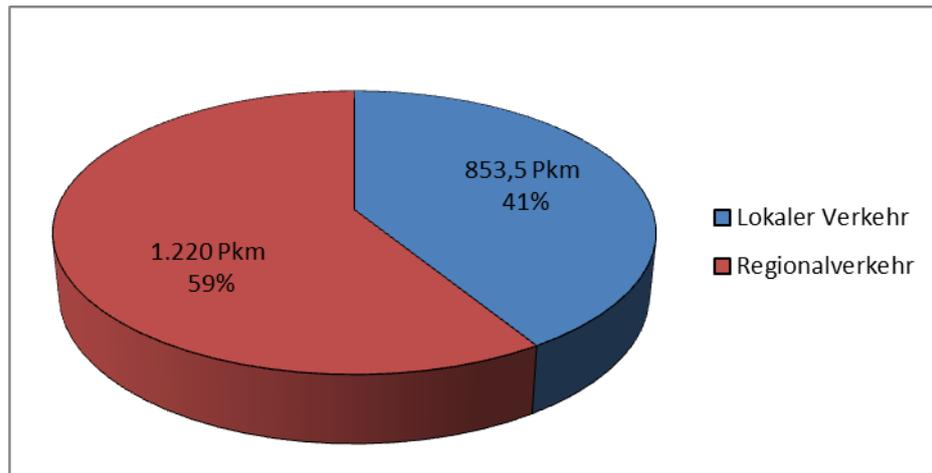


Abbildung 43: Verteilung der Pkm auf den Lokal- und Regionalverkehr nach (Stadt Frankfurt, 2011), eigene Darstellung (IBP).

Aus den Daten des Ifeu ist eine Zuteilung der Personenkilometer nach Verkehrsart möglich. In der Ifeu-Auswertung sind die Verkehrsmittel U- und Straßenbahn (SSU<sup>5</sup>) dem Binnenverkehr zugeordnet. Die Regionalzüge und S-Bahnen sind dort Bestandteil des Quell- und Zielverkehrs. Bei den Buslinien wurden die Personenkilometer nach innerstädtischen und regionalen Buslinien unterteilt. In Abbildung 44 wird die Verteilung der Kilometerleistung nach Verkehrsmittel und Verkehrsart dargestellt.

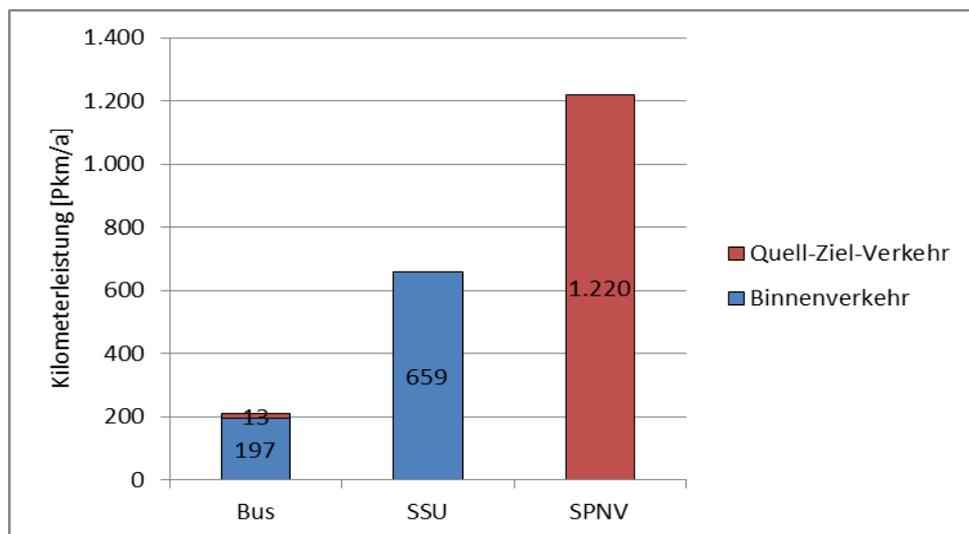


Abbildung 44: Verteilung der Personenkilometerleistung im Binnen- und Quell- Zielverkehr nach Verkehrsmittel des ÖPNVs, eigene Darstellung (IBP) auf Datengrundlage des (Institut für Energie und Umweltforschung, 2010).

<sup>5</sup> SSU steht im Bericht des Ifeu für Straßen und U-Bahn. Die S-Bahn wird im Schienenpersonennahverkehr (SPNV) eingeordnet.

### 3.5.3 Entwicklung der Verkehrsnachfrage im Straßengüterverkehr (Lkw & LNF)

Die Ermittlung der Ausgangssituation im Straßengüterverkehr beruht auf Datenbasis des CO<sub>2</sub>-Berichtsystems des Instituts für Energie und Umweltforschung aus dem Jahr 2010. Dabei wurden die Transportfahrzeuge in leichte Nutzfahrzeuge (LNF) und Lkw > 3,5 Tonnen unterteilt. Unter leichten Nutzfahrzeugen werden kleine Lieferwagen („Sprinter“) von Handwerkern aber auch Fahrzeuge von Dienstleistern wie beispielsweise Paketdiensten verstanden. Die Datenbasis weist für die Transportfahrzeuge im Jahr 2010 eine Kilometerfahrleistung von ca. 534 Mio. km aus. Diese verteilen sich zu 34 Prozent auf LNF und zu 66 Prozent auf Lkw > 3,5t. In Abbildung 45 wird die Gesamtkilometerleistung nach Verkehrsart und Transportmittel aufgegliedert dargestellt.

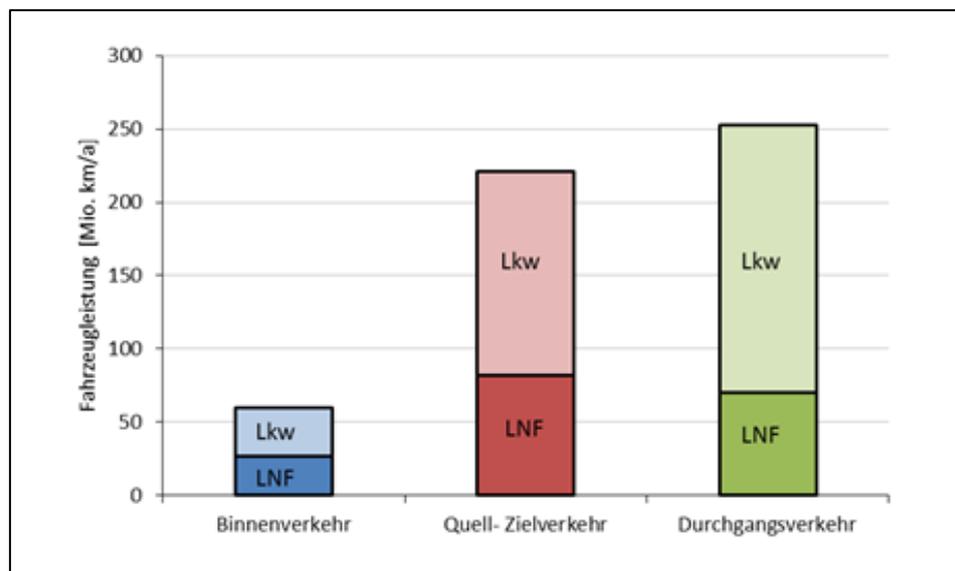


Abbildung 45: Aufschlüsselung der Fahrzeugkilometer nach Transportmittel und Verkehrsart, eigene Darstellung (IBP) auf Datenbasis (Institut für Energie und Umweltforschung, 2010)

Der Anteil an Transportstrecken im Binnenverkehr verteilt sich gleichmäßig auf die Transportmittel Lkw und LNF. Insgesamt entfielen im Jahr 2010 rund 11 Prozent der Gesamtkilometerleistung bzw. 60 Mio. Kilometer auf innerstädtische Transporte und Lieferungen. Weitere 221 Mio. km (42 Prozent) wurden durch den Quell- und Ziellieferverkehr zurückgelegt. Die Kilometerleistung leichter Nutzfahrzeuge ist mit 82 Mio. km deutlich geringer als die der Lkw (139 Mio. km). Der Durchgangsverkehr beansprucht rund 47 Prozent der Kilometer für sich. Auch hier liegt der Anteil von Lkw mit 34 Prozent bzw. 183 Mio. km deutlich oberhalb der Kilometerleistung der leichten Nutzfahrzeuge (70 Mio. km).

### 3.5.4 CO<sub>2</sub>-Bilanz des Verkehrssektors

#### *Motorisierter Individualverkehr (MIV)*

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen des MIV beliefen sich auf insgesamt 872.543 Tonnen (Institut für Energie und Umweltforschung, 2010). Diese verteilen sich nach Abbildung 46 auf die Verkehrsarten Binnen-, Quell-Ziel- und Durchgangsverkehr. Demnach sind rund 20 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen Verkehrsbewegungen mit Fahrtbeginn und -ende innerhalb Frankfurts geschuldet. Der Durchgangsverkehr (Fahrten, die weder in Frankfurt beginnen, noch dort enden) haben mit ca. 207.000 Tonnen einen Anteil in Höhe von rd. 24 Prozent. Mit ca. 492.000 Tonnen CO<sub>2</sub> (56 Prozent) hat der Pendlerverkehr (Fahrten die in Frankfurt beginnen und außerhalb enden (Quellverkehr/Auspendler) bzw. die in Frankfurt enden und außerhalb begannen (Zielverkehr/Einpendler)) den höchsten Anteil am CO<sub>2</sub>-Ausstoß des MIVs.

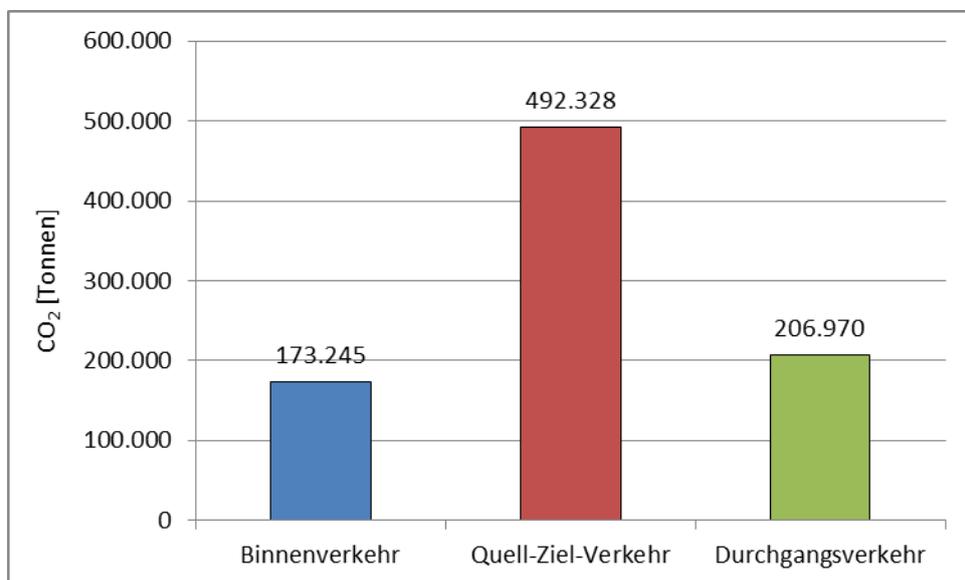


Abbildung 46: Verteilung CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Verkehrsart, eigene Darstellung (IBP) auf Datengrundlage des (Institut für Energie und Umweltforschung, 2010).

#### *Öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV)*

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen des ÖPNV betragen im Jahr 2010 rund 158.000 Tonnen. Diese verteilen sich nahe zu je 50 Prozent auf den Binnen- und Quell-/Zielverkehr. Dabei werden fast 100 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Quell-Ziel-Verkehrs durch den Schienennahverkehr (SPNV) verursacht. Lediglich knapp 1.000 Tonnen CO<sub>2</sub> sind dem Betrieb der Regionalbusse geschuldet. Die Emissionen des ÖPNV im Binnenverkehr dominieren SSU. Linienbusse haben mit rund 19.500 Tonnen CO<sub>2</sub> lediglich einen Anteil von 23,6 Prozent.

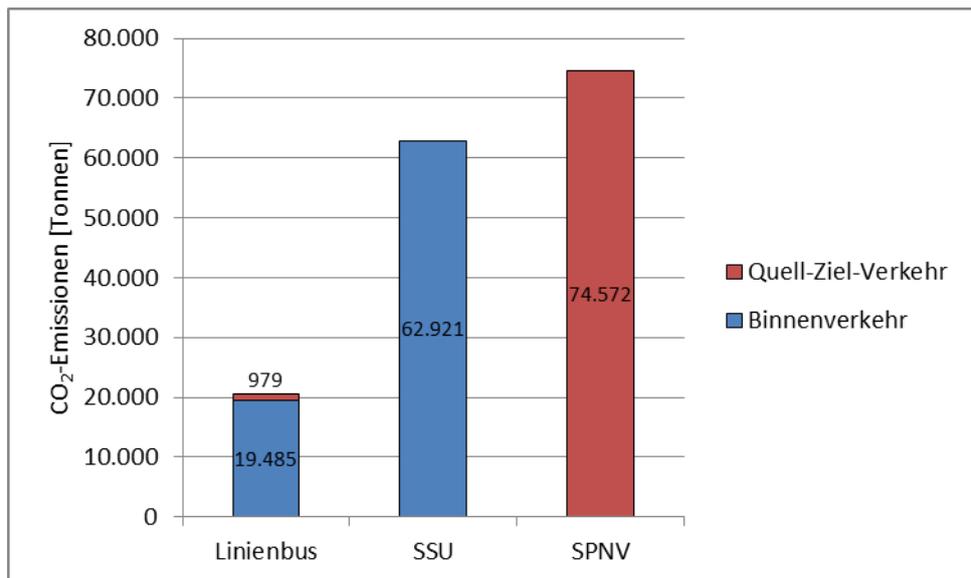


Abbildung 47: CO<sub>2</sub>-Emissionen des ÖPNV nach Verkehrsart, eigene Darstellung (IBP) nach (Institut für Energie und Umweltforschung, 2010).<sup>6</sup>

### *Straßengüterverkehr*

Der mit der Kilometerleistung im direkten zusammenhängende CO<sub>2</sub>-Ausstoß des Straßengüterverkehrs ist in Abbildung 48 dargestellt. Wie in den vorherigen Diagrammen wird auch hier nach Verkehrsart unterschieden. Insgesamt werden rund 345.000 Tonnen CO<sub>2</sub> durch den Transport- und Lieferverkehr in Frankfurt emittiert. Der Binnenliefer- und Transportverkehr verursacht lediglich rund zehn Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Dabei entfallen rund 8.885 Tonnen CO<sub>2</sub> auf leichte Nutzfahrzeuge und rund 26.683 Tonnen auf den Lkw-Verkehr. Dem Quell- und Zielverkehr werden rund 40 Prozent des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes zugeschrieben. Auch hier dominieren mit 112.392 Tonnen CO<sub>2</sub> die Lkw die Emissionen. Der dortige Anteil der Emissionen durch leichte Nutzfahrzeuge liegt auf vergleichbar hohem Niveau mit dem der Lkw im Binnenverkehr. Die höchsten CO<sub>2</sub>-Emissionen (50 Prozent bzw. 171.005 Tonnen) werden durch den Durchgangsverkehr verursacht. Dabei werden rund 23.035 Tonnen CO<sub>2</sub> durch die leichten Nutzfahrzeuge und ca. 147.970 Tonnen seitens der Lkw emittiert

<sup>6</sup> Derzeit bezieht die Verkehrsgesellschaft Frankfurt Strom aus dem Ökostromangebot der Mainova und aus dem Ausland. In den Berechnungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen des lfeu für SSU werden diese nicht berücksichtigt. Jedoch wird dem Anteil Mainova-Ökostrom in der Strombilanz Rechnung getragen.

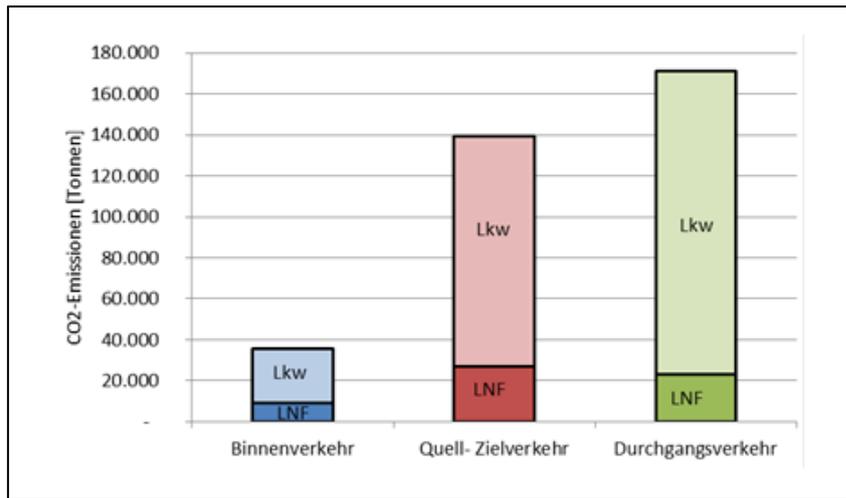


Abbildung 48: Aufschlüsselung der CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Transportmittel und Verkehrsart, eigene Darstellung (IBP) auf Datenbasis (Institut für Energie und Umweltforschung, 2010).

### Zusammenfassung

Lediglich 21 Prozent der Emissionen im Verkehrssektor werden durch den Binnenverkehr verursacht. Die restlichen 79 Prozent verteilen sich auf den Quell-/Ziel- (51 Prozent) und Durchgangsverkehr (28 Prozent) (Abbildung 49).

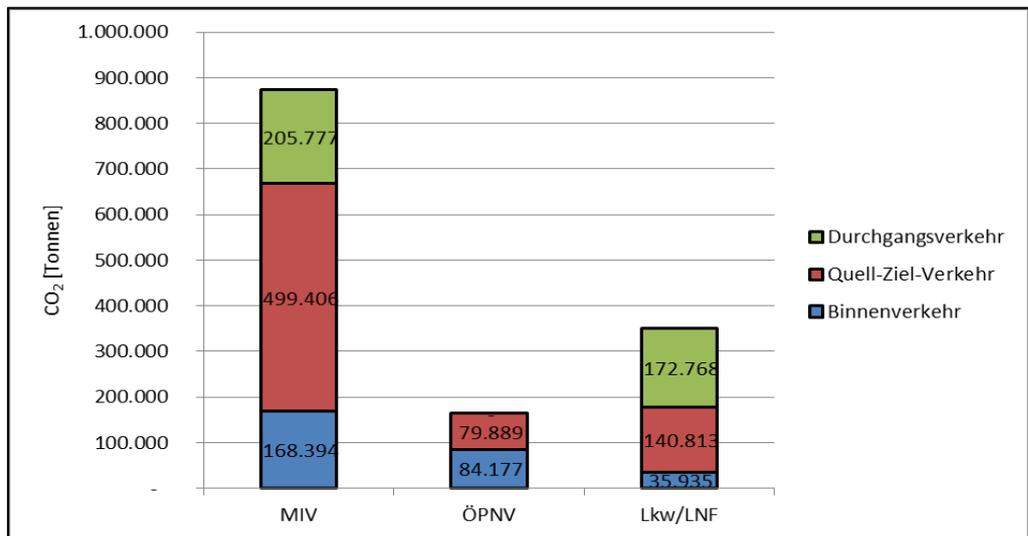


Abbildung 49: CO<sub>2</sub>-Bilanz für den Verkehrssektor nach Verkehrsmittel und Verkehrsart im Jahr 2010, eigene Darstellung (IBP) auf Datenbasis (Institut für Energie und Umweltforschung, 2010).

Insgesamt lag der CO<sub>2</sub>-Ausstoß des Verkehrssektors im Jahr 2010 bei rund 1.374.000 Tonnen. Dieser setzt sich wie folgt zusammen:

- MIV: 63,1 Prozent bzw. 873.000 tCO<sub>2</sub>
- ÖPNV: 11,6 Prozent bzw. 158.000tCO<sub>2</sub>
- LNF/Lkw: 25,3 Prozent bzw. 344.000 tCO<sub>2</sub>

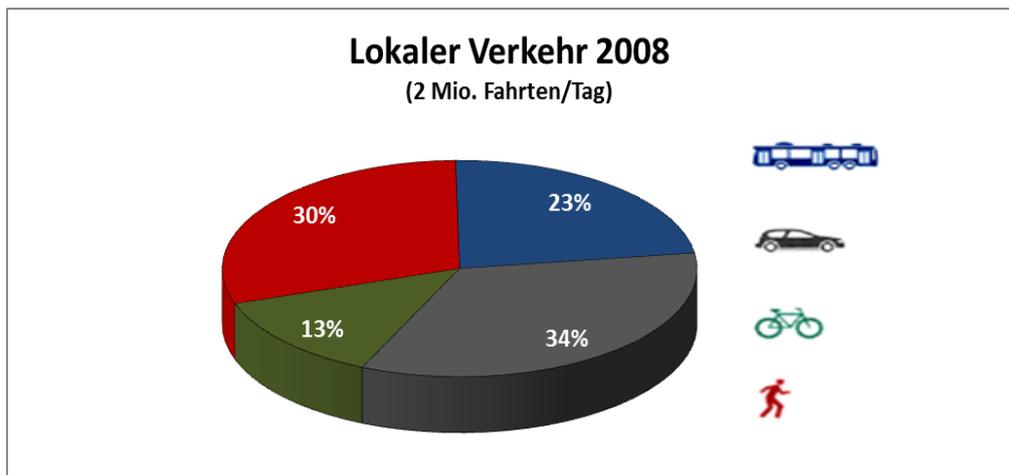
In Anbetracht des hohen Anteils an Emissionen (52 Prozent) durch den Quell- und Zielverkehr muss die Stadt Frankfurt passende Lösungen für den Umstieg der Pendler des MIV auf umweltfreundlichere Verkehrsmittel wie beispielsweise den ÖPNV weiter fördern.

Neben dem Quell- und Zielverkehr müssen auch für den Durchgangs- und Binnenverkehr neue Ansätze entwickelt werden. Für die Neugestaltung des Binnenverkehrs stehen schon heute in den Bereichen des MIV und ÖPNV viele Möglichkeiten zur Verbesserung der CO<sub>2</sub>-Bilanz zur Verfügung (siehe Kapitel „Maßnahmen“). Die Umstrukturierung des inner- und außerstädtischen Transport- und Lieferverkehrs erweist sich als eine größere Herausforderung. Die Weiterentwicklung und eine effizientere Strukturierung des Gütertransports sind für das Erreichen der Klimaziele notwendig. Ziel muss es sein, die gefahrenen Wegstrecken auf ein Minimum zu begrenzen bzw. zu vermeiden.

### 3.5.5 Modal Split der Ausgangslage

Der Modal Split im Personenverkehr wird oft als Indikator zur Bewertung der Umweltverträglichkeit des Mobilitätsaufkommens herangezogen. Durch den Modal Split wird die Verteilung des Transportaufkommens auf verschiedene Verkehrsmittel abgebildet.

In Abbildung 50 wird der auf der Basis unterschiedlicher Datenquellen abgeschätzte Modal Split des lokalen/innerstädtischen Verkehrs (Binnenverkehr) in Frankfurt<sup>7</sup> dargestellt. Insgesamt entfallen rund 34 Prozent der zwei Mio. durchgeführten Fahrten auf den motorisierten Individualverkehr (MIV). Der Anteil an Fahrten mit dem ÖPNV liegt in Frankfurt, ähnlich wie im Bundesdurchschnitt bei rund 23 Prozent. Rund 13 Prozent der Strecken an einem Tag werden mit dem Fahrrad zurückgelegt. Der Anteil an zurückgelegten Strecken zu Fuß liegt im Modal Split bei rund 30 Prozent.



<sup>7</sup> Gesamtanzahl an Wege und Fahrten des Binnenverkehrs werden aus dem Basisjahr 1998 der Fortschreibung des Gesamtverkehrsplans abgeleitet.

Abbildung 50: Modal Split des lokalen Verkehrs in Frankfurt 2008, eigene Darstellung (IBP) nach (Topp, Skoupil, Kuchler und Partner + Köhler und Taubmann GmbH, 2004) aktualisiert.

Im Vergleich zu anderen europäischen Städten vergleichbarer Größe wie Wien, Basel oder Helsinki verfügt Frankfurt schon heute über einen hohen Anteil an zurückgelegten Fußwegen. In der Nutzung des ÖPNVs hat Frankfurt im Vergleich zu Wien, Budapest, Turin, Helsinki oder Basel noch Nachholbedarf, siehe Abbildung 51 (Ahrens P. D.-A., 2013). Städte wie Wien und Budapest zeigen, dass ein Anteil um die 40 Prozent im Modal Split beim ÖPNV durchaus möglich ist. In Anbetracht des unterrepräsentierten Anteils an Fahrradfahrten in Frankfurt im Vergleich zu Städten wie Basel und Kopenhagen kann angenommen werden, dass hier noch erhebliches Potential besteht, einen Großteil des MIV auf den Fahrradsektor zu verlegen.

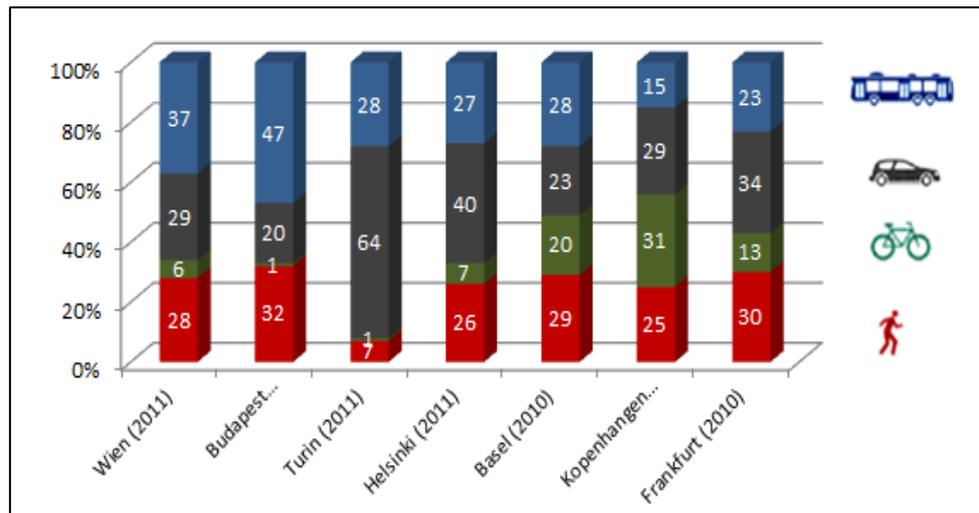


Abbildung 51: Modal Split europäischer Städte, eigene Darstellung (IBP) auf Datenbasis (Management, 2013).

Eine Besonderheit am Verkehrsaufkommen in Frankfurt ist der große Anteil an Pendlern. Im Jahr 2010 gab es rund 325.487 Ein- und 68.080 Auspendler, die täglich aus dem Umland nach/aus Frankfurt pendelten. Der Pendlersaldo im Jahr 2010 lag bei +257.407 Einpendlern. In Abbildung 52 werden die Ein- und Auspendlerströme von bzw. nach Frankfurt aufgezeigt (Regionalverband FrankfurtRheinMain, 2011).

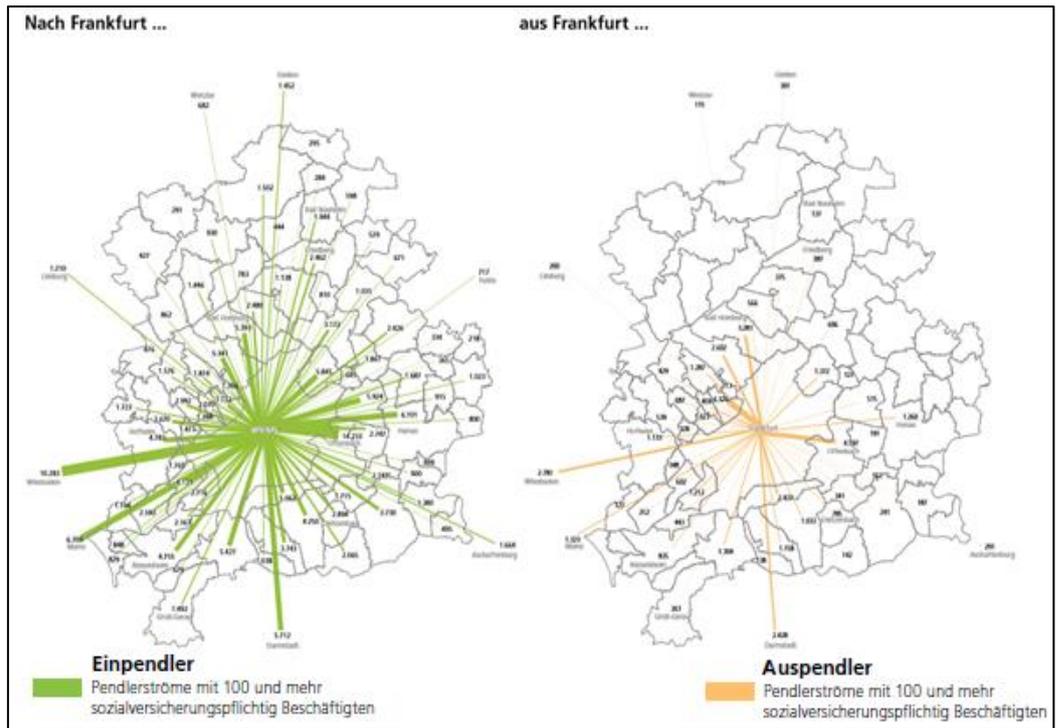


Abbildung 52: Herkunft bzw. Ziele der Ein- bzw. Auspendler im Jahr 2010, (Regionalverband FrankfurtRheinMain, 2011).

In Abbildung 53 wird der Modal Split für den Quell- und Zielverkehr<sup>8</sup> dargestellt. Demnach werden rund 82 Prozent der Personenverkehrswege zwischen der Stadt und dem Umland mit dem Pkw zurückgelegt. Lediglich 18 Prozent der Verkehrsteilnehmer nutzen das Angebot des ÖPNV.

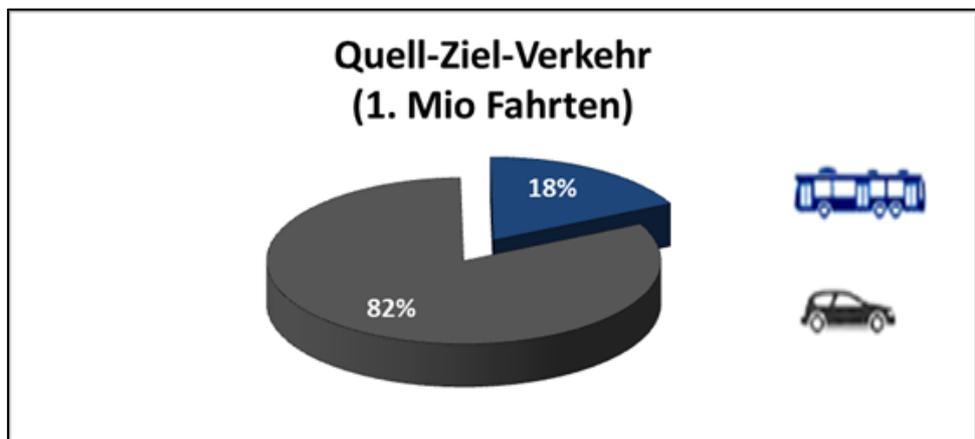


Abbildung 53: Modal Split des Zielverkehrs in Frankfurt am Main 2004, eigene Darstellung (IBP) auf Datenbasis von (Topp, Skoupil, Küchler und Partner + Köhler und Taubmann GmbH, 2004).

<sup>8</sup> Zielverkehr: Der zu untersuchende Verkehr hat seinen Beginn außerhalb der betrachteten Zelle und fährt in diese hinein.

Die durch den Stadt-Umland-Verkehr verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen betragen 2010 rund 568.000 Tonnen und damit rund 55 Prozent der Emissionen des MIV und ÖPNV bzw. 41 Prozent der Gesamtemissionen des Verkehrs in Frankfurt.

In Abbildung 54 ist die Verteilung der CO<sub>2</sub>-Emissionen des gesamten Verkehrssektors nach Verkehrsart abgebildet. Im Vergleich zu den oben genannten Zahlen wird neben dem MIV und dem ÖPNV der Straßengüterverkehr mit in die Betrachtung einbezogen.

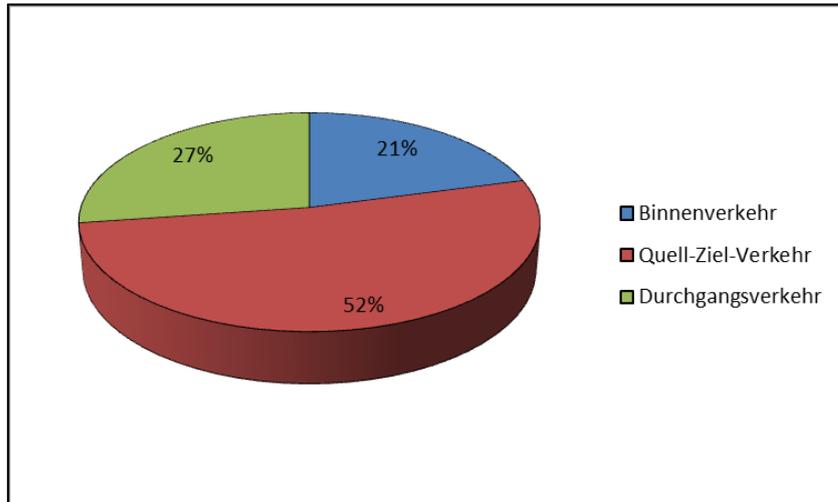


Abbildung 54: Verteilung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehrssektor nach Verkehrsart, eigene Darstellung (IBP) auf Datenbasis (Institut für Energie und Umweltforschung, 2010)

### 3.6 Beschreibung der Ausgangslage Abfall und Stoffkreisläufe

Neben der Energieversorgung einer Stadt wie Frankfurt am Main ist auch die Entsorgung der täglich anfallenden Abfälle ein bedeutendes Feld zum Weg einer energieeffizienten und ressourcenschonenden Stadt. Wie bei der Energieversorgung ist die Energieeffizienz und der sparsame Umgang und damit die Reduzierung der lokal anfallenden Abfälle der erste Ansatz zu einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft. So beschreibt auch das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) die Schonung der natürlichen Ressourcen und den Umgang mit Abfällen vor. Zudem hat ein von Anfang an reduzierter Umgang mit Abfällen, Einfluss auf andere Energiesektoren. Geringere Abfallmengen in Haushalten und Gewerbebetrieben führen zu einem geringeren Verkehr zur Abfallentsorgung und somit Energie. Weniger Abfall bedeutet auch einen geringeren Strom und Wärmebedarf für das Sortieren, Recyceln und Zusammenpressen von Abfällen. Zudem kann auch der Flächenbedarf den Abfall und seine Entsorgung verursacht minimiert werden.

#### 3.6.1 Abfallmengen in Frankfurt

In Frankfurt am Main werden durch Recycling und der energetischen Verwertung der nicht weiter verwerteten Abfälle die Stoffkreisläufe größtmöglich geschlossen. Durch eine bessere Abfallvermeidung und eine höhere Recyclingquote könnten die Abfallmengen in Frankfurt deutlich reduziert.

Auf Datengrundlage von 2013 ist in der nachfolgenden Abbildung 55 die Zuordnung aller verwertbaren Abfälle in Frankfurt dargestellt. Insgesamt waren rund 139.400 Tonnen Abfall zu recyceln. Den größten Anteil hat dabei das Papier mit 30 Prozent (Gew.-%). An geteilter zweiter Stelle stehen Sperrmüll und Biomüll mit jeweils 17 Prozent. Glas, Leichtverpackungen und Straßenkehricht/Laub verursachen jeweils rund zehn Prozent der verwertbaren Abfallmenge. Gering ist der mengenmäßige Anteil von Grünabfällen mit rund drei Prozent, Papierkorbinhalte mit einem Prozent, Textilien (1%), Metall (1%) und Elektroschrott (2%), obwohl an den letzten Beiden besonderes Interesse an hohen Rücklaufquoten besteht.

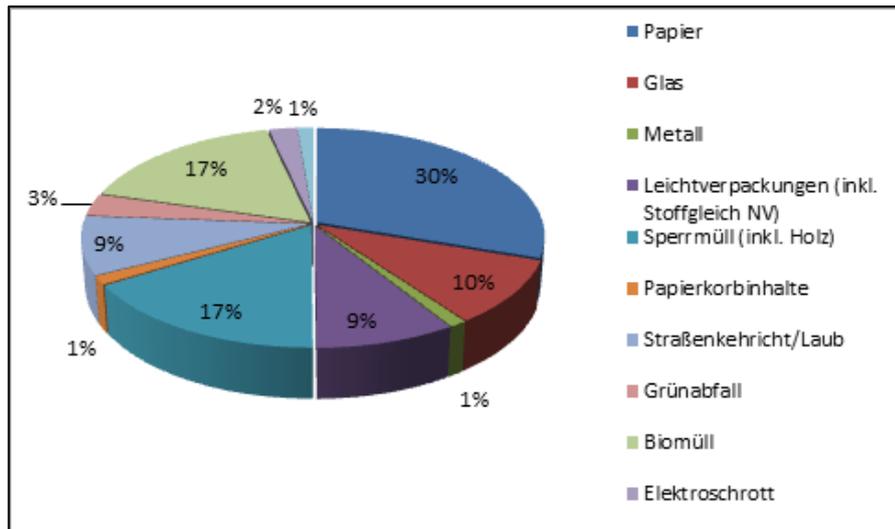


Abbildung 55: Aufteilung der recycelbaren Abfälle (139.393 t) in Frankfurt im Jahr 2013

Im Gegensatz zu den Verwertungsabfällen setzen sich die Beseitigungsabfälle im Jahr 2013 nur aus Hausmüll (156.314 t) und Kanalisationsrückständen (3.205 t) zusammen.

In Abbildung 56 wird deutlich, dass seit 1995 die jährliche Abfallmenge zur Beseitigung in Müllverbrennungsanlagen kontinuierlich abnimmt und sich gleichzeitig die Wiederverwertungsquote seit 1995 erhöht hat.

Der Vergleich vom Jahr 2000 zum Jahr 2013 zeigt, dass die Beseitigungsabfälle (Hausmüll) von 214.904 t auf 156.315 reduziert werden konnte und ebenfalls die Menge von Verwertungsabfällen etwas von 160.444 t auf 139.393 t abnahm. Die Verwertungsquote stieg dadurch von 40 % im Jahr 2000 auf 47 Prozent im Jahr 2007 und seitdem stagniert die Quote bei 47 Prozent.

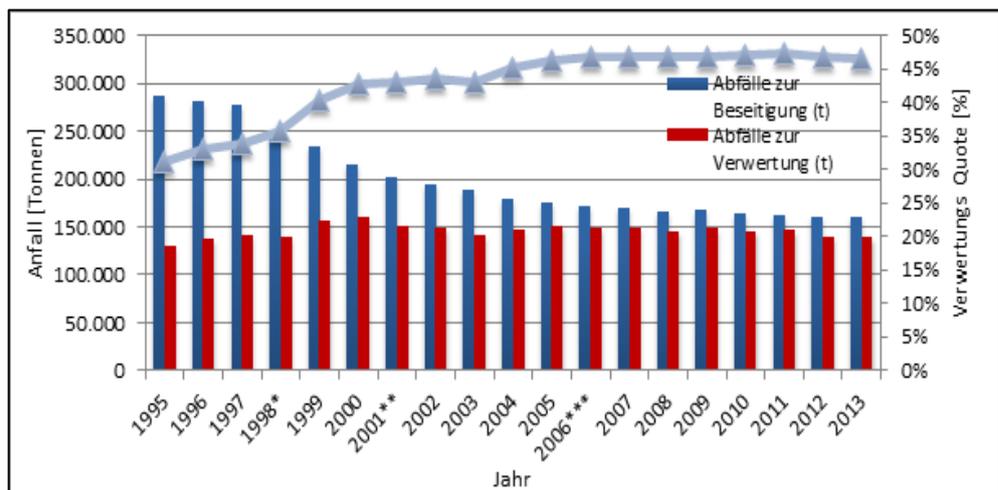


Abbildung 56: Entwicklung der Abfallmenge (1995 – 2013) zur Verwertung und Beseitigung, sowie die Verwertungs-Quote, Quelle: Frankfurter Entsorgung- und Service GmbH

Die Entwicklung der Pro-Kopf-Abfallmengenentwicklung zeigt Abbildung 57. Pro Einwohner ist wiederverwertbarer Müll von 521 kg im Jahr 2000 auf 406

gefallen. Ein Rückgang um 22 % seit 2000. Den größten Anteil am Abfallaufkommen hat jeweils immer der Restmüll, der komplett der thermischen Verwertung zugeführt wird.

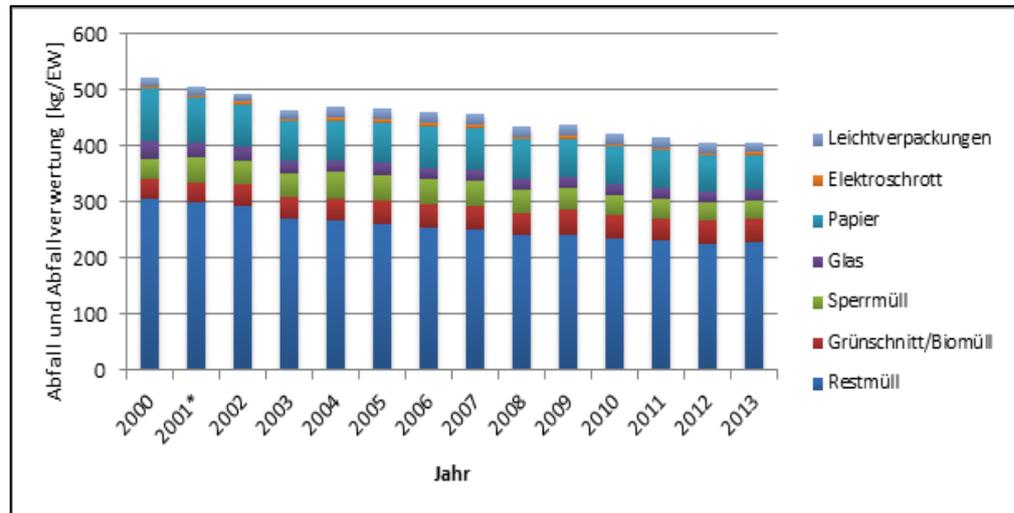


Abbildung 57: Zusammensetzung des Pro-Kopf-Abfallaufkommens zur Beseitigung und Verwertung in Frankfurt am Main von 2000 bis 2014

### 3.6.2 Bisherige Schritte zur weiteren Abfallbeseitigung der Stadt

#### Recycling

Bereits heute zeigt die stoffliche Verwertung von Glas, Papier und einer Vielzahl von Kunststoffen wie gut die hochtechnischen Anlagen zum Sortieren und Behandeln von Müll arbeiten. Ziel ist es, dass die Stoffe, die die Natur und den Menschen gefährden, nicht in die Umwelt gelangen und dass Wertstoffe gesammelt und wiederverwertet werden.

In Zukunft wird es zunehmend wichtig mehr Stoffe aus dem Abfall wieder in den Stoffkreislauf zurückzuführen. Das Beispiel Kupfer zeigt, dass heutzutage die Nachfrage nach Rohkupfer ohne Recycling nicht zu decken wäre.

Die direkte Wiederverwertung von Abfällen im Recyclingzentrum Frankfurt ist ein Beispiel für vorbildlichen Umweltschutz in Deutschland. Neben dem Sperrmüll werden Elektrogroßgeräte wie Waschmaschinen, Kühlschränke, Fernsehern und Computern getrennt eingesammelt. Die Geräte werden im Recyclingzentrum zunächst geprüft, gegebenenfalls repariert und an einkommensschwache Haushalte kostengünstig weiter verkauft. Das nicht reparaturfähige Material wird als Elektroschrott recycelt.

Auffallend gering ist der Anteil des Elektroschrotts an der Pro-Kopf-Abfallmenge (Vgl. Abbildung 57). Problematisch stellt sich die Beraubung der Elektro-Altgeräte dar, insbesondere bei Kühlschränken. Nur ungefähr die Hälfte der vom Bürger angemeldeten Elektro-Altgeräte steht bei der Abholung noch am Straßenrand [NOEX AG]. Bei der Beraubung werden überwiegend

die Kupferteile und Kompressoren gestohlen und das FCKW tritt aus. In ganz Deutschland werden etwa 480.000 Geräte von jährlich 3 Millionen Alt-Kühlschränken der Kompressor illegal und umweltschädlich entfernt. Zudem enthalten 2,4 Millionen von den 3 Millionen noch immer klimaschädliches FCKW, das ein 10.720-mal höheres Klimaerwärmungs-Potential als CO<sub>2</sub> hat. Dies bedeutet das beim illegalen Entfernen eines einzigen Kompressors werden pro Kühlschrank 1,4 t CO<sub>2</sub> Äquivalente freigesetzt (Deutsche Umwelthilfe, 2010).

Es besteht die Möglichkeit durch vermehrte Anti-Diebstahl-Kampagnen auf die Problematik von freigesetztem FCKW bei nicht-umweltgerechter Entsorgung von Alt-Kühlschränken aufmerksam zu machen. Weiterhin können die Bürger über Presseberichte, Plakate und Aufkleber sensibilisiert werden. Die Kommunen können durch vermehrte Kontrollaktionen bei E-Schrottsammlungen (auch durch die Exekutive) eine höhere Sammelquote erwarten und den Elektroschrott vor Beraubung schützen. Auch kann das Abholen aus der Wohnung statt sie vom Straßenrand einzusammeln helfen die Beraubung zu reduzieren.

#### Nutzung der Reststoffe

Ein großer Teil der Reststoffe bzw. Abfälle werden thermisch/elektrisch im Müllheizkraftwerk (MHKW) in Frankfurt am Main genutzt. Nach Angaben des Energieversorgers Mainova AG besitzt das MHKW eine elektrische Leistung von 46,5 MW und produzierte im Jahr 2012 rund 282 GWh elektrischen Strom und 342 GWh Wärme (siehe Kapitel Strom und Wärme). Jährlich werden im den von 2003 bis 2009 sanierten Müllheizkraftwerk Nordweststadt Hausmüll von 525.000 Tonnen thermisch verwertet (Mainova AG, 2014). Abfall ist damit hinter der Steinkohle und Erdgas der wichtigste Energieträger zur Energieversorgung der Stadt Frankfurt am Main. Künftig wird auch der Hausmüll aus dem Hochtaunuskreis, dem Maintaunuskreis und anderen Gemeinden des Rhein-Main-Gebietes im MHKW verbrannt. Das Kraftwerk versorgt den Stadtteil Nordweststadt und den Stadtteil „Am Riedberg“ mit Fernwärme. Abbildung 58 zeigt das Müllheizkraftwerk Nordweststadt in Frankfurt am Main.



Abbildung 58: Müllheizkraftwerk Nordweststadt, Quelle: Müllheizkraftwerk Frankfurt.

### Biogene Abfälle und deren Nutzung

Wie in Kapitel 3.4 des Masterplans beschrieben werden die biogenen Abfälle in Frankfurt größtenteils genutzt. Das Biomassekraftwerk in Fechenheim wird mit Grünschnitt und Holzabfällen der Stadt und Region versorgt. Neben diesem und weiteren Heizwärmeleistungswerken und BHKWS werden in der Bioabfallbehandlungsanlage sämtliche privaten und gewerblichen Bioabfälle für Komposterde und zur Biogaserzeugung verwertet.

### Erhöhung der Nutzungsdauer

Seit Anfang 2014 können sich Privatpersonen in einem Repair Café in Offenbach. Die international tätige Selbsthilfewerkstatt mit dem Namen Repair Café dient zur gemeinsamen Reparatur privater Gegenstände wie Fahrräder, Stühle, Spielzeug, Elektroartikel und sogar Kleidung. Freiwillige helfen mit Wissen, Werkzeug und handwerklichem Geschick. Die Repair-Bewegung will Müll vermeiden helfen und der Wegwerfgesellschaft etwas entgegensetzen. Im Januar soll ein zweites Repair Café in Frankfurt am Main mit dem Schwerpunkt Kleidung entstehen.

### Urban Mining und Handy-Recycling

Der Begriff „Urban Mining“ (städtischer Bergbau) gewinnt zunehmend an Bedeutung in der Gewinnung von Sekundärressourcen. Da künftig konventionelle Lagerstätten die Nachfrage von Rohstoffen immer weniger decken können, kommen Mülldeponien (Metalle, Kunststoffe, Holz), Klärschlämme (Phosphor) sowie Abfälle aus der Bauwirtschaft (Eisen, Kupfer, Holz, Mineralien) für die Rohstoffgewinnung infrage. Ein typisches Beispiel sind Sammelstellen für alte Mobiltelefone in der wertvolle Rohstoffe wie seltene Erden vorhanden sind. So werden mehr als 60 verschiedene Rohstoffe für die Produktion von Mobiltelefonen benötigt. Mit Kobalt, Gallium, Indium, Niob, Tantal, Wolfram und Platingruppenmetallen enthält ein Gerät allein sieben Stoffe, die im Jahr 2010 von der EU-Kommission als sogenannte „kritische Metalle“ eingestuft wurden und weltweit knapp werden (Informationszentrum Mobilfunk e.V. (IZMF), 2014).

In Frankfurt hat sich die deutsche Umwelthilfe ebenfalls dem Thema Handy-Recycling gewidmet. Die wertvollen Rohstoffe der Handys werden wiederverwertet und giftige Stoffe fachgerecht entsorgt. Als gutes Beispiel kann das Handy einsammeln in Schulen genannt werden. An drei Orten können die Mobiltelefone abgegeben werden:

- An der Pforte des Dienstgebäudes Bethmannstraße 3 oder
- beim Verein Umweltlernen in Frankfurt e.V. (Kurt-Schumacher-Straße 41) oder
- per Post mit dem Stichwort „Handy-Recycling“ an das Stadtschulamt / Umweltlernen in Frankfurt e.V., Seehofstraße 41, 60594 Frankfurt am Main, schicken.

Bei Abgabe zahlt die deutsche Umwelthilfe eine Prämie welches Umweltprojekt an Frankfurter Schulen zugutekommt.

## 4 Maßnahmen – Energieeinsparpotentiale und Einsatz von erneuerbaren Energien im Sektor Strom

### 4.1 Einleitung

Die Verfügbarkeit von elektrischem Strom wird heutzutage als Selbstverständlichkeit angesehen. Überall und ganzzzeitiglich wird Strom nachgefragt. Die Elektrifizierung, die Ende des 19. Jahrhunderts begann und in vielen Ländern der Welt noch anhält, ist heute ein elementarer Bestandteil unserer Gesellschaft. Zukünftig wird die Bedeutung des Stroms in allen Bereichen weiter steigen. Besonders in den Bereichen der Mobilität und der Wärmeversorgung wird Strom eine noch zentralere Rolle einnehmen. Die von der Bundesregierung erwünschte Elektromobilität und die Interaktion zwischen Strom- und Wärmemarkt erfordern, in Zusammenhang mit den Klimazielen der Bundesregierung, den Ausbau klimafreundlicher Stromerzeugungskapazitäten. Durch den Ausbau der erneuerbaren Energien insbesondere der Photovoltaik und der Windkraft kann eine nachhaltige Stromerzeugung in Deutschland geschaffen werden. Aufgrund der begrenzt zur Verfügung stehenden Potentiale muss dies jedoch durch ein Umdenken in der Nutzung von Strom in der Gesellschaft einhergehen.

Die fluktuierende Stromerzeugung aus Wind- und Sonnenenergie erfordert eine flexibilisierte Betriebsweise von Regelenergiekraftwerken auf Seiten der Erzeuger und/oder eine Orientierung der Verbraucher am Angebot (Lastmanagement). Damit nimmt die Kommunikation zwischen Erzeugung und Verbrauch eine zentrale Position in der zukünftigen Stromversorgung ein. Neben dem Aufbau eines „SmartGrid“ ist die Steigerung der Effizienz bei Stromanwendungen in den Sektoren Haushalten, GHD und Industrie ein weiterer Meilenstein auf dem Weg zu einer nachhaltigen und umweltfreundlichen Stromversorgung.

In den nachfolgenden Kapiteln werden Effizienzpotentiale und Einsatzmöglichkeiten von erneuerbaren Energien im Stromsektor aufgezeigt und bewertet. Dabei werden Stromeinsparmaßnahmen in den Sektoren Haushalt (HH), Gewerbe Handel und Dienstleistung (GHD) und Industrie vorgestellt. Die mit der Zeit steigende Bedeutung des Stroms im Verkehrssektor ist nicht Bestandteil dieses Kapitel, sondern wird im Kapitel „nachhaltiges Mobilitätskonzept“ ausführlich behandelt. Jedoch wird der zusätzliche Strombedarf im Verkehrssektor (Elektromobilität) wie auch im Wärmesektor (Wärmepumpen) in den Berechnungen der Szenarien bis 2050 berücksichtigt.

#### Bisherige Entwicklung

Seit mehr als zwanzig Jahren beschäftigt sich die Stadt Frankfurt am Main im Stromsektor mit dem Thema Energieeffizienz. Im Rahmen der von der Stadt geförderten lokalen Energiewende wurden eine Vielzahl an Projekten und Fördermaßnahmen umgesetzt. Der Austausch von alten ineffizienten Kühlschränken gegen neue stromsparende Geräte, Bürgersolaranlagen, der Ausbau der Kraftwärmekopplung (KWK), Aktionen wie „Frankfurt spart Strom“ und die Einweihung der Bürgerberatungsstelle „Energiepunkt“ sind nur einige Beispiele. Das Ergebnis der Anstrengungen spiegelt sich in dem von der deutschen Umwelthilfe e.V. (DUH) initiierten Wettbewerb „Bundeshauptstadt im Klimaschutz“ wieder. Im Jahr 2010 belegte Frankfurt hinter Freiburg den zweiten Platz in der Klasse über 100.000 Einwohner (Deutsche Umwelthilfe e.V., 2010). Damit konnte sich Frankfurt gegenüber 2006 um vier Plätze verbessern.

Energieeinsparpotentiale sind immer dann gegeben, wenn eine Anwendung ineffizient gestaltet ist. Ineffizienz bedeutet, dass der gleiche oder ein höherer Output mit einem geringeren Input erreicht werden kann. Demnach wird von einer Effizienzsteigerung gesprochen, wenn mit gleichem bzw. geringerem Einsatz ein höherer bzw. gleicher Output erzielt wird (Riesenbichler, Rene, 2009).

Es gibt verschiedene Ansätze Ineffizienzen in Anwendungen zu identifizieren. Im Sektor Haushalt sind Effizienzmissstände wesentlich leichter zu erkennen als in den anderen Sektoren. Allein der Vergleich von Verbrauchswerten von Geräten genügt, um einen Überblick über Ineffizienzen zu erhalten. Im produzierenden Gewerbe oder der Industrie ist es aufgrund zusammenhängender Prozesse deutlich schwieriger Effizienzlücken zu identifizieren. In diesen Sektoren können mit Hilfe von Energiemanagementsystemen Ineffizienzen erkannt und verbessert werden. Neben Ineffizienzen gibt es Stromverbräuche bzw. Leistungen die nicht zwingend erforderlich sind. Beispielsweise könnten Verluste durch den Standby-Betrieb oder ein eingeschaltetes Licht ohne dass sich jemand im Raum befindet als solche angesehen werden.

Strom hat mit rund 456 kg CO<sub>2</sub> (Stand 2010) und ein kgNO<sub>x</sub> pro MWh die relativ höchsten Emissionsfaktoren (Nitsch, 2012). Damit können durch eine Verbesserung der Effizienz bei strombasierten Anwendungen vergleichbar hohe Emissionseinsparungen erzielt werden.

In den nachfolgenden Abschnitten wird neben den möglichen Stromeinsparpotentialen im Sektor Haushalte auf die Substitution fossilen Stroms durch eine erhöhte Eigenstromnutzungsquote eingegangen. Weiter werden nach einer kurzen Beschreibung von Energiemanagementsystemen Einsparpotentiale in GHD Sektor, speziell für Bürogebäude, dem Handel, der Hotel- Restaurant- und Cafe- (HoReCa) und der IT-Branche sowie im Sektor Industrie insbesondere bei der chemischen Industrie beschrieben. Analog zum Haushaltssektor werden auch für diese Sektoren Maßnahmen zur Erhöhung der Eigenstromquote und der Lastmanagementmöglichkeiten dargestellt. Diese beiden weiteren Maßnahmen können dazu führen, einen erhöhten Anteil des selbst erzeugten Stroms durch beispielsweise Photovoltaik zu nutzen. Aufgrund einer

erhöhten Wirtschaftlichkeit durch die Eigennutzung werden Anreize gesetzt den Anteil regenerativer Erzeugung auszubauen.

Abschließend werden die Energieeinsparpotentiale für die Sektoren Haushalte, GHD und Industrie zusammengefasst und der Ausgangssituation gegenüber gestellt.

#### 4.2 Haushalte

Mit Plakat- und Flyer Werbung wirbt das Energiereferat Frankfurt in den Printmedien und auf der Website „Frankfurt spart Strom“ für das gleichnamige Förderprogramm. Das Förderprogramm der Stadt Frankfurt sieht vor, dass Haushalte für eine Stromeinsparung von zehn Prozent gegenüber dem Vorjahr eine Prämie von 20 Euro erhalten. Jede weitere eingesparte Kilowattstunde wird mit zehn Cent von der Stadt Frankfurt belohnt. Im Durchschnitt konnten im Jahr 2010 den Teilnehmern rund 70 Euro an Prämien, zusätzlich zu den Stromeinsparungen gut geschrieben werden. Insgesamt wurden durch die Aktion 230 Tonnen CO<sub>2</sub> und 500 kgNO<sub>x</sub> eingespart. Im Zeitraum von 2008 bis 2011 hatten sich rund 3.500 Teilnehmer angemeldet. Ein ähnliches Förderprogramm wurde für den Gewerbe Sektor aufgesetzt.

Der eClub ist eine weitere Anlaufstelle für Haushalte, die ihren Stromverbrauch bzw. –kosten senken möchten. Mitgliedern des eClub steht eine 12 monatige kostenlose Beratung durch zertifizierte Energieberater, die den Stromverbrauch analysieren und somit den Nutzer eine verbesserte Transparenz über die Verbrauchsstruktur liefern. Weiter erhalten Mitglieder des eClub Anwendungstipps für mehr Energieeffizienz im Alltag (Energieeffizientes Waschen, Kochen etc.). Neben der Beratung können Mitglieder durch Inanspruchnahme einer angebotenen Abwrackprämie für veraltete Kühlschränke direkt finanziell profitieren.



Abbildung 59: Logos der Frankfurter Stromsparförderprogramme „Frankfurt spart Strom!“ und „eClub – Energiesparen in Frankfurt“.

Darüber hinaus wurde gemeinsam mit der Mainova AG und dem örtlichen Fachhandel im Sommer 2010 eine „Abwrackprämie“ für 1.000 Kühlschränke in Höhe von 50 Euro pro Stück eingeführt (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2011).

Auf Basis der aktualisierten Zahlen des Instituts für Energie und Umwelt (Ifeu 2013) hat die Stadt Frankfurt den Stromverbrauch der Haushalte für das Jahr 2010 ermittelt. Demnach wurde von den Frankfurter Haushalten insgesamt rund 1.024 GWh Strom bezogen. Bei 362.525 Haushalten entfallen durchschnittlich 2.825 kWh auf einen Haushalt (Stadt Frankfurt, 2011). In Deutschland verteilt sich der Strombedarf von 141,7 TWh (BDEW, 2013) auf 40,2 Millionen Haushalten (Adolf & Bräuninger, 2012). Demzufolge liegt der spezifische Strombedarf eines Haushalts bei rund 3.507 kWh. Im Vergleich zum Bundesdurchschnitt ist der durchschnittlich spezifische Stromverbrauch pro Haushalt in Frankfurt um ca. 19 Prozent geringer. In Abbildung 60 werden die durchschnittlich spezifischen Stromverbräuche von Haushalten in Deutschland und Frankfurt gegenüber gestellt.



Abbildung 60: Vergleich des durchschnittlichen Stromverbrauchs pro HH von Deutschland mit Frankfurt, eigene Berechnung (IBP).

Die Ursache für den Unterschied kann anhand der vorliegenden Daten nicht zu 100 Prozent ermittelt werden. Es wird davon ausgegangen, dass es das Ergebnis aus einem Zusammenspiel der unten aufgeführten Argumente ist, das zu einem niedrigeren spezifischen Stromverbrauch in den Frankfurter Haushalten führt. Zum einen kann der Unterschied mit den angebotenen und von den Bürgern angenommenen Effizienzmaßnahmen durch die Stadt Frankfurt erklärt werden, zum anderen ist der niedrigere Verbrauch auf die kleinere Haushaltsgrößen (Einwohner/HH) und den damit verbundenen geringeren Ausstattungsgrad der Haushalte zurückzuführen. Weiter werden in kleineren Haushalten Anwendungen wie beispielsweise Waschen und Spülen weniger häufig bzw. im geringeren Umfang durchgeführt. Der Umstand, dass in Frankfurt viele Pendler, die zum Wochenende Auspendeln und somit nur fünf

Tage in Frankfurt verbringen leben hat Einfluss auf diesen unterdurchschnittlichen Wert.

### -Exkurs: Der Stromverbrauch eines Haushaltes-

Der durchschnittliche Frankfurter Haushalt lebt auf einer Wohnfläche von ca. 70 m<sup>2</sup> und wird von rund 1,81 Menschen bewohnt (Stadt Frankfurt, 2011). Der jährliche Stromverbrauch liegt bei 2.825 kWh. Die Aufteilung des Stromverbrauchs nach Anwendung wird in Abbildung 61 dargestellt. Für die Berechnung wurde der durchschnittliche Stromverbrauch eines Haushalts unter Berücksichtigung der Marktsättigung von Geräten berechnet. Demnach fallen Geräte mit geringer Marktdurchdringung wie z.B. Trockner und Gefriertruhen weniger ins Gewicht.

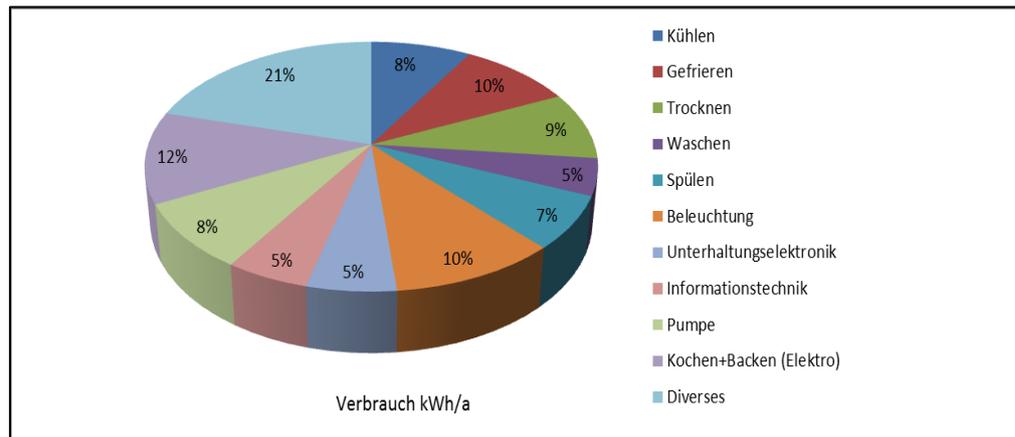


Abbildung 61: Stromverbrauch nach Anwendung im Haushalt, eigene Berechnung und Darstellung (IBP).

#### 4.2.1 Effizienzmaßnahmen Haushalte

Grundlage für die Ermittlung der Einsparpotentiale ist die Anzahl der Frankfurter Haushalte aus dem statistischen Jahrbuch der Stadt Frankfurt für das Jahr 2010. Aufgrund der Datenlage ist lediglich eine Abschätzung hinsichtlich der Verteilung der Haushaltsgeräte möglich. Als Grundlage für die Abschätzung wird die bundesweite Marktsättigung an verschiedenen Haushaltsgeräten nach (Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e.V., 2010) herangezogen. Der jährliche Strombedarf der Haushaltsgeräte wurde auf den Verbrauch eines Zweipersonenhaushalts angepasst. Die Differenz im Verbrauch aus den Durchschnittlichen und den derzeit am Markt zu Verfügung stehenden effizientesten Geräten (A+++) ergibt das Einsparpotential pro Haushaltsgerät (Stadtwerke Tübingen, 2010). Aus der Multiplikation der Einsparung pro Anwendung/Gerät mit dem Marktsättigungsgrad und der Anzahl der Haushalte wurden die Gesamteinsparungen einer Anwendung in Frankfurt berechnet. Vereinfachungshalber wurde angenommen, dass entgegen des Bundesdurchschnitts 100 Prozent der Kochherde und Backofen elektrisch sind. Die damit einhergehende Ungenauigkeit der Annahme ist so gering, sodass eine Vereinfachung hier sinnvoll erscheint. In Abbildung 62 werden die berechneten Gesamtstromeinsparungen nach Anwendungen aufgegliedert. Insgesamt kann durch den Einsatz neuester Technik der Stromverbrauch der Haushalte von 1.024 GWh auf 545 GWh reduziert werden.

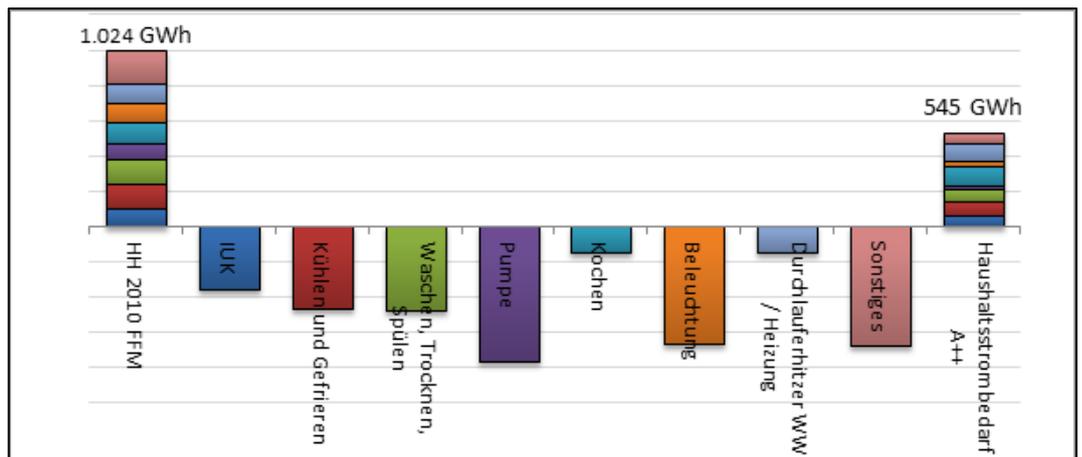


Abbildung 62: Gesamtstromeinsparungen nach Anwendungen im Haushaltssektor, eigene Darstellung (IBP).

### Wirtschaftlichkeit

Die Amortisationszeit von Austauschmaßnahmen veralteter Geräte durch neue Stromsparende ist abhängig vom Gerätetyp und der Nutzungsintensität. Ein Austausch macht ökonomisch nur dann Sinn, wenn die Refinanzierung über die Einsparungen innerhalb der Nutzungsdauer des Gerätes liegt. Damit sollte beispielsweise die Amortisation eines Kühlschranks nicht länger als 10 bis 15 Jahre dauern. Unter den nachfolgenden Link werden dem Verbraucher durch Eingabe der Produktdaten (Preis, Verbrauch) Amortisationszeiten für sämtliche Haushaltsgeräte berechnet.

<http://www.energiespar-rechner.de/berechnungen/haushalt/elektrogeraete/>

### Umweltwirkung

Der konsequente Austausch (ohne Rebound-Effekte = alter Kühlschrank läuft im Keller weiter) veralteter- gegen neue effiziente Haushaltsgeräte könnte zu Stromeinsparungen in Höhe von 479 GWh führen. Beim derzeitigen Strommix mit 456 grCO<sub>2</sub>/kWh könnten rund 220.000 Tonnen CO<sub>2</sub> eingespart werden.

### Best Practice

Stellvertretend für alle anderen Maßnahmen wird als Best Practice der Austausch der Heizungsumwälzpumpe in einen Einfamilienhaus beschrieben. Der Strombedarf einer Umwälzpumpe macht ca. fünf bis zehn Prozent des Gesamtstrombedarfs eines Haushalts aus. Durch den Austausch der veralteten Umwälzpumpe durch eine drehzahlgeregelte Hocheffizienzpumpe kann der Strombedarf um bis zu 80 Prozent reduziert werden. Die Amortisationszeit in Abhängigkeit des Strompreises beträgt hierbei zwischen drei und vier Jahren (EnergieAgentur NRW, 2013).

## **Maßnahme**

### Grafische Aufbereitung und TOP10-Effizienzlisten für Energiekostenabrechnungen

Zur besseren Übersicht des Strom- und Wärmeverbrauchs der einzelnen Haushalte wird als Maßnahme empfohlen, Energieversorger und Energiedienstleister (Techem) in die Pflicht zu nehmen, die Strom- bzw. Wärmeabrechnung grafisch aufzubereiten sowie einen Überblick des Verbrauches der vergangenen Jahre zu geben. Dadurch wird die Stromrechnung (im Falle des Heizwärmebedarfs die Heizkostenabrechnung) transparenter und für viele Kunden auf einen Blick verständlicher. Ein weiterer Bestandteil der Stromrechnung sollte auch die Darstellung typischer Stromverbraucher, wie in Abbildung 63 dargestellt, und deren typischen Kostenbestandteile eines durchschnittlichen Haushalts sein. Kunden können sich mit einem typischen durchschnittlichen Haushalt und deren fiktiv aufgelisteten Stromrechnung vergleichen. Außerdem kann eine grafische Darstellung der Bestandteile Preis- und Verbrauchssteigerung Aufschluss darüber geben, welche Anschaffungen neuer Stromverbraucher im Haushalt die eigenen Stromkosten steigen ließ.

Weiter könnte eine TOP 10 Effizienzmaßnahmenliste Bestandteil der Rechnung sein. Als Beispiel kann die EcoTopTen Liste für sparsame Geräte dienen. Weiter könnten Informationen über den eClub Frankfurt den Rechnungen beigefügt werden. Durch diesen Service können Kunden über die Stromrechnung beraten werden. Auch steigert dies das Image der lokalen Energieversorger in Frankfurt. Abbildung 1 zeigt eine Beispielliste von besonders effizienten Kühlschränken, deren Investitionskosten und jährlichen Stromkosten (Öko-Institut 2014). Mit der Umsetzung dieser Maßnahmen kann zu einem gewissen Grad die Zielsetzung (u.a. Erhöhung der Information und Motivation der Verbrauchern zur Endenergieeinsparung) der vom 04. Dezember 2012 verabschiedeten europäischen Richtlinie (2012/27/EU) kurz: EU-EnEff-RL ein

Stück Rechnung getragen werden.

EcoTopTen - Standgeräte mit Energieeffizienzklasse A+++										
Hersteller	Modell	Abmessungen in cm (Höhe x Breite x Tiefe)	Nutzzinhalt (Liter) Kühl- /Gefrierfach	Energieverbrauch (kWh pro Jahr)	Kaufpreis (UVP) <sup>1</sup> in Euro	Jährliche Stromkosten Euro pro Jahr <sup>2</sup>	Jährliche Gesamtkosten <sup>2</sup> Euro/Jahr	CO <sub>2</sub> -Ausstoß <sup>3</sup> (CO <sub>2</sub> -Äqui. Pro Jahr)	Sonstige Funktionen; Qualitätsurteil der Stiftung Warentest	
<b>EcoTopTen-Kühlschränke (Standgeräte A+++ 85 cm Höhe)</b>										
Liebherr	TP 1720	85x60x63	147/--	63 kWh	428 €	19 €	49 €	45	--	
Gorenje	R6093-AW/AX/ARD	85x60x60	156/--	63 kWh	456 €	18 €	51 €	45	--	
Liebherr	TP 1760	84x60x63	156/--	64 kWh	498 €	19 €	54 €	46	b	
Beko	TSE 1284 A+++	84x55x60	101/13	93 kWh	314 €	27 €	50 €	67	--	
Blomberg	TSM 1541 A+++	85x55x60	101/13	93 kWh	319 €	27 €	50 €	67	--	
Liebherr	TP 1434	85x55x63	108/14	93 kWh	399 €	27 €	56 €	67	--	
Bosch	KTL16PW42	85x60x61	116/16	95 kWh	450 €	28 €	60 €	68	b	

Abbildung 63: Beispieldarstellung der EcoTopTen Liste für Kühlschränke des Öko-Instituts, Quelle: ecotop-ten.de/prod\_kuehlen\_prod.php

Monatlich wechselnde EcoTopTen Listen für unterschiedliche Haushaltsgeräte macht die Stromrechnung für die Kunden interessant und gibt somit einen guten Überblick über am Markt erhältlichen energieeffizienten Produkten.

### Wirtschaftlichkeit/Finanzierung

Die Kosten können als gering eingeschätzt werden. Die grafische Darstellung der Rechnung ist mit wenigen Schritten automatisiert. Die Finanzierung würde bei den Energieversorgern liegen und den Service verbessern.

### Umweltverträglichkeit

Durch eine übersichtliche Darstellung und der Möglichkeit des Vergleiches mit einem durchschnittlichen Haushalt kann die Energieabrechnung transparenter und verständlicher gestaltet werden. Die zusätzliche Information durch die Stromrechnung kann insgesamt den Strombedarf der Haushalte um 5 bis 10 Prozent senken (eigene Einschätzung).

### Hemmnisse

Als eines der Haupthemmnisse für die Energieversorger ist wohl der zunehmende Umsatzrückgang durch die reduzierte Stromlieferung an energiesparende Kunden zu nennen. Jedoch sehen auch die Energieversorger neue Geschäftsfelder im Energiedienstleistungssektor wie Contracting und bauen diese entsprechend aus. Als weiteres Hemmnis sind die zusätzlichen Kosten bzw. der damit verbundene Aufwand zu nennen. Weiter müsste eine monatliche Abrechnung erfolgen, dieser Mehraufwand wird in der Regel gescheut. Digi-

tale Abrechnungen über eine webbasierte Plattform können jedoch den Mehraufwand reduzieren.

### **Maßnahme**

#### Erweiterung der Neubürgerberatung in Frankfurt

Frankfurt hat im Vergleich zu anderen deutschen Städten einen hohen Ver- und Zuzug der Bevölkerung, dadurch gibt es schon seit mehreren Jahren Neubürgerpaket mit ersten Informationen und Hilfestellungen. Für die hohe Anzahl neu gemeldeter Bewohner sollte ein erweitertes Informationspaket zu den bestehenden Energieberatungsmöglichkeiten in Richtung Energieeffizienz entwickelt und eine Liste von aktiven Energieberatern in Frankfurt hinzugefügt werden. Informationen speziell zu den Energie-, Klima- und Umweltschutzziele der Stadt Frankfurt, den laufenden Energieprojekten in der Stadt und den Möglichkeiten, sich selbst einzubringen (Vereine, Organisationen etc.) wären weitere interessante Punkte welche schon vorhanden und weitergeführt werden sollten.

Nach rund einem Jahr sollten die bis dahin vorliegenden Erkenntnisse über die Akzeptanz und den Einfluss auf das Nutzerverhalten ausgewertet und hinsichtlich des Kosten/Nutzenverhältnisses geprüft werden.

### **Wirtschaftlichkeit/Finanzierung**

Die Kosten sind mit mehreren Zehntausend Euro einzuschätzen. Die Finanzierung könnte die Stadt übernehmen.

### **Umweltverträglichkeit**

Inwieweit sich der Energieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen in Frankfurt durch weitere Beratungen reduzieren lassen, kann nicht beziffert werden.

### **Maßnahme**

#### Wettbewerb: „1.000 X 1.000 kWh Stromsparkampagne“

Parallel zu den oben beschriebenen Stromsparkampagnen „Frankfurt spart Strom“ und dem „eClub“ kann über die Einführung einer weiteren Stromsparkampagne „1.000 X 1.000 kWh Wettbewerb“ nachgedacht werden. Bei der 1.000 X 1.000 kWh Stromsparkampagne gilt es rund 1.000 Haushalte davon zu überzeugen, dass eine Stromeinsparung von rund 1.000 kWh pro Haushalt durchaus möglich ist. Die Kampagne richtet sich besonders an alle zwei bis vier Personen Haushalte. Neben kostenlosen Einsparungstipps durch den Energiepunkt können Prämien und eine Verlosung weitere Anreize schaffen. Die Kampagne sollte breit gestreut sein und via Webseite, während der Kampagne, die Ergebnisse der Stromverbräuche vor- und nach den umgesetzten Maßnahmen öffentlich aufzeigen. Die teilnehmenden Haushalte sollten die Möglichkeit bekommen ihren Stromverbrauch selber einzugeben. Während der Projektphase können die teilnehmenden Haushalte auf einen Blog /

Webseite ihre Maßnahmen kurz beschreiben und neue monatliche Stromverbrauchswerte angeben. Jeder Mitnutzer kann mitverfolgen in wie weit sich der Stromverbrauch durch diese Maßnahme reduziert hat. Hilfreich ist es einen Wettbewerb bzw. Contest zwischen den Haushalten zu schaffen, welcher natürlich anonym durchgeführt werden kann. Auch den nicht-teilnehmenden Besuchern der Webseite wird dargestellt, wie sich der Stromverbrauch reduziert hat und werden damit zum Mitwirken animiert. Als Projektteilnehmer wären die lokalen Energieversorger zu nennen, die dadurch ihren Service als Energiespardienstleister weiter ausbauen können. Als Prämie könnten mehrere Pedelecs, ÖPNV Jahreskarten oder ähnliches verlost werden.

### **Wirtschaftlichkeit/Finanzierung**

Die Kampagne könnte durch einen Effizienzfond gefördert werden. Die Kosteneinsparung läge bei einem Strompreis von rund 28ct/kWh (2014) und einem Ausgangsstromverbrauch von rund 2.000 kWh bei rund 280 Euro pro Haushalt und 280.000 Euro bei tausend teilnehmenden Haushalten. Mit diesem Geld könnten weitere erneuerbare Energieprojekte (PV-Anlage, KWK-Anlage, Solarthermie, Biomassekessel etc.) finanziert werden. Die Investition hätte wiederum eine gewisse Verzinsung des investierten Geldes für die teilnehmenden Haushalte. Auch diese Projekte und die Finanzierung sollten öffentlich transparent sein und mit Grafiken erläutert werden. Dies kann zu einer Kettenreaktion weiterer Beteiligten führen und zu einer Energiespar- und Finanzierungscommunity ausgebaut werden. Zu beachten ist jedoch auch, dass die Ausführung und Organisation eines solchen Wettbewerbs zeit- und kostenintensiv ist.

### **Umweltverträglichkeit**

Bei einem derzeitigen durchschnittlichen Stromverbrauch von rund 1.800 bis 2.000 kWh pro Haushalt in Frankfurt könnten so rund 1.000.000 kWh bzw. 1 Mio. kWh eingespart werden.

### **Hemmnisse**

Als Hemmnisse kann die nur einmal stattfindende Energiekostenabrechnung genannt werden. Eine monatliche Abrechnung kann die Transparenz des Stromverbrauchs wesentlich erhöhen.

### **Maßnahme**

#### Informationskampagne „100 % Klimaschutz Frankfurt“ an öffentlichen Gebäuden

Zur Verbreitung der Ziele des Masterplans können bestimmte Maßnahmen, Projekte und Szenarien grafisch aufbereitet und an öffentlichen Gebäuden als Plakate ausgehängt werden. Dadurch wird die Bevölkerung für die Themen Energie und insbesondere den Masterplan für Frankfurt sensibilisiert. Wech-

selnde Plakate zeigen die Maßnahmen die das Stadtbild von Frankfurt bis 2050 verändern. Plakate können auch so ausgelegt werden, dass diese die Bevölkerung partizipieren lassen. Dadurch fühlt sich die Bevölkerung als Teil des Masterplans 100 % Klimaschutz.

### **Wirtschaftlichkeit/Finanzierbarkeit**

Die Kosten zur Aufbereitung der Plakate können mit mehreren tausend bis zehntausend Euro als gering eingeschätzt werden. Die Finanzierung könnte die Stadt tragen. Weiter könnten „grüne“ Unternehmen, welche für ihre Produkte und Dienstleistungen werben, die Finanzierung über ein Sponsoring mittragen und somit die Kosten reduzieren.

### **Umweltverträglichkeit**

Durch die Informationskampagnen wird das Thema Klimaschutz, der derzeitige Energiebedarf und deren Kosten an fossilen Energieträgern greifbar, da ein Großteil der Bevölkerung kaum abschätzen kann, wie viel Energie in einer Stadt wie Frankfurt erzeugt und verbraucht wird. Auch die unterschiedlichen Maßnahmen zeigen, dass die Lösungen zu 100 % Klimaschutz vorhanden sind, es jedoch nur an der Umsetzung hapert. Eine genaue Energie- und CO<sub>2</sub>-Reduzierung kann nur schwer bemessen werden.

### **Maßnahme**

#### Beratung für Haushalte mit geringem Einkommen

Erfahrungsgemäß stehen Haushalten mit geringen Einkommen wenige Möglichkeiten zur konkreten Energieberatung zur Verfügung, da diese den aktiven Gang zu einer Beratungsstelle aus verschiedensten Gründen scheuen. Die in Frankfurt gegründete und mehrfach ausgezeichnete Beratung Caritas Energiesparservice sollte weiter verstärkt und ausgeweitet werden. Bisher haben rund 2600 Haushalte (Stand: März 2013) den kostenlosen Service in Anspruch genommen, dies macht rund zehn Prozent aller berechtigten Haushalte aus (Energiepunkt-Frankfurt.de).

Um das Interesse zu erhöhen, könnten Informationen in die unterschiedlichen Stadtteilzentren gebracht werden. Die mobile Beratung könnte in den jeweiligen Stadtteilen als erste Informationsquelle dienen. Günstige oder kostenlose Energiesparlampen, LEDs oder einfache Strommessgeräte sollten im Zuge der Veranstaltung vergünstigt den Interessierten angeboten werden. Zudem ist ein Flyer in mehreren Sprachen über mögliche Einsparpotentiale typischer Haushaltsgeräte (TV, Kaffeemaschine, Kühlschrank, etc.) zu empfehlen.

### **Wirtschaftlichkeit**

Die Kosten für eine intensive Beratung von Tür zu Tür sind kostenaufwendig und zeitintensiv. Kleine Informationsveranstaltungen in den einzelnen Bezirken reduziert die Kosten und können als erste Informationsquelle dienen.

### **Umweltverträglichkeit**

Nach der Evaluierung der Caritas konnten durch die Beratung in einem Haushalt rund 14 Prozent des Stroms und 8,5 Prozent der Heizenergie und des Warmwasser eingespart werden. Die durchschnittlich jährliche Ersparnis belief sich dabei auf 127 Euro Energiekosten und 252 Kilogramm Kohlendioxid - ein Gewinn für Haushaltskasse und Umwelt (Caritasverband Frankfurt).

## **Maßnahme**

### Ausbildung von Energieeinspar-Detektiven

Neben Bildungsangeboten zum Thema Umwelt in Lernwerkstätten an Schulen, stellt die „Ausbildung“ und Benennung von sogenannten Energieeinspar-Detektiven an Schulen einen weiteren Beitrag zur Sensitivitätsbildung für Energiethemen dar. Schüler im Alter von 10 bis 14 Jahren sind potentielle künftige Stromspardetektive. Durch Tagesworkshops zum Thema Energieverbrauch für Kinder und Jugendliche helfen diese den eigenen häuslichen Energieverbrauch aufzunehmen. Sie erhalten Informationen zu einfachen Maßnahmen (Austausch Lampen, Reduzierung des Standby-Stromverbrauchs durch Schalter). Als Anreiz könnten energiesparende LED Lampen oder ein Messkoffer dienen.

Es gibt inzwischen bereits ein Netz von Stromspardetektiven, dieses wird von verschiedenen Organisationen betreut (z.B. BUND, Stadtwerke etc.). Auch in Frankfurt gibt es schon bestehende Programme wie die Umweltbildung e.V.. Dadurch wurden seit Beginn bei den rund 100 Schulen ca. 3.500.000 Energiekosten gespart.

## **Wirtschaftlichkeit/Finanzierung**

Bisher konnten über 3,5 Mio. Euro an Energiekosten eingespart werden. Da die Einsparungen pro Jahr höher ist als der Aufwand, sollte das Umweltlernen ausgeweitet werden. Die Fortführung ist aus den Einsparungen zu finanzieren, neue Finanzierungsformen wie Crowdfunding können weitere Möglichkeiten bieten.

## **Umweltverträglichkeit**

Nach (Frankfurt.de) konnte der Energieverbrauch im Zeitraum von 1999 bis 2010 um 49.000 MWh reduziert und die CO<sub>2</sub> Emissionen um 21.000 t verringert werden.

## 4.2.2 Eigenstromlösungen

### **Maßnahmen**

#### Förderung von Demand-Side Management Ansätzen

Nach der erfolgreichen Umsetzung von Effizienzmaßnahmen steht eine erhöhte Nutzung erneuerbaren Stroms in den Mittelpunkt der Betrachtung. Durch den Ausbau und die Nutzung erneuerbarer Energien kann die Klimabilanz in Frankfurt weiter verbessert werden. In Abbildung 64 ist ein typisches

Standardlastprofil (H0) für einen Haushalt in Deutschland abgebildet. In einem Standardlastprofil wird die Last über Stundenwerten dargestellt. Zusätzlich wurde die stündliche Einstrahlung in  $\text{W}/\text{m}^2$  über die Zeit abgebildet.

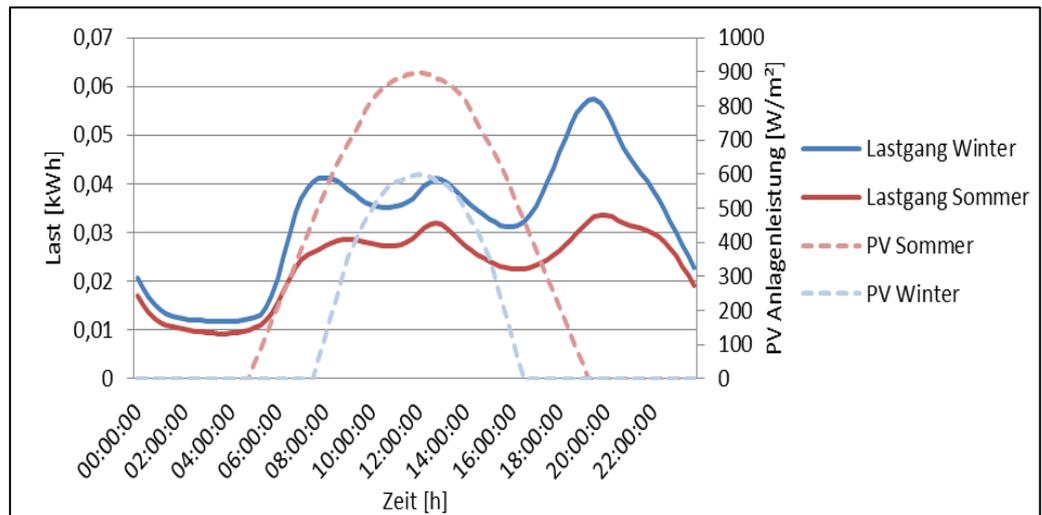


Abbildung 64: Einstrahlung und typischer Stromlastgang eines Haushalts im Sommer/Winter, eigene Darstellung (IBP).

Es wird deutlich, dass das Maximum der Einstrahlung (ca. 12 Uhr) verzögert zu den Lastprofilspitzen (ca. 19:00 Uhr) in den Haushalten auftritt.

Die installierte Photovoltaikleistung auf Gebäuden in Frankfurt am Main beläuft sich auf rund 22,6 MW (Stand Feb. 2014). Bisher galt die aus der Einspeisevergütung resultierende Rendite als Hauptmotiv für den Ausbau von PV Anlagen. Durch die sinkenden Herstellungs- und Installationskosten wird die Eigennutzung des auf dem Dach erzeugten Stroms auch ohne Förderung wirtschaftlich interessant. Die derzeitigen Stromgestehungskosten kleiner und mittlerer Anlagen liegen bei rund 12 bis 14 ct/kWh (Stand Anfang 2014). Damit sind die Gestehungskosten geringer als der Bezugspreis von Haushaltsstrom (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2014). Neu errichtete PV-Anlagen stellen somit bei einem höchstmöglichen Eigenstromverbrauchsanteil, die heute wirtschaftlichste Lösung dar. Durch die Kostendegression bei der Herstellung und der Installation konnten die Stromgestehungskosten binnen der letzten zehn Jahre um fast 60 Prozent gesenkt werden (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2014). Damit ist es für den Eigentümer von PV-Anlagen wirtschaftlicher den PV-Strom selbst zu nutzen, als aus dem öffentlichen Verteilnetz zu beziehen.

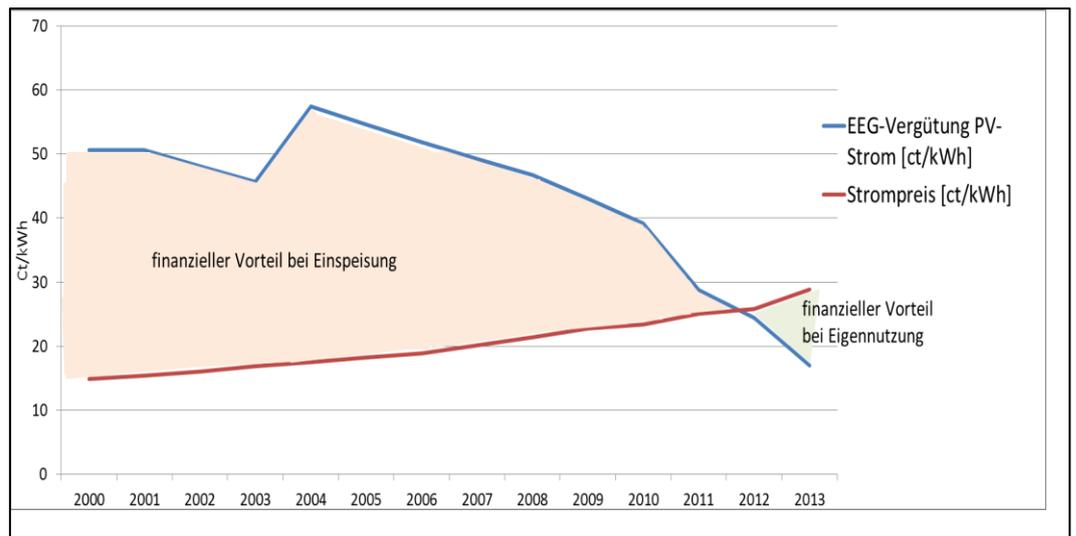


Abbildung 65: Entwicklung der Einspeisevergütung für Dach-PV-Anlagen < 10 kW vs. Entwicklung des Strompreises, eigene Darstellung (IBP).

Derzeit liegt die Eigenverbrauchsquote von PV-Strom ohne weitere Maßnahmen bei ca. 20-30 Prozent (Viessmann AG, 2013). Eine deutliche Steigerung der Eigenverbrauchsquote ist durch eine intelligente Steuerung der direkten Verbraucher (Smart Home) und/oder den Einsatz von Speichersystemen möglich. Die Verknüpfung von dezentralen Kapazitätsmärkten mit Netzlaststeuerung und Demand Side oder Demand Response Management Systemen und signalgesteuerten Handlungsoptionen aller Endverbraucher und intelligente Matchingsysteme wird in Verbindung von Laststeuerung und vertrieblichen Endkundenprodukten wesentliche Einspar- und Verlagerungseffekte ermöglichen (Mainova AG).

#### Direkte Verbraucher

Die Nutzung sogenannter „Home Manager“ oder auch handelsüblicher Zeitschaltuhren ist die einfachste Art den Eigenstromverbrauchsanteil zu erhöhen. Mit Hilfe des Steuerungssystems können strombasierte Anwendungen wie Waschen, Spülen und Trocknen auf Zeiten maximaler Stromeinspeisung verlagert werden. Hierbei ist stets die Vereinbarkeit mit den natürlichen Tagesabläufen (z.B. Waschen ist aufgrund der Geräuschbelästigung in der Nacht nicht möglich) zu achten.

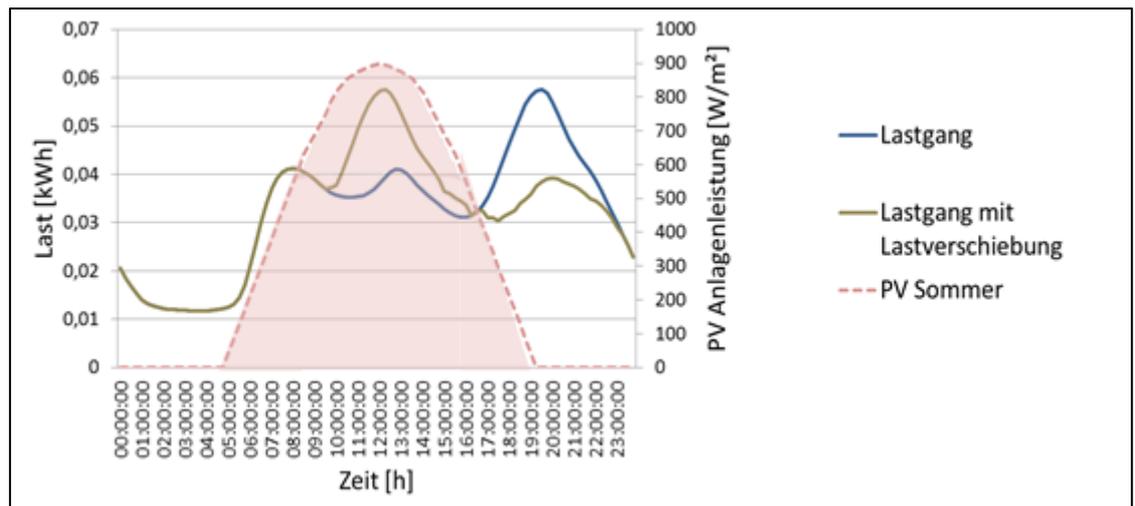


Abbildung 66: Lastspitzenverschiebung im Haushalt durch den Einsatz von „Home Manager“, eigene Darstellung (IBP).

In Abbildung 66 wird der Sachverhalt unter Berücksichtigung eines gezielten Lastmanagements dargestellt. Die Verbrauchsspitzen der Haushalte am Abend werden in die Mittagszeit verschoben, wenn die Einstrahlungswerte am höchsten sind. Durch ein dem Angebot angepasstes Nutzungsprofil kann die Eigenstromquote auf ca. 40 Prozent gesteigert werden (Viessmann AG, 2013). Insgesamt könnte das Lastverschiebungspotential bei den Haushalten (Annahme 100% Beteiligungsbereitschaft) durch die Optimierung mittels intelligenter Steuerung bzw. Smart Home Manager von rund 199 GWh (ohne Lastmanagement) auf 366 GWh erhöht werden. Es muss jedoch davon ausgegangen werden, dass eine hundertprozentige Beteiligung kaum realistisch ist. Durch den zuvor beschriebenen Ersatz von veralteten Haushaltsgeräten durch Stromsparende verringert sich das Lastverschiebungspotential auf 103 GWh (ohne Lastmanagement) bzw. 201 GWh (mit Lastmanagement).

#### Einsatz von Speichersystemen

Neben der Lastverschiebung ist als weitere technische Maßnahme, zur Erhöhung der Eigenstromquote, die Einbindung von elektrischen Speichern (z.B. Lithium-Ionen Batterien) in das Gesamtsystem zu nennen. Das derzeitige wirtschaftliche Optimum von elektrischen Speichern im Haushaltssektor zur Steigerung der Eigenstromquote wird auf rund 25 Prozent geschätzt (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2014).

Insgesamt ist ein Anstieg der Eigenstromquote auf ca. 70 Prozent möglich, wenn die oben beschriebenen Möglichkeiten allesamt umgesetzt werden. Durch den Einsatz von größeren Speichern könnte der Eigenverbrauchsanteil noch weiter erhöht werden.

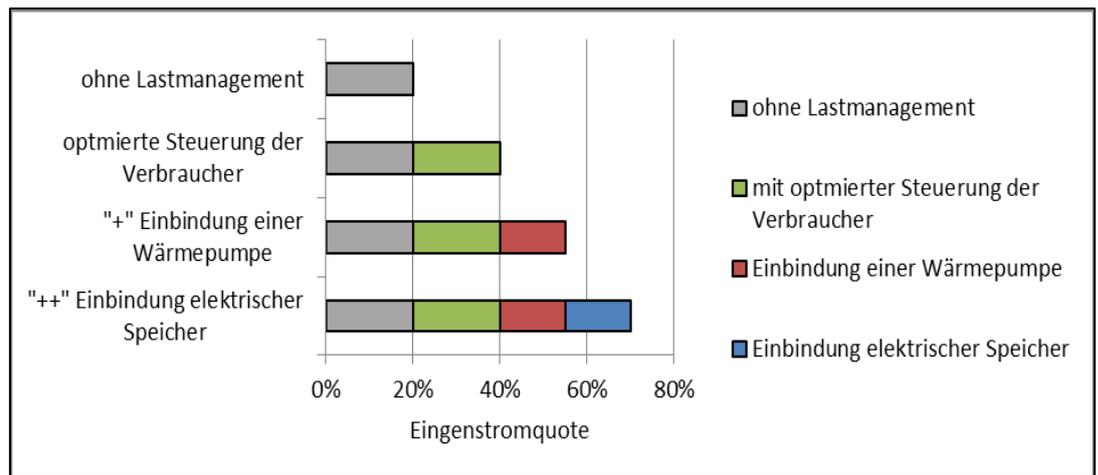


Abbildung 67: Maßnahmen zu Erhöhung der Eigenstromquote in Haushalten mit PV-Anlage durch Verbraucher, eigene Darstellung (IBP).

### Hemmnis

Als Hemmnis zum Ausbau der Eigenstromnutzung ist die Novellierung des EEG zum 01.08.2014 anzuführen. Vor der Novellierung des EEG waren PV-Anlagenbetreiber im Falle einer Eigenversorgung von der EEG-Umlage befreit. Nach der EEG-Novellierung von 2014 werden Eigenversorger nur teilweise von der EEG-Umlage befreit. Demnach müssen Eigenversorger künftig rund 30-40 Prozent (abhängig vom Jahr der Inbetriebnahme) der EEG-Umlage zahlen. Weiter entfällt das Grünstromprivileg, nach dem die EEG-Umlage um 2ct/kWh reduziert wurde, wenn der Stromverbraucher in unmittelbarer Nähe liegt. Eine Lösung wäre die Streichung der EEG Umlage auf den Eigenverbrauch.

**Best Practice:** Produktentwicklung der Mainova für Mieter in der Speicherstrasse

Die Mainova AG ist zusammen mit der ABGnova in Pilotprojekten wie der Speicherstrasse aktiv engagiert, modernste PV-Konzepte mit Mieterstromprodukten umzusetzen. Eine Unterzeichnung einer Absichtserklärung zu einer systematischen Produkt- und Projektentwicklung ist in Vorbereitung. Mainova wird hierzu standardisierte Angebote entwickeln und diese intensiv vertreiben. Mit diesen oder ähnlichen Produkten auf Basis von BHKW-Lösungen und Speichertechnologie wird die Mainova den Masterplan unterstützen und entscheidende Fortschritte bei der Zielerreichung beisteuern können (Mainova AG).

## 4.3 Gewerbe, Handel, Dienstleistung (GHD)

### Status Quo

Im Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistung wurden und werden analog zu den Haushalten Stromeffizienzmaßnahmen im Rahmen der Aktion „Frankfurt spart Strom“ durchgeführt. Förderfähig waren/sind Betriebe mit einer

Anzahl < 250 Mitarbeiter und einen Jahresumsatz von höchstens 50 Mio. Euro. Mit Hilfe des Förderprogramms konnte beispielsweise in Bockenheim der Stromverbrauch von neun Gewerbebetrieben um insgesamt 30 Prozent gesenkt werden (Unger, 2013).

In diesem Kapitel werden Stromeffizienzmaßnahmen für die Anwendungen Beleuchtung, mechanische Energie, Prozesskälte, Klimakälte und IKT im GHD Sektor vorgestellt. Auf mögliche Maßnahmen zur Verbesserung der Stromeffizienz für die Anwendung Prozesswärme wird aufgrund der derzeitigen und zukünftigen Bedeutung im GHD Sektor nicht eingegangen. Derzeit werden lediglich 3,5 Prozent des Stroms im GHD Sektor für die Erzeugung von Prozesswärme genutzt. Einen derzeit noch geringen Anteil am Stromverbrauch im GHD-Bereich hat die Anwendung Klimakälte. Anders als bei der Prozesswärme kann von einem starken Anstieg des Klimatisierungsbedarfs von Gebäuden aufgrund steigender Außentemperaturen (Klimawandel, Mikroklima) ausgegangen werden. Dieser Umstand muss in einer nachhaltigen Stadtplanung berücksichtigt werden. Vor dem Hintergrund der zukünftigen Bedeutung dieser Anwendung wird diese im Maßnahmenkatalog mit aufgenommen.

Die enge Verknüpfung der Anwendungen und die Heterogenität der Ausgangssituation lässt eine quantitative/qualitative Abschätzung der Einsparpotentiale analog zu den Haushalten nicht zu. Damit ist eine „Bottom-Up“ Hochrechnung der Einsparpotenziale auf Basis von „Best-Practice Beispielen“ für den GHD Sektor nicht möglich.

Die Abschätzung der Einsparpotenziale wird auf Grundlage der Studie „2050: 100% - Energieziel 2050: 100% Strom aus Erneuerbaren Energien“ des Umweltbundesamtes vorgenommen und bei der Entwicklung der Szenarien im späteren Kapitel aufgegriffen. In diesem Kapitel sollen lediglich Effizienzmaßnahmen in den oben genannten Anwendungsbereichen vorgestellt werden. Zudem werden zu jedem Anwendungsbereich eins bis zwei „Best-Practice“ Beispiele beschrieben.

Wie im obigen Kapitel erwähnt nehmen Rechenzentren in Frankfurt eine besondere Stellung ein. Aus diesem Grund werden Stromanwendungen in Rechenzentren und die dortigen Effizienzpotentiale separat dargestellt.

#### 4.3.1 Energieeffizienzmaßnahmen im GHD Sektor

##### **Maßnahme**

##### *Einsatz von hoch effizienten Leuchtmitteln und Tageslichtnutzung*

Der Stromverbrauch für die Anwendung „Beleuchtung“ liegt im Frankfurter GHD Sektor (exklusive Rechenzentren) bei ca. 911 GWh. Dabei sind es vor allem büroähnliche Betriebe, der Handel und öffentliche Liegenschaften wie Krankenhäuser, Schulen und Bäder, die als beleuchtungsintensive Verbraucher gelten. Der Anteil des Strombedarfs für Beleuchtungszwecke am Ge-

samtstromverbrauch im GHD-Sektor beträgt rund 38 Prozent. In jüngerer Vergangenheit standen des Öfteren Beleuchtungssysteme im Fokus von Effizienzmaßnahmen. Dennoch sind weitere Einsparpotentiale durch effizientere Beleuchtungstechniken und -systeme möglich. Abbildung 68 gibt eine Übersicht über den Leuchtmittelanteil in den Branchen Handel, Büro, HoReCa und Sonstige (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, 2011).

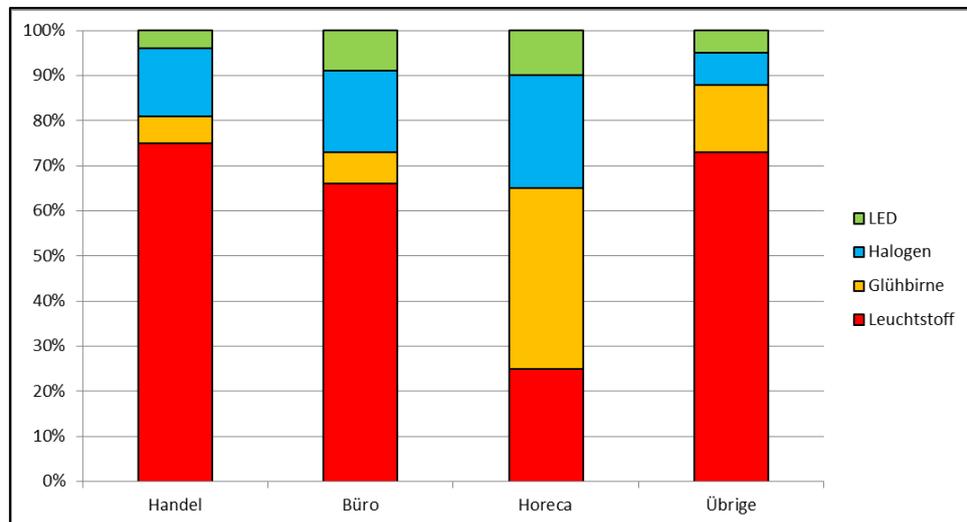


Abbildung 68: Verteilung der Leuchttypen nach Sektoren, (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, 2011).

Demnach beträgt der Anteil an Leuchtstoffröhren im Handel, Büro und Übrigen über 60 Prozent. Im HoReCa Sektor werden in den Hotelzimmern und Gästezimmern der Pensionen noch größten Teils Glühbirnen verwendet. Der Anteil an LED-Lampen liegt in allen vier Verbrauchergruppen zwischen drei und neun Prozent. Der derzeitige Bestand an Leuchten lässt auf ein enormes Einsparpotenzial schließen.

Neben dem Austausch der veralteten/ineffizienten Beleuchtung gegen Effiziente stellt die bessere Ausnutzung von Tageslichteinträgen eine Möglichkeit dar, den Strombedarf signifikant zu senken. In Kombination mit einem verbesserten Lichtmanagement können Einsparpotentiale von bis zu 75 Prozent erschlossen werden (Abbildung 69).

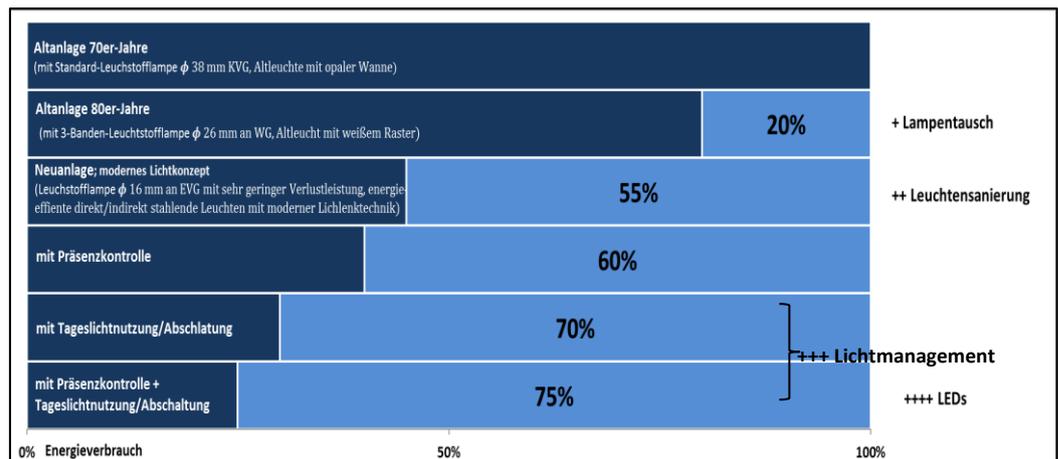


Abbildung 69: Einsparpotentiale bei der Innenbeleuchtung, eigene Darstellung (IBP) nach (ZVEI, 2012).

Als Maßnahmen zur Erhöhung der Tageslichtnutzung kann die Verwendung von Lichtlenkjalousien, die das Tageslicht in die Raumtiefe transportieren, ein breites Fensterband und wenn möglich die Nutzung von Oberlichtern genannt werden. Weiter ist auf den Einbau von Fensterscheiben mit geringem Gesamtenergiedurchlass (u-Wert) bei gleichzeitig hohem Lichttransmissionsgrad (g-Wert) zu achten. Gleichzeitig lassen sich durch Jalousien neben Beleuchtungseffekte auch solare Wärmeeinträge im Sommer vermieden (siehe Maßnahmenbeschreibung Kühlung). Zusätzlich können neben Maßnahmen, die direkt im Fenster bzw. außerhalb des Gebäudes ihre Anwendung finden, die Ausleuchtung im Raum durch innerräumliche Maßnahmen verbessert werden. Beispielsweise tragen weiße Fensterbänke zur Erhöhung der Reflexionsfähigkeit und eine helle Wand- und Bodenfarben zu einer verbesserten Raumausleuchtung bei. Bei der Planung von Neubauten sollte stets auf einen höchstmöglichen Ausnutzungsgrad des Tageslichts geachtet werden.

### Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit der oben beschriebenen Maßnahmen ist in den meisten Fällen positiv zu bewerten. Der Austausch von Glühlampen/Energiesparlampen durch LED-Leuchten ist zwar (noch) die teuerste Lösung. Eine Umsetzung der Maßnahme ist aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten nur dann sinnvoll, wenn der Strompreis entsprechend hoch und jährlich mehr als 4.000 Betriebsstunden gewährleistet sind, was im GHD Sektor die Regel ist. Es ergeben sich, trotz höherer Investitionskosten, für LEDs im Vergleich zu Energiesparlampen mit verlustarmen Vorschaltgeräten (VVG) bei 10.000 Betriebsstunden ein Kostenvorteil von rund 100 Euro<sup>9</sup> (Hellmann, 2012). Noch größer wird der Unterschied gegenüber Leuchtstoffröhren mit konventionellen Vorschaltgeräten im Ausgangsfall. Als groben Richtwert können durch den Austausch der Beleuchtung rund 30 – 60 Prozent der Energiekosten für Beleuchtung sowie der in-

<sup>9</sup> Strompreis von 25 Ct/kWh

ternen Lasten eingespart werden (Jakob, 2008). Mit steigenden Strompreisen und sinkenden Herstellungskosten reduzieren sich zukünftig die Herstellkosten von LEDs. Damit sind in naher Zukunft LED auch bei geringen Betriebsstunden eine ökonomische und ökologische Alternative. Andere Maßnahmen wie die Installation einer Präsenzkontrolle oder eine tageslichtabhängige Steuerung stellen aufgrund der geringeren Investitionskosten in den meisten Fällen eine wirtschaftliche Lösung mit Amortisationszeiten von meist unter zwei Jahren dar.

### **Best Practice**

#### *Rathaus Menden*

Im Rathaus von Menden konnte die Anschlussleistung um rund 63 Prozent bei verbesserter Lichtqualität reduziert werden. Gleichzeitig wurde der jährliche Energieverbrauch durch den Einsatz von elektronischen Vorschaltgeräten (EVG) und Lichtmanagement um 85 Prozent reduziert. Insgesamt können durch die effizientere Beleuchtung jährlich rund 24.000 Euro bzw. 83 Prozent der Kosten gegenüber der Ausgangssituation eingespart werden (ZVEI, 2012).

#### *Sporthalle FU Berlin*

In der Sporthalle der FU Berlin wurden 104 Rasterleuchten und ein Vorschaltgerät gegen 56 Spiegelrasterleuchten und ein elektronisches Vorschaltgerät inkl. Lichtmanagement ausgetauscht. Dadurch konnte der Energieeinsatz für Beleuchtungszwecke in der Halle um 35 Prozent gesenkt werden (ZVEI, 2012).

## **Maßnahme**

### Mechanische Energie: Einsatz von effizienten Motoren und Pumpen

Unter mechanischer Energie werden alle elektromotorischen Antriebe von Geräten wie beispielsweise Pumpen, Lüfter, Absauganlagen und Druckluftherzeugung zusammengefasst. Der jährliche Strombedarf für die Anwendung „mechanische Energie“ beträgt ca. 721 GWh in Frankfurt. Das entspricht ca. 30 Prozent des im GHD Sektor eingesetzten Stroms. Meist wird mechanische Energie in Betrieben des produzierenden Gewerbes wie beispielsweise Metzgereien und Bäckereien aber auch in der Hotelbranche eingesetzt.

Die Energieeinsparpotentiale im Bereich „mechanische Energie“ sind sehr heterogen. Theoretisch können Einsparpotentiale bei allen elektromotorischen Antrieben realisiert werden. Unabhängig vom angetriebenen Gerät sind die richtige Dimensionierung der Leistungsgröße und die bedarfsabhängige Steuerung des Motors grundlegend. Durch Antriebe mit einer veränderlichen Drehzahl (ASD) können nachteilige Teillastbetriebe (Einbrüche des Wirkungsgrades) vermieden werden.

## **Umweltauswirkung**

In Abhängigkeit der Leistung, Jahresdauer und Alter der bestehenden Pumpen bzw. Motoren kann durch den Einsatz hoch effizienter und geregelter Motoren die Energieeinsparung bis zu 60 Prozent betragen.

## **Wirtschaftlichkeit**

Der Austausch veralteter Motoren gegen neue Effiziente ist in den meisten Fällen aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten positiv zu bewerten. Meist beträgt die Amortisationszeit weniger als zwei Jahre. Je energieintensiver und je länger die jährliche Betriebsdauer der Anwendung im Teillastbereich desto kürzer ist die Amortisationszeit der Maßnahme (Siemens, 2009). Wie bei den anderen Maßnahmen verkürzt sich die Amortisationszeit zusätzlich durch den Anstieg des Strompreises.

## **Best Practice**

### *Effizientes Bier aus Pfungstadt*

In der südhessischen Pfungstädter Bierbrauerei wurden 2009 veraltete Pumpen der Kühlkreisläufe gegen neue Stromsparende ersetzt. Dadurch konnten jährlich rund 61 Prozent der Pumpenbetriebskosten (Stromkosten) eingespart werden. Die Maßnahme amortisierte sich innerhalb von fünf Monaten (co2 online gGmbH, 2013).

## **Maßnahme**

### Einsatz von Energiemanagementsystemen im GHD und Industrie Sektor

Mit Hilfe von Energiemanagementsystemen können Energieflüsse bzw. Energiekosten visualisiert, analysiert, gesteuert und somit Energieeffizienzmaßnahmen eingeleitet werden. Die Identifikation von energetischen Schwachstellen im System erfolgt durch die Bildung von Energieverbrauchskennzahlen (z.B.

Energieeinsatz pro Output-Einheit). Die Abteilung Energiemanagement im Hochbauamt von Frankfurt geht mit gutem Beispiel voran. Die Aufgaben der Abteilung liegen im Controlling, der Optimierung und der Maßnahmenentwicklung zum Einsparen von Strom, Heizenergie und Wasser in den rund 1.000 städtischen Liegenschaften. Seit dem Jahr 1990 konnte der Stromverbrauch trotz der vor allem im Bereich der IT rasant zunehmenden technischen Ausstattung im Schnitt um 8 % gesenkt werden. Der Heizenergieverbrauch sank in dieser Zeit um 38 %, der Wasserverbrauch sogar um 64 % und die Kohlendioxid-Emissionen um 32 % (Stadt Frankfurt am Main - Hochbauamt Energiemanagement, 2015).

In der DIN EN ISO 50001 oder VDI 4602/1 werden die Anforderungen an ein Unternehmen zur Einführung, Verwirklichung, Aufrechterhaltung und Verbesserung eines Energiemanagementsystems beschrieben. Hierbei kann das Prinzip des PDCA-Zyklus für die erfolgreiche Zertifizierung und Etablierung/Umsetzung von Energiemanagementsystemen hilfreich sein. Nach der Zertifizierung ist das Energiemanagement eher als ein Prozess zu verstehen, der langfristig und fest in die betrieblichen Abläufe integriert werden muss (Paul, 2012).

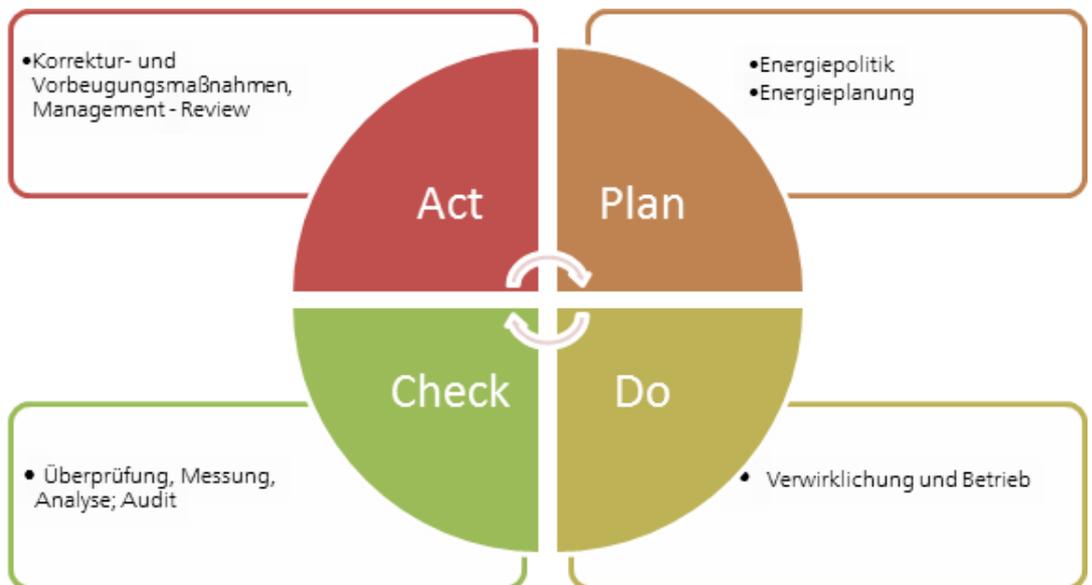


Abbildung 70: Ablaufschema des PDCA-Zyklus für die erfolgreiche Etablierung eines Energiemanagementsystems, eigene Darstellung (IBP).

In vielen Großbetrieben der Privatwirtschaft ist der Einsatz von Energiemanagementsystemen fester Bestandteil der Unternehmensstruktur.

Seit 2013 sind die Rückerstattung der Energiesteuer und der Spitzenlastausgleich nur noch für Unternehmen mit zertifiziertem Energiemanagementsystem möglich. Neben der Kosteneffizienz sind vor allem die Aufwertung des Betriebsimages und die Verbesserung der Wettbewerbschancen Gründe, sich die Einführung eines Energiemanagementsystems zu entscheiden. Weiter werden immer öfter konkrete Umweltauflagen und Anforderungen an Unternehmen als Voraussetzung für die Teilnahme an einer Ausschreibung vorge-

geben oder der Gesetzgeber im Rahmen der zukünftigen Umsetzung der Energiedienstleistungsrichtlinie die Einführung eines Energiemanagementsystems gesetzlich vorgibt.

Die nachfolgend beschriebenen Energieeinsparpotentiale können mit Hilfe eines funktionierenden Energiemanagement in Industrie und Gewerbe identifiziert werden. Die genaue Einsparung durch den Einsatz von Energiemanagementsystemen ist quantitativ nicht zu beziffern.

#### Kleine mittelständige Unternehmen (KMU)

Die Einführung von Energiemanagementsystem in kleinen mittelständigen Unternehmen erweist sich als schwierig. Meist fehlt es in den KMUs an Expertise, Zeit, Personal und dem Bewusstsein über die Wichtigkeit des Themas Energie im Betrieb. Trotz alledem wurde laut KfW-Mittelstandspanel in den letzten drei Jahren von jedem Dritten kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) eine Energieeffizienzmaßnahme durchgeführt. Bei KMUs mit mehr als 50 Mitarbeitern schätzen rund drei Viertel der befragten Unternehmen Energiemanagement als wichtig bzw. sehr wichtig ein. Dennoch wurden von rund zwei Dritteln der Mittelständler keine Effizienzmaßnahmen durchgeführt. 91 Prozent der nicht aktiven KMUs haben weniger als zehn Mitarbeiter. Insbesondere hier liegt ein ungenutztes Potential, das zu erschließen gilt (Kreditanstalt für Wiederaufbau KfW Bankengruppe, 2013).

Betriebe in denen die Installation eines Energiemanagementsystems in Anbetracht der Größe als unangemessen erscheint, müssen gezielte Energieberatungsangebote seitens zertifizierter Energieberater bzw. Contractor initiiert werden.

#### **Hemmnis**

Die Einführung von Energiemanagementsystemen ist insbesondere bei kleinen mittelständigen Unternehmen (KMU) oft schwierig. Häufig fehlt es diesen an Zeit und Personal für den Aufbau eines Energiemanagementsystems.

Um diesem Hemmnis zu begegnen müssen Anreize für kleine mittelständige Unternehmen geschaffen werden, ein Energiemanagementsystem zu etablieren. Vorstellbar wäre ein externer Dienstleister, der Energiemanagementsysteme einrichtet, sodass eine Zertifizierung des KMUs erfolgen kann. Der externe Dienstleister könnte seine Kosten über eine Form des Einsparcontractings refinanzieren. Dadurch entstehen dem KMU keine Kosten und der Contractor hat den Anreiz die maximal wirtschaftlich möglichen Einsparungen zu realisieren.

Als weiteres Hemmnis für die nicht Durchführung von Energieeffizienzmaßnahmen in KMU ist das bestehende Überangebot an Energieberatern zu nennen. KMUs sind oft mit diesem Überangebot überfordert.

Eine zielgerichtete Ansprache der KMUs in Form von Infoveranstaltungen für verschiedene Branchen seitens einer neutralen Institution (z.B. die Stadt) sowie die enge Zusammenarbeit der Stadt mit Energieberatern kann dazu bei-

tragen, das negativ behaftete Image des Themas „Energie“ für KMUs positiver darzustellen und als Chance zu verstehen.

## Maßnahmen

Unter Klimakälte wird das Kühlen, Befeuchten und Entlüften der Raumluft verstanden. Schon heute ist ein erhöhter Stromverbrauch für Klimatisierungszwecke in Büros und büroähnlichen Gebäuden zu verzeichnen. Es wird davon ausgegangen, dass in Zukunft der Stromverbrauch für Klimakälte insbesondere im Bürobereich weiter ansteigt. In Frankfurt werden für die Raumklimatisierung rund 26,7 GWh bzw. 1,5 Prozent des Stromverbrauches des GHDs verwendet. Die nachfolgend vorgestellten Maßnahmen sollen Wege zur Einsparung von Klimakälte aufzeigen.

### Kältevermeidung

Die günstigste und umweltfreundlichste Art Strom für „Klimakälte“ zu senken, ist die Vermeidung von Klimakälte. Im nachfolgenden werden auf die verschiedenen Möglichkeiten zur Vermeidung der Raumkälteerzeugung eingegangen.

## Begrünung der Dachfläche

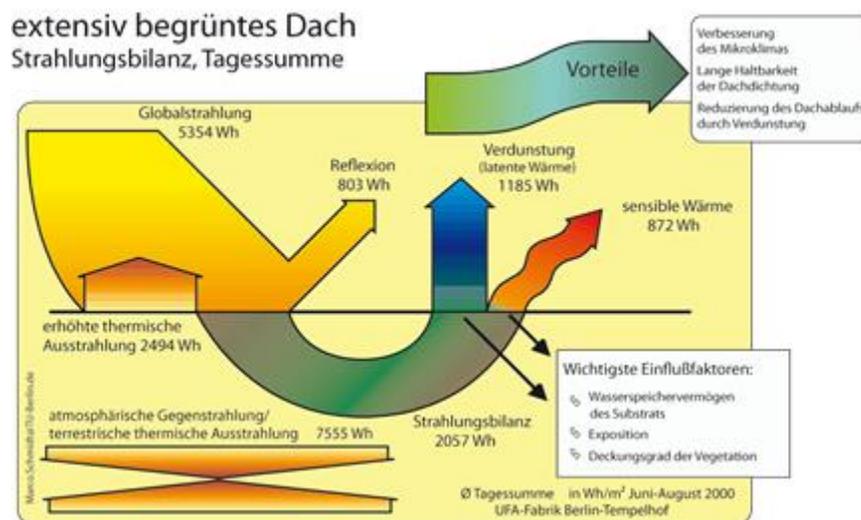


Abbildung 71: Strahlungsbilanz extensiv begrüntes Dach, (Berlin, Berlin, & Neubrandenburg, Gebäudekühlung.de).

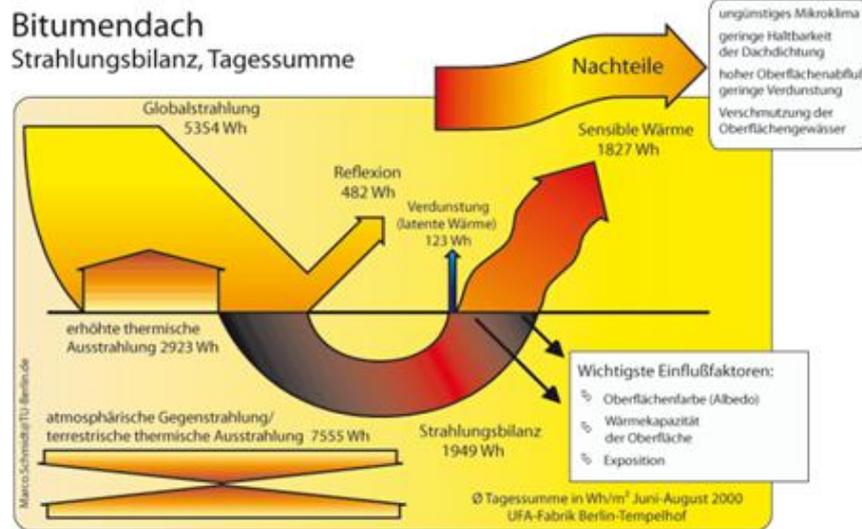


Abbildung 72: Strahlungsbilanz Bitumendach, (Berlin, Berlin, & Neubrandenburg, Gebäudekühlung.de).

Abbildung 71 und Abbildung 72 stellen anhand der Strahlungsbilanz dar, welche Vorteile ein begründetes Dach gegenüber einem üblichen Bitumendach aufweist. Neben einer erhöhten Reflexion der einkommenden Strahlung (803 Wh gegenüber 482 Wh) führt eine Begrünung dazu, dass ein wesentlich höherer Anteil der Wärme verdunstet kann (1185 Wh gegenüber 123 Wh). Folglich heizen sich Dach und letztendlich auch das Gebäude weniger auf. Die Begrünung der Dächer führt somit zu einer Reduzierung erhöhter Temperaturen bzw. des Mikroklimas in der Stadt und einem verbesserten sommerlichen Wärmeschutz. Am einfachsten ist die Begrünung von Fassaden und Dächern im Neubau. Aber auch eine Nachrüstung im Bestand ist möglich. Bei der Nachrüstung ist darauf zu achten, dass die zulässige Dachlast nicht überschritten wird.

### Energiesparende Geräte und Beleuchtung

Durch eine Optimierung der Energieeffizienz von Beleuchtung und Geräten kann im Büro- und Verwaltungsbau neben dem Strombedarf auch interne Wärmelasten im Gebäude reduziert werden. Diese Maßnahme stellt eher eine ergänzende Maßnahme in Kombination mit anderen Maßnahmen dar. Als alleinige Maßnahme wird die Reduktion der internen Einträge durch Geräte nicht zielführend sein. Sollte aber stets mit Betrachtet werden. Insbesondere im Einzelhandel führen interne Lasten zu erhöhtem Kühlbedarf im Sommer.

### Freie Nachtlüftung

Die freie Lüftung ist eine weitere Möglichkeit der passiven Gebäudekühlung. Durch nächtliche Belüftung mit einer Mindestluftwechselzahl von zwei, besser

vier<sup>10</sup> kann einer Überhitzung am Tag entgegengewirkt werden. Voraussetzung ist eine ausreichende Gebäudemasse als Speicher, sehr leichte Bauweisen sind weniger geeignet. Das Mikroklima um das Gebäude muss moderat sein. Gerade in Frankfurt ist dies problematisch (s. nächster Abschnitt). Nach (Pfafferott, 2013) sollte die Umgebungstemperatur für mindestens fünf Stunden pro Nacht unter 21°C sinken. Weiterhin sollte das Gebäude normale Anforderungen an die Luftqualität haben. Sind die Randbedingungen gegeben, kann in vielen Fällen durch eine Nachtlüftung im Büro- und Verwaltungsbau auf eine aktive Kühlung verzichtet werden (Pfafferott, 2013). Die Grenzen einer passiven Lüftung mittels Nachtlüftung liegen nach (Pfafferott, 2013) bei einem Kühlenergiebedarf von ca. 150 Wh/m<sup>2</sup>d.

### Städtisches Mikroklima

In einer Großstadt wie Frankfurt hat die Aufheizung der Stadt während des Sommers einen relevanten Einfluss auf den Kühlbedarf. Durch Vegetation, Baukörperstrukturen, zusätzliche Gebäudewärmequellen und Eigenschaften der Oberflächen wird das Mikroklima im relevanten Maß beeinflusst (Schneider A., 2013). Die Speicherung der solaren Strahlung in Gebäuden und versiegelten Flächen verhindert eine Nachtabkühlung. Weiter wird aufgrund der Bebauung der Luftaustausch mit dem Umland verhindert. Die höhere Luftverschmutzung verhindert die Abstrahlung von Hitze in die Atmosphäre. Wärmequellen wie Auto, Menschen und Gebäude bringen einen zusätzlichen Wärmeeintrag. Als Folge können in Städten unter ungünstigen Bedingungen städtische Wärmeinseln, die deutlich höhere sommerliche Temperaturen als das Umland haben, entstehen. Vor allem durch mehr Grün in Form von Parks, Bäumen, begrünten Dächer und Fassaden sowie Kaltluftschneisen in die Stadt kann der Überhitzung entgegengewirkt werden. Auch eine Minderung des Kfz-Verkehrs hilft die Temperaturen zu senken.

## **Wirtschaftlichkeit**

Der Einbau eines aktiven Kühlsystems erfordert hohe Investitionskosten sowie betriebsgebundene Kosten für die Wartung und verbrauchsgebundene Kosten für den Einsatz von Energie. Die hier vorgestellten passiven Maßnahmen erfordern fast ausschließlich Investitionskosten, betriebs- und verbrauchsgebundenen Kosten entfallen zumeist.

### Sonnenschutz

Der Einbau eines Sonnenschutzes ist eine einfache kostengünstige Maßnahme zur Vermeidung von aktiven Kühlsystemen. In (Bettgenhäuser, Boermans, Offermann, Krechting, & Becker, 2011) sind Gesamtkosten für exemplarische Büro- und Verwaltungsgebäude berechnet worden. Die berechneten jährli-

---

<sup>10</sup> Austausch des gesamten Raumvolumen innerhalb einer Stunde

chen Gesamtkosten für einen automatisieren externen Sonnenschutz liegen dabei bei 3,4 €/m<sup>2</sup>a für die Nachrüstung in einem Bürogebäude (GF 2466 m<sup>2</sup>) mit Lochfassade aus den 1960er Jahren. Für ein Gebäude mit Glasfassade liegen die Kosten bei acht Euro pro Quadratmeter im Jahr.

Eine Fassaden- und Dachbegrünung ist sehr spezifisch auf ein Gebäude abgestimmt und kann in der Ausführung stark variieren. Eine pauschale Kostenabschätzung ist schwer zu realisieren. Da eine Begrünung der Dachfläche ein ausreichend statisches Baugerüst erfordert ist diese Maßnahme nicht überall anzuwenden. Alternativ könnte über das Anstreichen der Dachflächen mit weißer Farbe nachdenken. Durch den sogenannten Albedo-Effekt (erhöhtes Reflektionsvermögen nicht selbstleuchtender Oberflächen) kann die Wärmeinstrahlung über das Dach gegenüber dunklen Dachflächen deutlich reduziert werden.

Energiesparende Geräte und Beleuchtung bewirken einen doppelten Kosteneffekt. Zum einen senken sie die Kühllast, zum anderen aber auch den Stromverbrauch des Gebäudes. Die Kosten und der Nutzen für diese Maßnahme hängen in großem Maß von der Nutzung und dem Grad der natürlichen Belichtung ab und sind schwer pauschal abzuschätzen.

Für eine manuelle freie Nachtlüftung fallen keine Kosten an, außer ggf. für eine zusätzliche Einbruchsicherung oder erhöhte Kosten für die Versicherung. Für eine automatische freie Nachtlüftung fallen zusätzlich Kosten für Motoren und Steuerung an. In (Bettgenhäuser, Boermans, Offermann, Krechting, & Becker, 2011) werden die Kosten für eine automatische freie Nachtlüftung für die Nachrüstung in einem Bürogebäude (GF 2466 m<sup>2</sup>) mit Lochfassade aus den 1960er Jahren mit 5,5 €/m<sup>2</sup>a angegeben.

### **Best Practice**

#### Humboldt-Universität in Berlin

An dem Physik-Institut der Humboldt-Universität in Berlin wurden innovative Maßnahmen zur Fassaden- und Dachbegrünung und Kühlung sowie zum dezentralen Regenwassermanagement realisiert. Die Fassade und das Dach sind extensiv begrünt. Die Begrünung wirkt an der Fassade zunächst als Sonnenschutz, der sich durch die Blätter der Pflanzen dem Jahresverlauf anpasst. Im Sommer ist die Fassade stark verschattet, im Winter lässt sie die Sonnenstrahlung durch. Weiterhin entsteht durch die Bewässerung der Pflanzen mit Regenwasser auf Fassade und Dach Verdunstungskälte, die zu einer Abkühlung und einer Verbesserung des Mikroklimas am Gebäude beiträgt. Nach (Berlin, Berlin, & Neubrandenburg) entspricht die Verdunstungsrate einer durchschnittlichen Kühlleistung von 157 kWh/d. Weiterhin erfolgt eine adiabate Abluftkühlung mit Regenwasser. Das Wasser wird in den Abluftstrom der Lüftungsanlage gesprüht. Mit der abgekühlten Abluft wird darauf folgend über einen Wärmetauscher die Zuluft vorgekühlt. Noch bei Außentemperaturen bis 30°C kann die Zuluft so auf 20-21°C abgekühlt werden. Abbildung 73 zeigt beispielhaft die begrünte Fassade dar.



Abbildung 73: begrünte Fassade Physik-Institut der Humboldt-Universität, (Berlin, Berlin, & Neubrandenburg, Institut für Physik in Berlin-Adlershof Stadtökologisches Modellvorhaben).

### Effiziente Kälteerzeugung

Vor dem Einsatz von aktiven Kühlsystemen sollte geprüft werden, ob eine ausreichende Kühlung nicht auch über die zunächst vorgestellten passiven Systeme, die keinen Energieaufwand für die Kühlung benötigen, erfolgen kann. Die passiven Maßnahmen können auch durch aktive Kühlsysteme ergänzt werden, um Lastspitzen abzudecken und feste Raumkonditionen realisieren zu können.

### Mechanische Nachtlüftung

Neben der im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten freien Nachtkühlung kann auch eine mechanische Nachtlüftung über eine Lüftungsanlage erfolgen. Falls ein Öffnen der Fenster nicht möglich ist oder der durch Temperaturunterschied und Luftdruck stattfindende Luftwechsel nicht ausreicht, kann statt der freien Nachtlüftung eine mechanische Nachtlüftung über eine Lüftungsanlage realisiert werden. Durch den Einbau der Lüftungsanlage kann dieses Konzept auch mit einer adiabaten Kühlung oder Erdwärmetauschern am Tag kombiniert werden.

### Erdwärmetauscher und Grundwasserkühlung

Eine passive Kühlung kann auch mittels Erdwärmetauscher oder Grundwassernutzung erfolgen. Dabei werden die konstant niedrigen Temperaturen im Erdreich ausgenutzt um Wasser vor zu kühlen und mittels Betonkernaktivierung oder Kühlsegeln in den Raum einzubringen. Eine Betonkernaktivierung lässt sich zumeist nur im Neubau realisieren, während ein Kühlsegel auch im Bestand nachgerüstet werden kann. Dabei erlauben die niedrigen Vorlauftemperaturen eine hohe Kühlleistung.

Ist eine passive Kühlung nicht ausreichend, muss auf aktive Kühlsysteme zurückgegriffen werden. Dies ist vor allem bei Kühlung von Fertigungsprozessen, Kühlhäusern, Serverräumen und Räume mit speziellen festen Raumkonditionen wie z.B. Operationssälen der Fall.

### Sanierung ineffizienter Lüftungssysteme mit Kompressionskältemaschinen

Kompressionskältemaschinen sind mit ca. 90Prozent der Anlagen das am häufigsten anzutreffende Kühlsystem. Im Vergleich zu den anderen vorgestellten

Technologien ist ihr Energiebedarf mit Abstand am höchsten. Oft kann schon eine Optimierung der Regelungstechnik zu großen Energieeinsparungen führen. Weiterhin sollten ineffiziente Anlagenteile wie Kompressoren, Ventilatoren und Pumpen ausgetauscht werden (siehe mechanische Energie, S.77). Erhebliche Energieeinsparpotentiale ergeben sich zusätzlich durch Maßnahmen wie die Verringerung der Luftgeschwindigkeiten im Kanalnetz, die Vermeidung der Möglichkeit von gleichzeitigem Heizen und Kühlen, die Vermeidung von Leckagen im Lüftungssystem, das Dämmen der Kälteleitungen und einer Standortüberprüfung der Rückkühlwerke (Lage im Schatten).

Zusätzlich sollte aber zunächst vor allem der Kühlkältebedarf durch die vorgestellten Maßnahmen so weit wie möglich reduziert werden. Im Hinblick auf die Umweltverträglichkeit sollten natürliche Ersatzkältemittel wie Ammoniak, Wasser oder CO<sub>2</sub> bevorzugt werden. Um die Energieeffizienz zu steigern, sollte auch eine Wärmerückgewinnung aus dem Kältemittel nach Austritt aus dem Verdichter für die Warmwasserbereitung berücksichtigt werden. Dabei sind mittlere Warmwassertemperaturen von bis zu 60°C zu erzielen. Weiter stellt der Einsatz von Solarstrom zum Antrieb der Kompressionskältemaschine eine Möglichkeit des nachhaltigeren Betriebs dar.

#### Einsatz von Absorptionskältemaschinen

Absorptionskältemaschinen nutzen statt mechanischen Verdichtern thermische Verdichter und bieten damit die Möglichkeit, Abwärme auf einem hohen Temperaturniveau für die Kühlung einzusetzen. Dafür bietet sich Prozesswärme, Abwärme aus BHKWs oder auch Solarwärme (solare Kühlung) an. Aufgrund der Gleichzeitigkeit beim Auftreten von Kühlbedarf und solarer Einstrahlung bietet sich eine solare Kühlung für die Klimatisierung der Innenräume an. Die Vorteile von Absorptionskältemaschinen liegen im geringeren Wartungsaufwand, der längeren Lebensdauer und der geringeren Geräuschemissionen, dem Einsatz von umweltschonenden Kältemitteln, einer möglichen stufenlosen Regelung bis zehn Prozent der Leistung ohne wesentliche Verluste und im geringeren Einsatz elektrischer Energie. Insbesondere kann Wärme aus Fernwärme auch im Sommer zur Kühlung verwendet werden. Hier ist darauf zu achten, dass dort Wärme und Kälte aus einer Erzeugung genutzt werden kann. Es bleibt zu berücksichtigen, dass gerade in den Sommermonaten die Fernwärmenetztemperatur abgesenkt wird. Dadurch müsste eine Erhöhung der Netztemperatur vor Ort für den Einsatz von Absorptionskältemaschinen durch beispielsweise Heizstäbe mit PV-Strom erfolgen. Dies hätte eine verminderte Wirtschaftlichkeit zur Folge. Somit ist der Einsatz von Absorptionskältemaschine auf die Verfügbarkeit von Vorlauftemperaturen von ca. 85°C (netzseitig) limitiert.

#### **Wirtschaftlichkeit**

Bei den passiven Kühlsystemen entfallen die Kosten für den Energieeinsatz zur Kühlung. Dafür sind die anlagenspezifischen Investitionskosten und Baukosten zu Beginn höher. Inwieweit eine passive Kühlung eine wirtschaftliche Alternative gegenüber konventionellen Kühlsystemen darstellt ist von den ort-

spezifischen Gegebenheiten und der erforderlichen Kühlleistung abhängig. Bei einer mechanischen Nachtlüftung entstehen verbrauchsabhängige Kosten für die Antriebsleistung des Ventilators und ggf. Investitionskosten für das Nachrüsten einer Lüftungsanlage. Die verbrauchsabhängigen Kosten beschränken sich auf Kosten für die Leistungsaufnahme und Regelung der Ventilatoren. Bei einer Kühlung mittels Erdwärmetauschern oder Grundwasserbrunnen entstehen hohe Investitionskosten für die Installation der Anlagentechnik sowie ggf. Kosten für eine benötigte Bauteilaktivierung oder Kühldecke. Die verbrauchsabhängigen Kosten beschränken sich auf Kosten für die Pumpenleistung und Regelung.

### **Best Practice**

#### *Sanierung der KfW-Hauptverwaltung in Frankfurt am Main*

Das 1986 erbaute Gebäude umfasst 26.000 m<sup>2</sup> Nutzfläche und wurde von 2003 - 2005 energetisch saniert. Das Sanierungskonzept umfasst die Bereiche Haustechnik, Raumklima, Lichtkonzept sowie Wärme- und Kälteerzeugung und hat den Energiebedarf um fast 50 Prozent auf 120 kWh/m<sup>2</sup>a gesenkt. Eine zentrale Abluftanlage sorgt für den nötigen Mindestluftwechsel und eine mechanische Nachtlüftung mit drei bis vierfachem Luftwechsel. Die Zuluft wird über dezentrale Zuluftelemente in der Fassade eingebracht. Die Nachtlüftung wird durch eine aktive Klimatisierung mittels Kühldecke ergänzt. Die internen Wärmelasten werden durch den Einsatz effizienter Geräte und Beleuchtung reduziert. Durch Sonnenschutzglas und einen automatisierten außenliegenden Sonnenschutz werden die solaren Wärmeeinträge minimiert.

Unter den nachfolgenden Link können detaillierte Information zu der Sanierung der KfW-Hauptverwaltung aufgerufen werden:

<http://www.greenbuilding-award.de/>

#### Prozesskälte

In Frankfurt werden jährlich rund 155 GWh Strom zur Bereitstellung von Prozesskälte benötigt. Das entspricht rund sieben Prozent des Stromverbrauchs im GHD Sektor. Hierbei wird ausschließlich der Strom für den Betrieb der Kompressoren in der Kältemaschine bilanziert. Prozesskälte wird häufig für die Kühlung von Lebensmitteln in Verkaufsräumen, Maschinen, Anlagen und zur Kühlung von Waren in Lagerhäusern verwendet. Demnach ist der Lebensmitteleinzelhandel, Kühlhäuser, Milchverarbeitende Betriebe, Gaststätten, Hotels, Eisdielen, Kantinen, Fleischereien und Schachthöfe typische Kälteverbraucher. Im Wesentlichen wird zwischen zwei Hauptverfahren, dem Kompressionskälteprozess und dem Absorptionskälteprozess unterschieden werden (siehe Klimakälte, S.80). Anders als im Bereich der Klimakälte ist die Vermeidung von Prozesskälte bzw. eine passive Kühlung keine Option. Aus diesem Grund liegt der Fokus bei der Prozesskälte auf die Steigerung der Effizienz.

## **Maßnahmen**

Einsparungen und Steigerungen der Effizienz lassen sich im Bereich der Prozesskälte neben technischen Lösungen oftmals über das Bedienungs- und Nutzungsverhalten der verantwortlichen Personen realisieren.

Wie in Kapitel mechanische Energie beschrieben, können durch den Einsatz elektrisch geregelter Pumpen, die Verwendung von mehrstufigen Verdichtern und die Verwendung drehzahl geregelter Kompressoren eine Verbesserung des Wirkungsgrades im Gesamtsystem erreicht werden. Weiter kann eine Reduktion der Kühllast und somit ein Sinken des Stromverbrauchs durch die Verbesserung der Kälte­dämmung realisiert werden. Wie bei der Klimakälte beschrieben gilt auch bei der Prozesskälte innere Wärmelasten wie Beleuchtung und Tür­rahmenheizungen beispielsweise in Kühlhäusern zu minimieren. Das Aufwärmen der Kühlgeräte durch äußere Wärmelasten ist ebenfalls zu vermeiden. Als Maßnahmen können eine Verbesserung der Wärmedämmung (z.B. Nach­trillos bei Kühlregalen), Sonnenschutz, das Anbringen von Kaltluftvorhängen, das Abdichten von Türen und die Abdeckungen von offenen Kühlungen genannt werden. Weiter können Einsparungen durch eine effizienzorientierte Wartung und Instandhaltung realisiert werden. Dazu zählt die regelmäßige Reinigung der Wärmetauscherflächen (Kondensator und Verdampfer). Bei der Neu- bzw. Ersatzbeschaffung von Kühlmöbeln sollte auf die richtige Dimensionierung der Kälteanlage geachtet werden. Weiter sind wenn möglich Verbundanlagen Einzelanlagen vorzuziehen.

## **Wirtschaftlichkeit**

Die Wirtschaftlichkeit der zuvor beschriebenen Maßnahmen sind abhängig von der individuellen Situation vor Ort. Jedoch kann davon ausgegangen werden, dass diesen meist kurze Amortisationszeiten zu Grunde gelegt werden. Besonders die technisch einfachen Maßnahmen wie beispielsweise die Verbesserung der Dämmung oder die Montage von Kaltluftvorhängen sind wirtschaftlich attraktiv. Bei den nicht-technischen Maßnahmen können teilweise nur durch die Umstellung des Nutzerverhaltens Einsparungen, die ohne Investitionskosten verbunden erzielt werden.

## **Best Practice**

### *Lebensmitteldiscounter Aldi*

Beim Lebensmitteldiscounter Aldi in Rastatt wird für die Kälteerzeugung, Heizung, Lüftung, Klimatisierung und Beleuchtung nur zwei Drittel der gewöhnlich erforderlichen Primärenergie benötigt. Eine eigens entwickelte, an Erdsonden gekoppelte Kälteverbundanlage mit Kohlendioxid als Kältemittel sorgt nicht nur für gekühlte Lebensmittel, sondern auch für einen wohltemperierten Innenraum. Eine gut gedämmte Gebäudehülle, Tageslichtnutzung und eine effiziente Lüftung vervollständigen den Energieeffizienten Supermarkt (Dilba, 2011).

### *Rathaus Marburg*

Der EDV-Server im Rathaus von Marburg wird über eine Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung mit Absorptionskältemaschine gekühlt und betrieben. Aufgrund des kontinuierlichen Betriebes des Servers und den damit verbundenen langen Laufzeiten der KWKK-Anlage amortisiert sich die Anlage innerhalb von fünf Jahren. Durch die Verrechnung der Stromeinspeisung der KWKK-Anlage verringert sich der Stromeinsatz des Servers um rund 70 Prozent (Herman, 2012).

### Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT)

Die Informations- und Kommunikationstechnologie ist ein dynamisches Innovationsfeld. Die Weiter- und Neuentwicklung von Geräten unterliegt einer hohen Geschwindigkeit. Gleichzeitig werden veraltete Geräte durch neue relativ schnell ersetzt. Als Querschnittstechnologie, die alle Wirtschafts- und Gesellschaftsbereiche durchdringt, wird der Informations- und Kommunikationstechnologie eine bedeutende Rolle zugeteilt. In Bürogebäuden machen die Informations- und Kommunikationsgeräte rund 40 Prozent des Stromverbrauchs aus (Hellmann, 2012). In Frankfurt werden rund 331 GWh bzw. sieben Prozent des Stromverbrauchs im Sektor GHD (exklusive reinen Rechenzentren) für IKT aufgewendet. Rund 69 Prozent des elektrischen Energieeinsatzes für IKT fällt im Bereich der büroähnlichen Betriebe an. Ursache dafür sind Branchen wie beispielsweise Banken und Versicherungen, die über einen überdurchschnittlich hohen Ausstattungsgrad an Bürogeräten und Servern verfügen.

### **Maßnahmen**

Neben einer Vielzahl von „weichen“ Maßnahmen, wie Produktkennzeichnungen und Beratungen für das öffentliche Beschaffungswesen, die auf die Information und Aufklärung der Verbraucher abzielen, sind es vor allem technische Maßnahmen, die den Stromeinsatz der IKT verringern. Der Austausch veralteter Geräte sowie der Einsatz von intelligenten Standby-Knöpfen, welche bei Betätigung direkt den Computer und seine Peripherie auf Standby schaltet. Weiter bieten Thin-Client Lösungen<sup>11</sup> bzw. Terminalarbeitsplätze oder der Austausch von Desktop-Rechnern durch Laptops Möglichkeiten den Stromverbrauch deutlich zu senken.

### **Wirtschaftlichkeit**

Insbesondere bei der IT ist die Notwendigkeit für ständige Neuerungen gegeben. Um die Arbeiten und Aufgaben erfüllen zu können, sind Unternehmen auf eine zeitgemäße IT-Ausstattung angewiesen. Durch den kürzeren Modernisierungszyklus ist in diesem Bereich die Möglichkeit gegeben bei der Neuan-

---

<sup>11</sup> Unter Thin-Client werden Computerterminals bzw. Computer, die mit einem abgespeckten Betriebssystem laufen Verstanden. Über die Thin-Clients werden lediglich die Benutzerschnittstellen realisiert, die Datenverarbeitung erfolgt über den Server.

schaffung auf die Energieeffizienz der Neugeräte zu achten. Gleichzeitig gibt der hohe Modernisierungszyklus die Amortisationszeit gegenüber veralteter Technik vor.

### **Best Practice**

#### *Car Sharing Firma setzt auf Thin-Clients*

Eine Car-Leasing Firma mit 135 Mitarbeitern konnte durch den Austausch von 90 PCs und 50 Notebooks gegen 120 Thin-Clients und 20 Notebooks für spezielle Zwecke in Kombination mit neuen energieeffizienten Servern rund 50 Prozent des Strombedarfes einsparen. Neben einem deutlich geringeren Administrationsaufwand hatten sich die Investitionssumme von 80.000 Euro innerhalb 26 Monate amortisiert (Deutsche Energie Agentur, 2012).

#### *Schule: Server Based Computing am Gymnasium Humboldtschule Hannover*

Der Bestand an Computer in Schulen ist stark ansteigend. Am Humboldt-Gymnasium in Hannover wurden aufgrund der steigenden Anzahl an Computern zwei Server für den Aufbau erster Netzwerkfunktion angeschafft. Im Frühjahr 2007 entschied das Humboldt-Gymnasium die Desktop-PC-Flotte in Terminalarbeitsplätze umzuwandeln. Dafür wurden zusätzliche Server installiert, die die Softwares (Bildbearbeitungsprogramme, Multimediaanwendungen im Sprachunterricht, Verwaltungssoftware) für die Arbeitsplätze bereitstellt. Bei der Auswahl der Server wurde auf energiesparende Geräte geachtet, die keine weitere Kühlung in den Kellerräumen benötigt. Ergebnisse der Umstellung von Desktop-PCs auf Terminalarbeitsplätze war die Verringerung von Störungsmeldungen, die damit verbundene Steigerung der Verfügbarkeit der Computer von 75 Prozent auf 90 Prozent und die Halbierung der Stromkosten (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2009).

#### Zusammenfassung: Best Practice Energieeffiziente Technische Gebäude Ausrüstung (TGA)

#### *„Ostakarde“ in Frankfurt am Main*

Als Best-Practice, in den die oben genannten Maßnahmen zum größten Teil vereint wurden, ist der Erweiterungsbau der Bankengruppe KfW, die sogenannte Ostakarde im Zentrum von Frankfurt am Main zu nennen. In diesem befinden sich Büros für 350 Mitarbeiter, Besprechungsräumen, Gruppenbüros und 13 Stadtwohnungen.

Durch die Integration eines Atriums, intelligenter Tageslichtsysteme und optimierter Beleuchtung kann der Strombedarf für Beleuchtungszweck minimiert werden. Eine Präsenz- und tageslichtabhängige Regelung in Kombination mit tageslichtlenkenden Sonnenschutzlamellen reduziert den Einsatz von künstlichem Licht auf ein Minimum.

Die Kühlung der Besprechungsräume, der Büros im Süden hinter der Doppelfassade, Sondernutzungsbereiche und Büros mit abgehängter Decke erfolgt aktiv. Das Vorkühlen der Außenluft im Sommer erfolgt über eine indirekte adiabate Kühlung. Ein Teil der Kälte für die im Gebäude eingebauten Kühlde-

cken (thermische Bauteilaktivierung durch Betondecken im Gebäude) wird über Wärmetauscher in der Frischwasserzuleitung gewonnen. Die restliche kühl „Kälte“ wird über eine Kompressionskältemaschine bereitgestellt. Die Beheizung des Gebäudes erfolgt mittels Pelletkessel (Grundlast) und einem Gas-Spitzenlastkessel. Eine 66 m<sup>2</sup> großen Vakuumröhrenkollektoranlage sorgt für die Erwärmung des Trinkwarmwasser in den im Gebäude befindlichen Wohnungen und unterstützt die dort eingesetzten Fußbodenheizungen. Das Warmwasser für die WCs und die Putzräume wird mittels Durchlauferhitzer dezentral elektrisch erwärmt.

Bei der Ausstattung der Arbeitsplätze wurde auf den Einsatz von Geräten mit niedrigen internen Wärmelasten geachtet.

Die vom Planer angegebene spezifische Primärenergieverbrauch liegt bei 107 kWh/m<sup>2</sup>\*a. Im Vergleich mit einem klimatisierten Standard Büroneubau liegt der Primärenergiekennwert der Ostakarde um rund 50 Prozent tiefer. Im Jahr 2009 wurde das Gebäude von der Stadt mit dem „Green Building Frankfurt 2009“ ausgezeichnet. Es gilt seitdem als ein Pionier des nachhaltigen Bauens in Frankfurt (<http://www.greenbuilding-award.de/i>)

#### 4.3.2 Effiziente Rechenzentren

##### **Status Quo**

Aufgrund der Sonderstellung von Rechenzentren in Frankfurt und den stark abweichenden Anwendungen gegenüber anderen GHD-Betrieben, werden Effizienzmaßnahmen für diesen Sektor gesondert dargestellt. Die Gruppe der Rechen- und Serverzentren ist weltweit eine der wachstumstärksten Branchen. Von 2008 bis 2011 ist es trotz steigender Anzahl an Servern (+7%) in Deutschland erstmals gelungen den Stromverbrauch der Rechenzentren um vier Prozent zu senken. Der Rückgang des Stromverbrauchs ist auf mehrere Ursachen zurückzuführen. Einerseits ist die Informationstechnik effizienter geworden und in den Bereichen der Klimatisierung und der unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) konnten deutliche Effizienzgewinne verzeichnet werden. Andererseits führte die Wirtschaftskrise 2009 zu einem Einbruch der Verkaufszahlen von Servern um mehr als zehn Prozent. Inwiefern der Trend des sinkenden Stromverbrauchs anhält, hängt somit von mehreren Faktoren ab. In der Studie „Energieverbrauch und Energiekosten von Servern und Rechenzentren in Deutschland – Aktuelle Trends und Einsparpotentiale bis 2015“ des Borderstep Instituts werden drei verschiedene Szenarien unterschieden. Die Entwicklung im Trendszenario „Business as usual“ konnte durch die oben genannte Effizienzsteigerung gestoppt werden.

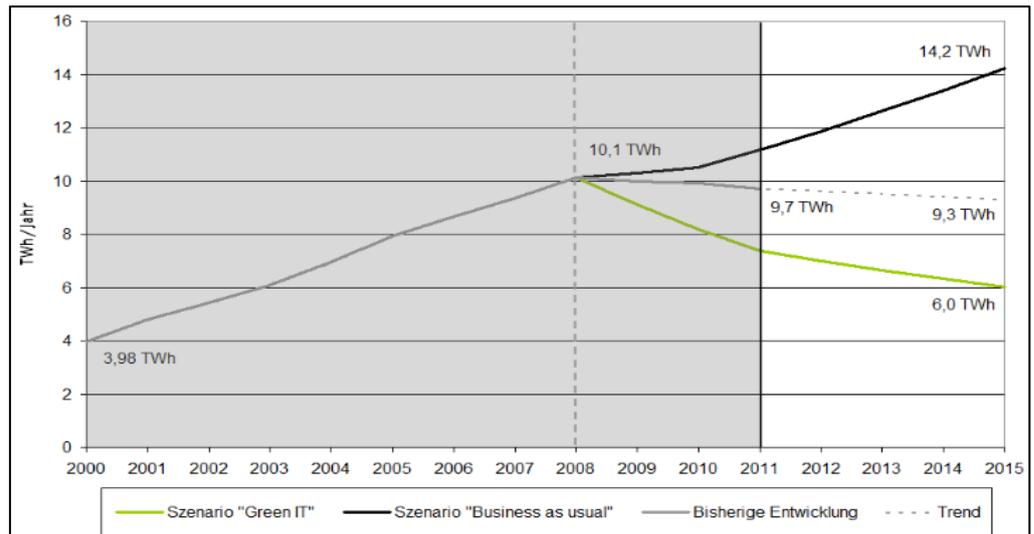


Abbildung 74: Entwicklung und Szenarien des Stromverbrauchs von Servern und Rechenzentren in Deutschland, (Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gemeinnützige GmbH, 2012).

Trotz der bisher positiven Entwicklung (in Abbildung 74 bisherige Entwicklung bzw. Trend) lassen sich weitere Einsparpotentiale bei Rechenzentren erzielen. Das Szenario „Green IT“ stellt die Entwicklung des Strombedarfes von Rechenzentren und Servern unter der Annahme des konsequenten Einsatzes der aktuell verfügbaren und wirtschaftlich sinnvollsten Effizienztechnologie dar.

Aufgrund der zur Verfügung stehenden Datenlage ist eine Abschätzung der Einsparpotentiale bzw. die Entwicklung des Stromverbrauches von den Rechenzentren in Frankfurt nur schwer abzuschätzen. Eine immer smarter werdende Zukunft (SmartGrid, SmartHome, SmartPhone, Clouds etc.) führt dazu, dass zukünftig ein gesteigerter Bedarf an leistungsfähigen Servern besteht (Anstieg der Rechenkapazitäten). Inwieweit der zu erwartende zukünftige Mehrbedarf an Serverkapazität durch Smart-Anwendungen im GreenIT Szenario berücksichtigt wird kann nicht gesagt werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass langfristig der Strombedarf von Rechenzentren in Frankfurt ansteigt.

### Maßnahmen

Im nachfolgenden werden Effizienzmaßnahmen für verschiedene Anwendungen in Rechenzentren beschrieben. Soweit es möglich und sinnvoll erscheint werden die spezifischen Einsparpotentiale einer Anwendung dargestellt. Das gesamte Einsparpotential der in Frankfurt befindlichen Rechenzentren wird auf Grundlage der in Abbildung 74 dargestellten Effizienzlücke zwischen den Szenarien „bisherige Entwicklung“ und „Green IT“ ermittelt. Die unter „Maßnahmen“ aufgeführten Hinweise zur Steigerung der Effizienz sind schwer einheitlich zu quantifizieren, da die Ausgangssituation in den verschiedenen Rechenzentren unterschiedlich ist.

### Gebäudeplanung

Bei der Planung von neuen Rechenzentren sollte auf die Minimierung des solaren Eintrags geachtet werden. Eine Gebäudeplanung, die wenig Einstrahlung zulässt, die Beschattung der Fassade durch Bäume und Begrünung der Fassaden und Dächer und ein möglichst kühler und schattiger Platz für Rückkühler sind elementare Bestandteile einer energieeffizienten Planung.

### IT-Systeme

Ein wesentlicher Ansatzpunkt zur Reduktion des Stromeinsatzes in Rechenzentren ist die Optimierung der IT Hard- und Software. Grundsätzlich kann der Stromverbrauch von Servern einmal durch die Optimierung der Hardware und durch die Optimierung des Betriebs der Hardware verbessert werden. Die Einsparung jedes Watts führt dazu, dass dieses nicht gekühlt und nicht durch die Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) abgesichert werden muss. Somit können durch die richtige Dimensionierung/Ausstattung an zwei Ansatzpunkten Strom eingespart werden. Insgesamt werden zwei Drittel der IT-Hardware durch Volumenserver verursacht. Eine verbesserte Auslastung der Volumenserver führt zu höheren Wirkungsgraden (Bitkom, 2010).

### Speicherlösungen

Der Anteil am Stromeinsatz für die Datenspeicherung ist gemessen am Gesamtstromeinsatz in Rechenzentrum eher gering. Dennoch können anhand einfacher und kostengünstiger Maßnahmen Stromeinsparpotentiale erzielt werden. Als Maßnahmen wäre die Löschung von veralteten und unnötigen Daten, die Nutzung von Bändern als Speichermedium und die Nutzung eines Storage Management Konzepts (ILM) zu nennen. Weiter können durch den Einsatz energieoptimierter Speichersysteme, wie beispielsweise Laufwerke mit hoher Speicherdichte Einsparungen erzielt werden (Bitkom, 2010).

### Virtualisierung – Cloudcomputing

Die Fortschritte, die durch virtualisierte Umgebungen erzielt werden können, sind erheblich. Die Auslastung der Server lässt sich von fünf Prozent bis 15 Prozent auf 60 Prozent und manchmal sogar 85 Prozent steigern. Die verbesserte Auslastung führt zu ansteigenden Wirkungsgraden und somit zu sinkenden Stromverbräuchen (Bitkom, 2010).

### Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV)

In Frankfurt gibt es eine Vielzahl von USV-Systemen. Die durchschnittliche Dauer eines Ausfalls in Frankfurt ist mit rund fünf min pro Jahr gegenüber dem bundesweiten Durchschnitt von ca. 15 min pro Jahr wesentlich geringer ist (Mainova AG, 2012). Die Neu- bzw. Anschaffung von USV-Systemen ist mit einem Versicherungsabschluss zu vergleichen. Eigentlich sollte diese nicht in Anspruch genommen werden, sollte aber im schlimmsten Fall den finanziellen Schaden minimieren. Durch den Einsatz von USV Systemen mit hohen Wirkungsgraden entsteht für den Fall, dass das Stromnetz ausfällt, eine geringe Verlustleistung. Der nötige zusätzliche Stromaufwand zum Wegkühlen der Verlustleistung ist somit minimal. Im Umkehrschluss würde bei kostengünstigeren USV-Systemen mit schlechtem Wirkungsgrad im Falle eines Stromaus-

falls höhere Verlustleistung und somit ein höherer Strombedarf für das Wegkühlen der internen Wärmelast anfallen. Aus energetischer Sicht sollten USV-Systeme mit den höchst möglichen Wirkungsgrad zum Einsatz kommen. In der Praxis unterliegt die Entscheidung dem betriebswirtschaftlichen Kalkül (Bitkom, 2010).

### Klimatisierung

Im Bereich der Klimatisierung schlummert ein hohes Stromeffizienzpotential. Die Kühlung ist meist nach einer Warmgang-Kaltgang-Konfiguration angeordnet. Wie in Abbildung 75 dargestellt werden zwischen den Serverracks abwechselnd Kalt- und Warmluftgänge kreiert.

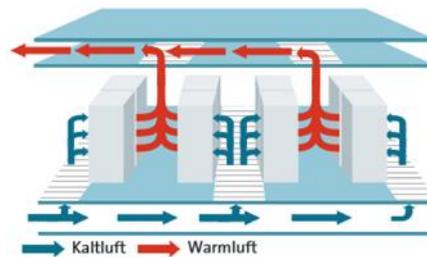


Abbildung 75: Warmgang / Kaltgang Konfiguration, (Bitkom, 2008).

Die runter gekühlte Zuluft wird über einen Doppelboden eingeblasen, von den Servern angesaugt und auf der Rückseite der Serverracks ausgeblasen. Die Abfuhr der erwärmten Luft geschieht über einen Doppelboden in der Decke. Der Kühlbedarf muss in Abhängigkeit der Rechenleistung angepasst werden. Die Anpassung kann über die Absenkung der Zulufttemperatur oder eine Erhöhung der Zuluftmenge (Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit) geschehen. Bei der Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit kommt es häufig zu unerwünschten Effekten wie Bypassen oder der Rezirkulationen von Kühlluft, die zu einer Minderung der Kühlleistung führen (siehe Abbildung 76).

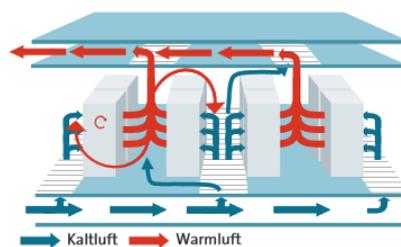


Abbildung 76: Warmgang / Kaltgang Konfiguration mit unerwünschten Bypassen und Rezirkulationen von Luft, (Bitkom, 2008).

Durch die Einhausung von Kalt- bzw. Warmgängen kann die Entstehung von nachteiligen Bypassen und Rezirkulationen von Luft vermieden werden.

Weiter ist die Dimensionierung der Doppelböden (Zu- und Abluftkanälen) für eine energetische Optimierung relevant. Die Höhe der Doppelböden variiert zwischen 300 mm in kleinen und bis zu drei Metern in großen Rechenzen-

tren. In Abhängigkeit der Kühlleistung müssen die Querschnitte optimal gewählt werden. Weiter ist darauf zu achten, dass die Strömung der Zu- und Abluft in den Doppelböden nicht durch innen verlegte Kabel und Rohre behindert wird.

### Intelligente Wärmenutzung

Neben Energieeinsparungen durch Effizienzmaßnahmen im Rechenzentrum kann die Gesamteffizienz durch die Nutzung der sonst ungenutzten Abwärme angehoben werden. Hierbei kann die Nutzung innerhalb des Rechenzentrums wie auch eine objektübergreifende Nutzung zielführend sein. Derzeit bleiben häufig die Potentiale der Abwärmenutzung in großen Rechenzentren sowie in Serverräumen in klein- bis mittelständischen Unternehmen ungenutzt. Die Gründe für die Nichtnutzung sind vielschichtig. Neben baulichen Restriktionen sind oft Einschränkungen durch angemietete Liegenschaften Hindernisse für eine konsequente Umsetzung der Abwärmenutzung. Neben den technischen Hemmnissen und vertraglichen Einschränkungen ist es in vielen Fällen das mangelnde Bewusstsein für ein ganzheitliches Energiemanagement im Gebäude. Eine ganzheitliche Betrachtung der Gebäudeperformance auch mit Blick auf die angrenzenden Gebäude (Synergieeffekte) ist zu favorisieren. Im Kapitel „Energiemanagementsysteme“ werden kurz die derzeit aktuellen Energieeffizienzkennzahlen „Power Usage Effectiveness“ (PUE), „Carbon Usage Effectiveness“ (CUE), „Data Center Infrastructure Efficiency“ kurz DCIE für Rechenzentren erläutert. Theoretisch ist es möglich rund 90 Prozent der eingesetzten elektrischen Energie als Wärmeenergie im Betrieb weiter zu nutzen. Innovative Nutzungskonzepte aus der Praxis haben gezeigt, dass die Integration der Abwärme für die Klimatisierung von Räumen zu enormen Einsparungen führen kann (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Bitkom, 2014). Im nachfolgenden Abschnitt werden Möglichkeiten für eine Nutzung der Abwärme von Rechenzentren aufgezählt.

- Nutzung von Serverabwärme für das benachbarte Schwimmbäder (Zürich) (Buck, 2009).
- Beheizung von Gebäuden (London) (Heise, 2009).
- Einspeisen der Wärme in ein Fernwärmenetz (Zürich) (Buck, 2009).

### **Best Practice**

#### *Data Center: Freies Kühlen im NetApp-Rechenzentrum in Sunnyvale*

Im NetApp Rechenzentrum in Kalifornien kann durch die Verwendung einer Außenluftkühlung auf eine konventionelle Kühlung verzichtet werden. Durch die Einführung von effizienten Speichertechnologien und den Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs wurde das Unternehmen 2008 ausgezeichnet. Konkret wurden folgende Maßnahmen umgesetzt:

- Trennung von Heiß-Kaltgang durch Kunststoffvorhänge und -platten.
- Installation von drahtlosen Temperatursensoren, um die Klimatisierung der IT-Racks auf Basis von Messwerten zu steuern. Dabei dienen die Messpunkte zur Kontrolle des Luftflusses in den Warmgängen.

- Auf Basis von Temperaturmesswerten in den Kaltgängen wurde die Steuerung der Ventilatoren optimiert.

Das Hauptergebnis dieser Maßnahmen war, dass nachteilige Bypässe und Rezirkulationen durch die Trennung von Heißgang und Kaltgang verhindert werden konnten. Vor der Maßnahme betrug die Temperaturdifferenz zwischen den warmen und kalten Bereichen ca. drei Grad Celsius. Mit der Installation der Vorhänge konnte die Temperaturspreizung auf 12 °C angehoben werden. Dadurch erhöhte sich die Effizienz des Wärmeaustausches um den Faktor vier. Insgesamt konnte dadurch die Kühllast um 41 kW reduziert werden (Bundesministerium für Umwel, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2009).

### **Best Practice**

*Verwaltung: Konsolidierung und Virtualisierung der Rechenzentren der Stadtverwaltung Kopenhagen*

In der Stadtverwaltung von Kopenhagen wurden im Jahr 2008 insgesamt rund 700 Server in kleinen Rechenzentren eingesetzt. Diese verbrauchten jährlich ca. 1,4 Mio. kWh/a. Die über die Stadt verstreuten Rechenzentren erschienen in der Struktur nicht effizient. Deshalb entschied die Stadt Kopenhagen die kleinen Rechenzentren in einem neuen, gemeinsamen Rechenzentrum zu zentralisieren. Mit der Zentralisierung der Server wurde ein Virtualisierungs- und Konsolidierungskonzept verabschiedet. Damit konnten rund 650 Server auf 32 Maschinen virtualisiert werden, sodass die Anzahl an Servern um Faktor 20 sank. Durch die Umstellung konnte die Serverauslastung von unter 20 Prozent auf über 70 Prozent angehoben werden. Ergebnis der Umstellung waren Energieeinsparungen in Höhe von 75 – 85 Prozent gegenüber der Ausgangssituation. Im Zuge der Konsolidierung und Virtualisierung wurde eine Optimierung der Infrastruktur durchgeführt. Der Aufbau von Rückkühlern im Schatten an der Nordseite des Gebäudes ermöglicht dem System eine freie Kühlung unterhalb von 16 °C. Dadurch kann rund zwei Drittel des Jahres auf eine freie Kühlung zurückgegriffen werden. Zusätzlich wurde bei den Neuanschaffungen von Geräten für die Unterbrechungs-Freie-Stromversorgung (USV) auf einen hohen Wirkungsgrad geachtet. Insgesamt konnten durch die Umsetzung der Maßnahmen in Summe rund eine Millionen Kilowattstunden Strom eingespart werden. Die Vielzahl der Maßnahmen führten zu Einsparungen in Höhe von ca. 600.000 € im Jahr (Bundesministerium für Umwel, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2009).

### *Nachweispflicht zur Einhaltung von Effizienzkenngößen*

Es ist zu erwarten, dass sich die Leistung der Frankfurter Rechenzentren bis zum Jahr 2050 verdoppeln wird. Als Maßnahme sollten für Neuinstallationen und bei Umbau von bestehenden Rechenclustern Mindeststandards für Energieeffizienz gelten. Auf Basis der bestehenden Energiekennzahlen „Power Usage Effectiveness“ (PUE), „Carbon Usage Effectiveness“ (CUE), „Data Center Infrastructure Efficiency“ (DCIE) könnten Maximalwerte definiert werden, die von den Betreibern der Rechenzentren eingehalten werden müssen. Europa-

weit geltende Effizienzstandards könnten einer möglichen Abwanderung von Rechenzentren aus Frankfurt entgegenwirken.

Alternativ zu verpflichtenden Performance-Kennwerten könnte die Stadt Frankfurt durch Beratungs-, Informations- und Förderangebote Effizienzsteigerungen in den Rechenzentren vorantreiben. Neben den großen Rechenzentren, die meist über das nötige Know-how hinsichtlich Energieeffizienz verfügen, gilt es insbesondere für kleinere Rechner- und Serverräume wie beispielsweise die an Schulen Beratungstermine zu vereinbaren.

### **Wirtschaftlichkeit/Finanzierung**

Die Kosten zur Prüfung von Energieeffizienzstandards für Frankfurter Rechenzentren werden als gering eingeschätzt. Entscheidend ist die politische Unterstützung Effizienzstandards in diesem Sektor festzusetzen und somit Frankfurt zu einem grünen IT-Zentrum umzugestalten. Zudem würden sich Unternehmen, die sich auf Effizienztechnologien in diesem Sektor spezialisiert haben, in Frankfurt ansiedeln. Die Mehrkosten von hocheffizienten Rechenzentren gegenüber normalen Rechenzentren sind unter Berücksichtigung der jährlichen Gesamtkosten (Betriebs-, Verbrauchs- und Kapitalkosten) über den gesamten Lebenszyklus betrachtet als gering einzuschätzen.

### **Umweltverträglichkeit**

Durch die erwartende massive Zunahme neuer Rechenkapazitäten würden hohe Anforderungen zur Energieeffizienz verhelfen die festgelegten Ziele zu erreichen.

#### Prüfung der Energieverbräuche von IT in Frankfurter Schulen

Als erste Maßnahme gilt es die Stromverbräuche der IT-Infrastruktur der öffentlichen Gebäude zu erfassen. Dabei kann über die Erstellung von IT-Inventarlisten (Erfassung Hardware) Verbräuche ermittelt werden. Durch ein darauf aufbauenden Kenngrößenvergleich („Power Usage Effectiveness“ (PUE), „Carbon Usage Effectiveness“ (CUE), „Data Center Infrastructure Efficiency“ (DCIE) können Schwachstellen in der IT-Infrastruktur erkannt werden. Zusätzlich wäre die Einbindung von Rechenzentren im Kooperationsprojekt „ÖKOPROFIT“ Frankfurt denkbar. In diesem Kreise könnte ein Wissens- und Erfahrungsaustausch und –aufbau stattfinden.

### **Wirtschaftlichkeit/Finanzierung**

Die Kosten einer umfassenden IT-Stromverbrauchsanalyse können mehrere Zehntausend Euro betragen. Gegenüber den Einsparungen, welche erst durch Maßnahmen ersichtlich werden, sind diese Anfangskosten dennoch gering. Die Umsetzung in weiteren kommunalen Gebäuden könnte aus den Einsparungen der ersten Umsetzungen erzielt werden. Dabei wäre ein Ansatz die eingesparten Kosten der IT der ersten zwei Jahre zu nutzen, um die Effizienzmaßnahmen in weiteren Schulen und anderen kommunalen Gebäuden um-

zusetzen, falls eine direkte Finanzierung mehrerer kommunaler Gebäude nicht möglich ist. Weiter bestünde die Möglichkeit das „50:50“ Förderprogramm der Abteilung Energiemanagement des Hochbauamtes mit einem speziellen Schwerpunkt auf die IT weiter auszubauen. Auch das Förderprogramm „LEEN 100“ könnte eine interessante Möglichkeit darstellen Unternehmen mit hohem IT-Bedarf zu einer aktiveren Energieeffizienzstrategie zu gewinnen.

### **Umweltverträglichkeit**

Siehe Best Practice Beispiel Konsolidierung und Virtualisierung der Rechenzentren der Stadtverwaltung Kopenhagen

### **Hemmnis**

Die Finanzierungsmöglichkeiten der Effizienzmaßnahme könnten als Haupthemmnisse genannt werden.

### Zentralisierung der IT-Infrastruktur öffentlicher Gebäude

Durch die konsequente Weiterverfolgung der Zentralisierung der IT-Infrastruktur der öffentlichen Gebäude durch Synergieeffekte können am Westhafen (bessere Auslastung etc.) weitere Betriebskosten eingespart werden.

### **Umweltverträglichkeit**

Durch die Bündelung der IT-Hardware am Westhafen können Einsparungen von über 30 Prozent angenommen werden. Berücksichtigt werden muss aber auch, dass durch die Zentralisierung IT-Arbeitsplätze abgebaut werden. Somit ist der ökologische Nutzen auch vor dem Hintergrund der sozialen Folgen (Abbau von Arbeitsplätzen) kritisch zu hinterfragen.

### **Finanzierung/Wirtschaftlichkeit**

Durch die Nutzung von Synergien können die Betriebskosten und der Strominput gesenkt werden. Somit könnten die Kosten für den Umbau mit geringen Förder- und Steuergeldern realisiert werden.

## 4.3.3 Eigenstromlösungen im GHD Sektor

### **Maßnahme**

Analog zu den Haushalten gibt es für die verschiedenen GHD typische Lastgänge. In Abbildung 77 ist der Tageslastgang von büroähnlichen Gebäuden und die Sonneneinstrahlung in Stundenwerten dargestellt. Anderes wie bei den Haushalten liegen die Lastspitzen des GHD Betriebes deckungsgleich mit den Einstrahlungsspitzen. Somit könnte bei büroähnlichen Gebäuden, die in Frankfurt einen Großteil des Stromverbrauches im GHD Sektor beanspruchen, der PV-Eigenstromanteil ohne größere Maßnahmen deutlich erhöht werden.

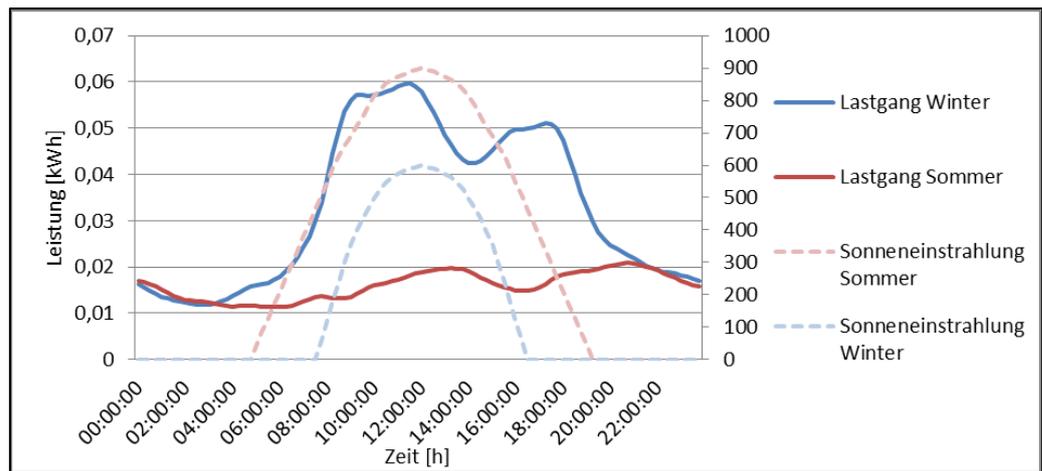


Abbildung 77: Lastprofil von büroähnlichen Betrieben, eigene Darstellung (IBP).

#### 4.3.4 Effiziente Gewerbetarke und Infrastrukturmaßnahmen

##### **Maßnahme**

##### Effizienzmaßnahmen Straßenbeleuchtung

Die Umrüstung von Gas- auf Natriumdampfdruckleuchten bzw. Leuchtdioden (LED) ist aus wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten empfehlenswert. Dies haben auch die Stadtverordneten der Stadt Frankfurt am Main erkannt und die Umrüstung 2014 für die Stadt beschlossen. Aufgrund der hohen Ineffizienz von Gasleuchten (15-facher Endenergiebedarf im Vergleich zu Natriumdampfdruckleuchten) wird empfohlen die Optik der Gasleuchten zu erhalten, jedoch die Versorgung auf Strom umzustellen. Neben der Umstellung der Leuchtmittel kann durch die Verwendung von Dimmern in Kombination mit Bewegungsmeldern an niedrig frequentierten Straßen/Gehwegen weitere Endenergie eingespart werden. Die SRM konnte in Vergangenheit unter Einhaltung der Beleuchtungsnormen den Endenergieverbrauch, durch den Ersatz von Leuchten alter Technik und in-effizienter Leuchtmittel durch neue Leuchten, nachweislich um 36 Prozent senken (SRM 2014).

##### **Wirtschaftlichkeit**

Die Umstellung einer Gasleuchte auf konventionelle Natriumdampfdruckleuchten bzw. LED-Leuchten kostet zwischen 9.780 (Natriumdampfdrucklampe) – 10.905 Euro (LED). Bei ca. 5.467 veralteten Gaslampen ergäbe sich eine Investitionssumme von rund 60 Millionen Euro. Die jährlichen Betriebskosten einer Gaslampe liegen bei 260 Euro; im Vergleich strombetriebene Lampen haben jährliche Betriebskosten von rund 80 Euro. Weiter betragen die verbrauchsgebundenen Kosten der Gaslampen mit 400 Euro rund das 4fache einer konventionellen Lampe. Die Stromkosten bei einer LED Lampe belaufen sich im Jahr auf rund 17 Euro. Insgesamt können jährlich 480 Euro (Natriumdampfdrucklampe) bzw. 543 Euro (LED) pro elektrischer Lampe an variablen

Kosten (betriebs- + verbrauchsgebundene Kosten) gegenüber einer Gaslampe eingespart werden (F.A.Z., 2014). Demnach würde sich die Umstellung der Straßenbeleuchtung auf NDLED oder LED nach knapp 20 Jahre amortisieren. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass Kosten der LED Leuchten derzeit und künftig weiter fallen und steigende Strompreise ebenfalls zu geringeren Amortisationszeiten führen.

### **Umweltwirkung**

Die 5.467 installierten Gasleuchten haben einen CO<sub>2</sub>-Ausstoß von rund 8.567 Tonnen. Durch den Rückbau der Gasleuchten ist es möglich durch den Einsatz von Leuchten mit Natriumdampfdruckentladungslampen und LED mehr als 90 Prozent der eingesetzten Endenergie einzusparen. Insgesamt (Gas- + Stromleuchten) wurden rund 20.000 Tonnen CO<sub>2</sub> durch die Straßenbeleuchtung im Jahr 2012 emittiert. Eine vollständige Umstellung der Leuchtmittel auf Natriumdampfdruckleuchten könnte bei einer Übererfüllung der Normen den Endenergiebedarf zukünftig um 53 Prozent reduzieren. Die CO<sub>2</sub>-Einsparungen beliefen sich auf rund 37 Prozent. Eine 100 prozentige Umstellung der Straßenbeleuchtung (Natriumdampfleuchten + Gasleuchten) auf LED Technik lässt den Endenergieeinsatz um 93 Prozent auf 4,56 GWh sinken. Der damit verbundene CO<sub>2</sub>-Ausstoß läge mit rund 2.083 Tonnen rund 90 Prozent unter dem Ausgangswert. Durch den konsequenten Einsatz von Dimmern kann das CO<sub>2</sub>-Einsparpotential um weitere zwei Prozent angehoben werden.

### Förderung eines Nullemissions-Gewerbeparks

Sollen die Ziele des Masterplans erreicht werden, gilt es neben einen energieeffizienten Bestand neue Gewerbeparks und Gebäude als Nullemissions-Neubau zu gestalten. Im Wohnsektor zeigen bisherige Bauprojekte, dass Nullemissions-Gebäude als auch Plusenergiehäuser durchaus ökologisch und ökonomisch attraktiv sind. Als Maßnahme gilt es einen künftigen Gewerbebezirk als Nullemissions-Gewerbepark auszuschreiben. Bei diesem zukunftsweisenden Gewerbepark gilt es von Anfang an den Mobilitätsplan, die lokalen Potentiale für erneuerbare Energien und Abwärme sowie deren Synergien mit den Wärme- und Stromverbräuchen der künftigen Nutzer optimal aufeinander abzustimmen.

### **Wirtschaftlichkeit/Finanzierung**

Die Planung und der hohe Abstimmungsbedarf führen gegenüber typischen Gewerbeparks zu Mehrkosten, die nicht zu beziffern sind, aber sich auch in den Investitionskosten widerspiegeln. Durch die optimale Abstimmung der Energieströme in den unterschiedlichen Sektoren Strom, Wärme und der Mobilität im Nullemissions-Gewerbeparks werden die Betriebskosten einzelner Kunden/Gebäude auf ein Minimum gesenkt. Die direkte Integration von PV-Anlagen oder Solarthermieranlagen in die Gebäudehülle führt zu geringeren Kosten als eine nachträgliche Installation. Auch die direkte Nutzung von Abwärme und deren Abstimmung mit potentiellen Abnehmern am Standort reduziert die Gesamtkosten. Weiter sollte die Einbindung des Gewerbeparks ins

Lastmanagement überprüft werden, um dort Nachfrage und Angebot besser regeln zu können.

Ein integrales Mobilitätskonzept für den Gewerbepark in dem ÖPNV, Carsharing, Bikesharing etc. integriert ist, kann ebenfalls zu geringeren Gesamtkosten und zu einem Kauf- oder Mietvorteil für künftige Gewerbenutzer gesehen werden.

### **Umweltverträglichkeit**

Neu errichtete Gewerbeparks verursachen stets CO<sub>2</sub>-Emissionen im Bau. Emissionen durch Gebäude und deren Nutzer (Gewerbe, Handel, Industrie) können jedoch auf ein Minimum bzw. in der Jahresbilanz auf null reduziert werden.

### **Hemmnis**

Als Haupthemmnis kann der hohe Abstimmungsbedarf zwischen den einzelnen Sektoren gesehen werden (Transaktionskosten). Ein Mobilitätsplan wird selten in Abhängigkeit der künftigen Nichtwohngebäude und deren Energieverbrauch geplant. Eine Befragung der künftigen Eigentümer zu Abwärmepotentialen und deren Unterstützung regenerativer Energien ist stets in die Bauplanung zu integrieren, wird jedoch in der Praxis kaum umgesetzt. Abhilfe kann eine Koordinierungsstelle beispielsweise am Energiereferat schaffen, welche die unterschiedlichen Projektpartner zusammenführt.

### *Gewerbepark-Energie-Manager & Wissensdatenbank*

Als weitere Maßnahme zur Reduzierung der Strom- und Wärmeverbräuche kann ein Beratungsprogramm bei Immobilienerwerb oder Coaching durch Energieexperten herangezogen werden. Dabei wäre eine umfassende Betrachtung der drei Sektoren Strom, Wärme und Mobilität zu empfehlen, um sämtliche Aspekte des Gewerbeparks zu berücksichtigen. Die Empfehlung von zertifizierten Beratern könnte durch die Industrie und Handelskammer Frankfurt koordiniert werden. Basis für eine funktionierende Beratung ist der Aufbau einer Wissensdatenbank in der Abwärmepotentiale sowie Lastprofile der einzelnen Gewerbeparkanlieger hinterlegt werden. Bei Verzug eines Anliegers (Gewerbepark im Bestand) bzw. bei der Neuplanung von Gewerbeparks könnten über die Wissensdatenbank ideale Nachbarschaften hinsichtlich der Energienachfrage und -angebots geschaffen werden.

### **Wirtschaftlichkeit/Finanzierung**

Eine Erstberatung könnte zu geringen Kosten oder kostenlos angeboten werden, um das Interesse zu wecken. Der zweite Schritt zur umfassenden Beratung kann dann kostenpflichtig sein. Weiter sollte das Programm „LEEN 100“ zur Vernetzung der Akteure ausgebaut werden.

### **Umweltverträglichkeit**

Eine umfassende Energieberatung für bestehende und neue Gewerbeparks führt zu einem deutlich geringeren Energieverbrauch in den Sektoren Wärme,

Strom und Mobilität. Eine genaue Quantifizierung der Energieeinsparung ist jedoch kaum möglich und ist abhängig von den örtlichen Gegebenheiten.

### **Hemmnis**

Als Hemmnis sind Pfadabhängigkeiten in bestehenden Gewerbegebieten anzuführen. Unternehmen haben auf Basis ihres Lastprofils meist individuelle Versorgungskonzepte. Eine verzahnte Energieversorgung könnte zu rechtlichen Streitigkeiten im Falle von Produktionsausfällen, die auf Energieversorgungsstörungen im benachbarten Betrieb zurückzuführen sind, führen. Weiter ist die Verweildauer der im Gewerbepark ansässigen Betriebe unterschiedlich. Damit muss bei einer gemeinsamen Energieversorgung ein Backup für den Fall eines Verzuges bestehen.

## Steigerung der Energieeffizienz im kulturellen Bereich

### **Status Quo**

Beleuchtungs- und Bühnentechnik und Klimatisierung (Heizung und Kühlung) verursachen in Theatern, kulturellen Institutionen und bei Kulturveranstaltungen grundsätzlich einen hohen Energiebedarf. Aufgrund ihrer Institutionalisierung meist als Verein, sind kulturelle Institutionen bislang nicht anspruchsberechtigt für die Teilnahme an Förderprogrammen zur Energieeffizienz. Weiterhin lassen sich Energiemanagement-Prozesse und Maßnahmen zum Energiesparen, wie sie bereits für den privaten Haushaltsbereich und für Bürogebäude entwickelt wurden, nicht ohne Weiteres auf kulturelle Institutionen übertragen. Ihre Nutzungsart und Nutzungsdauer (vorwiegend in den Abendstunden, Wechsel von Spielzeit und Sommerpause etc.) unterscheiden sich wesentlich von der Nutzung regulärer Bürogebäude und verlangen daher eine eigenständige Methode, die die spezifischen Parameter berücksichtigt.

Gerade die effiziente LED-Bühnenbeleuchtung ermöglicht nicht nur reduzierte CO<sub>2</sub>-Emissionen, sondern öffnet auch ein viel größeres künstlerisches Spektrum an Möglichkeiten für das Zusammenspiel zwischen Bühnentechnikern, Choreografen und Künstlern.

### **Maßnahme**

Im ersten Schritt sollte eine Systematik für Energiemanagement in Theatern und kulturellen Institutionen entwickelt werden, um die Potentiale strukturiert heben zu können. Im weiteren Verlauf sollte dann zunächst die Umstellung von konventioneller Bühnenbeleuchtung hin zu LED-Technologie angestoßen werden. Neben dem erheblich geringeren Strombedarfs (Einsparpotential ca. 98%) reduziert sich gleichermaßen auch der Kühlbedarf um ein Vielfaches, da das Wegkühlen der Abwärme der 1000 Watt Strahler weitgehend entfällt.

Aufgrund der hohen visuellen Aufmerksamkeit von Besuchern kultureller Veranstaltungen, bietet eine moderne Bühnentechnologie auch zahlreiche Mög-

lichkeiten, um faszinierende Aspekte von Klimaschutz und Energieeffizienz zu kommunizieren.

### **Wirtschaftlichkeit**

Wie oben schon erwähnt, beläuft sich das Einsparpotential von LED-Bühnenbeleuchtung auf 98% aufgrund der weitaus höheren Effizienz als auch des deutlich reduzierten Kühlbedarfs. Bei Umsetzung in den etwa 26 Theatern in Frankfurt am Main könnte hiermit ein deutlicher Beitrag zum 50% Einsparziel geleistet werden. Gleichzeitig wäre der zusätzliche Effekt eine erhebliche Entlastung des Kulturhaushaltes aufgrund der wesentlich reduzierten Energierechnungen.

Frankfurt am Main könnte sich darüber hinaus ein weiteres Mal als innovativer Vorreiter positionieren: Mit 143 öffentlichen Theatern, 131 Orchestern, 218 privatwirtschaftlich organisierten Kulturinstitutionen und 73 Kulturfestivals allein in Deutschland bietet der Ansatz ein Beispiel zur Nachahmung.

### **Hemmnisse**

Hemmnisse bestehen sowohl im technischen, als auch im finanziellen und strukturellen Bereich.

Die technischen Hemmnisse sind mit den finanziellen und strukturellen Hemmnissen eng verzahnt. Beispielsweise ist der Energieverbrauch von kulturellen Institutionen weitgehend unbekannt und die Erfassung der Verbräuche ist oftmals sehr komplex. Dies ist zum einen der Tatsache geschuldet, dass der Kultursektor stark subventioniert ist. Folglich werden die Energierechnungen meist von Land oder Kommune bezahlt, es entsteht also bei den Betreibern der Kulturinstitutionen weder das Bewusstsein über den Verbrauch noch die Notwendigkeit, bezüglich Effizienzmaßnahmen tätig zu werden. Weiterhin fehlen oft Unterzähler in den Gebäuden, die es ermöglichen würde, die Verbräuche in den Theatern zu erfassen und den einzelnen Verbrauchern zuzuordnen, um die genauen Einsparpotentiale sichtbar zu machen. Zudem verlangt die moderne, effiziente Bühnentechnologie einen neuen Umgang, die den Beruf des Bühnentechnikers verändert und Umschulungsmaßnahmen sowie neue Ausbildungsmodule erfordert.

Strukturelle Hemmnisse liegen vor allem in der Trennung von Nutzer (Theaterbetreiber) und Kostenträger (meist öffentliche Verwaltung). Investitionen in die Bühnentechnologie müssen aber von den Theatern selbst finanziert werden. Da sie umgekehrt aber nicht von den Einsparungen profitieren, stellt sich die Investition meist als unwirtschaftlich dar.

### **Best Practice**

Im Rahmen des Frankfurter Stromsparprogramms fand vor einiger Zeit die Erstberatung des Gallustheaters sowie des Moussonturms statt. Zusätzlich konnte eine Initiative auf kulturelle Institutionen spezialisierte Initiative aus dem Rhein-Main-Gebiet EU-Fördermittel für die Befassung mit Effizienzpotentiale in Kulturstätten (Finanzierung von Effizienzmaßnahmen, technische Be-

sonderheit von Kulturstätten im Vergleich zu Bürogebäuden und Wohngebäuden, Lücken in Förderprogrammen, Entwicklungsmöglichkeiten bei der Ausbildung von Theater Technikern etc.) akquirieren. Als Ergebnis aus diesem Projekt fand im Oktober 2014 Konferenz zum Thema „Energieeffizienz in Theatern“ im Gallustheater statt, bei der Experten aus 70 Theatern aus Deutschland und Europa zwei Tage lang zum Thema diskutierten und sich austauschten. Die Veranstaltung konnte bereits über die Grenzen Hessens hinaus erfahrenen Bühnentechniker begeistern, die ihrerseits die Umsetzung in ihren eigenen Institutionen angestoßen haben:

“When I came back from the event in Frankfurt on Main, I calculated the energy costs that we are currently saving by renting LED units on an existing show; the savings paid for the rental costs, but the particular units we are using are not a viable long term investment solution (light quality wise) - the units in Frankfurt however looked significantly better.

After talking to various colleagues since my return, we are now planning to replace all of our old energy hungry CYC units...”<sup>12</sup>

---

<sup>12</sup> Matt Peel, Technischer Leiter Royal Shakespeare Company, im Nachgang zur Veranstaltung “Energieeffizienz in Theatern” im Gallustheater Frankfurt

### Förderung von solarüberdachten Ladestationen im Einzelhandel

Gerade an Einzelhandels- und Lebensmittelgeschäften parken Verkehrsmittel wie Fahrräder, Pkws oder Motorroller mehrere Stunden. Als Fördermaßnahme gilt es Handelsgeschäfte und deren Parkplätze mit solarüberdachten Ladestationen auszustatten. Ziel wäre es kurz- bis mittelfristig rund 25 solarbetriebene Ladestationen an Einzelhandelsgeschäften aufzubauen. Neben einem E-Fahrzeug sollte die Ladestation und deren Überdachung Platz für 1-2 Pedelecs und einem Lastenfahrrad haben. Die Stationen dienen nicht nur den Unternehmen als Imagegewinn und somit als Vorreiter grüner Mobilität sondern verleihen Frankfurt ein grünes gesamtstädtisches Bild.

#### **Wirtschaftlichkeit/Finanzierung**

Die Stromgestehungskosten einer PV-Anlage liegen derzeit bei 10 bis 15 Ct/kWh und sind somit geringer als die Strombezugskosten eines Handelsbetriebs. Die Kosten für die Errichtung der PV-Anlage könnten größtenteils von den Handelsgeschäften getragen werden, da der erzeugte Strom als Eigenerzeugter Strom abgerechnet wird. Für die Kosten der Ladestation könnte eine Kostensplittung auf Energieversorger, Stadt und Einzelhandel erfolgen. Somit könnten die eher als hoch eingeschätzten Kosten für die Beteiligten im überschaubaren Rahmen gehalten werden.

#### **Umweltverträglichkeit**

Solarüberdachte Stationen erzeugen über das Jahr den genutzten Strom und sind somit CO<sub>2</sub> frei.

#### **Hemmnisse**

Als Hemmnisse sind die hohen Kosten und ein fehlendes Geschäftsfeld für Ladestationen mit denen keine Gewinne erzielt werden können zu nennen. Dabei gilt es eher kostengünstige Solarstationen an Einkaufseinrichtungen zu platzieren, da E-Mobile dort länger verweilen. Als ein nicht unwesentliches Hindernis ist der zu Verfügung stehende Platz anzuführen. Trotz alle dem sind auch hier Lösungen wie Ladestationen an Straßenlaternen möglich.

### Förderung: Projekt Analyse der Energieverbräuche durch Smart Metering als neues Geschäftsfeld

Als Maßnahme soll der Anreiz geschaffen werden, Verbräuche von KMUs mittels Smart Metering zu erfassen, um eine umfassenden Analyse der Energieverbräuche anzubieten. Dafür könnte ein Demonstrationsprojekt, an dem rund zehn Unternehmen und der lokale Energieversorger beteiligt sind, angeschoben werden. Ziel des Vorhabens ist das Aufzeigen von Vorteilen einer detaillierten Energieverbrauchserfassung. Strom- und Wärmeverbräuche der Nutzer können stündlich dargestellt werden. Den lokalen Energieversorgern soll dadurch ein neues Geschäftsfeld eröffnet werden, eine Energieverbrauchsanalyse zugeschnitten auf den jeweiligen Kunden anbieten können. Die ersten zehn Unternehmen können somit zur Marköffnung helfen. Wäh-

rend der Projektlaufzeit von ca. zwei Jahren sollte eine Evaluierung zeigen, inwieweit sich der Verbrauch bei den Unternehmen aufgrund der Erfassung von detaillierten Verbrauchsströmen verändert hat.

### **Wirtschaftlichkeit/Finanzierung**

Die Finanzierung zur Entwicklung, Standardisierung und Evaluierung einer gemeinsamen Schnittstelle kann durch beteiligte Unternehmen (Energieversorger, Gewerbekunden, etc.) erfolgen. Dabei gilt es nicht unbedingt eine neue Software zur Energieverbrauchserfassung zu entwickeln, sondern bestehende Komponenten für Kunden zu standardisieren und die Kosten für die Installation zu reduzieren. Gefördert werden sollten die Entwicklung zur Kostenreduzierung bzw. deren Standardisierung des Ablaufs (Installation von Sensoren und Messgeräten, Plattform, Visualisierung etc.).

### **Umweltverträglichkeit**

Es kann davon ausgegangen werden, dass durch eine Energieverbrauchsanalyse durch Smart Metering und deren direkten Visualisierung beim Kunden der Energie- bzw. Stromverbrauch um mindestens 10 bis 20 Prozent gesenkt werden kann. Eine weitere Darstellung der Eigenproduktion aus PV-Anlagen soll zeigen, wie sich Unternehmen und Kommunen auf den eigenen erzeugten Strom anpassen ohne Maßnahmen durch Demand-Side Management Systeme einzuführen.

### **Hemmnis**

Bisher gibt es für Smart Metering noch kein marktgängiges Geschäftsfeld. Vereinzelt werden unterschiedliche Projekte gefördert und durchgeführt. Dabei sollten besonders mittelständische Unternehmen bei weiter steigenden Strompreisen ein erhöhtes Interesse an einem Monitoring System zur Energieverbrauchsanalyse haben. Einfache und kostengünstige Systeme wurden bereits seitens der Mainova AG entwickelt. Der Energieversorger würde als Dienstleister, der das Energiemanagementsystem und die Rechenkapazität vorhält auftreten. Eine Teilrefinanzierung der Kosten des EVUs erfolgt über eine jährlich fixe Grundgebühr, die die EVUs den Unternehmen in Rechnung stellen.

### Aktivierung von GHD-Vertretern

Um die Aktivität hinsichtlich der Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen in dem Sektor GHD zu erhöhen, bedarf es einer gezielteren Ansprache der Akteure. Neben einen integrierten Ansatz in Form eines branchenübergreifenden Dialogs kann die Kommunikation auch durch politische Impulse (Diskussion) gesteigert werden. Begleitend zur Diskussion und dem branchenübergreifenden Dialog tragen gezielte Marketingmaßnahmen in denen klar Absender und Empfänger definiert werden, zur Weiterbelebung des Themas Energieeffizienz im GHD-Sektor bei. Ziel der Kommunikationsphase ist der Aufbau von Netzwerken in Form von Arbeitskreisen, in denen ein fachlicher Austausch hinsichtlich Energieeffizienzmaßnahmen stattfindet. Die dort kommunizierten Erfahrungen, können zum Abbau von Vorurteilen und Ängsten hinsichtlich

Energieeffizienz Maßnahmen führen. Als Initiator zum Anstoß solcher Arbeitskreise und branchenübergreifender Dialoge könnten Ausschüsse der IHK, die Kontakt zwischen den einzelnen Unternehmen herstellen. Weiter können mittels begehrter Leuchtturmprojekte inkl. integrierten Monitoring das Kosten/Nutzenverhältnis besser dargestellt werden.

### **Hemmnisse**

Die derzeit geringe Inanspruchnahme von Beratungsangeboten seitens der IHK durch kleine mittelständische Unternehmen ist auf die Fülle von Informationen rund um das Thema „Energieeffizienz“ zurückzuführen. Des Weiteren ist das Image des Themas „Energie“ im GHD Sektor meist negativ behaftet. Die meisten GHD-Betriebe verbinden mit Energie eine Pflicht oder eine Auflage die zu erfüllen gilt, sehen jedoch nicht die Chancen, die sich in diesem Themenfeld erschließen. Aufgrund der oben beschriebenen Hemmnisse ist eine klare gezielte Ansprache in denen das Kosten/Nutzen Verhältnis offen dargestellt wird von zentraler Bedeutung, um die Aktivität des GHD Sektors weiter zu erhöhen.

## 4.4 Industriesektor

Zum Industriesektor mit einem Stromverbrauch von 2.582 GWh im Jahr gehört größtenteils der Industriepark Höchst, welcher allein im Jahr 2012 einen Stromverbrauch von rund 1.800 GWh aufweist und somit einen Stromverbrauch von umgerechnet rund 600.000 Haushalten hat. Auf dem ehemaligen Werksgelände der Hoechst AG siedelten bis heute rund 90 Unternehmen mit 22.000 Arbeitnehmern an und werden unter dem Namen „Industriepark Frankfurt-Höchst“ zusammengefasst. Die Betriebe besiedeln eine Fläche von rund 4,6 km<sup>2</sup> und sind mehrheitlich der chemischen Branche zuzuordnen.

Die elektrische Versorgung des Parks ist bisher über ein Kohlekraftwerk realisiert und wird von drei Gasturbinen mit jeweils 45 MW<sub>el</sub> ergänzt. Die Energieversorgungsanlagen ermöglichen eine weitgehend energieautarke Versorgung und sind jeweils mit Kraft-Wärme-Kopplung ausgestattet.

Neben den Gasturbinen sind einige erneuerbare Energieerzeugungsanlagen im Industriepark Höchst installiert. Eine Biogasanlage erzeugt jährlich 80 GWh Strom, indem diese den Klärschlamm und die Abfälle des Industrieparks energetisch verwertet, ohne landwirtschaftliche Erzeugnisse zu vernichten. Seit 2011 ist die Bioerdgasaufbereitungsanlage in Betrieb und speist das erneuerbare Methan in das Gasnetz ein. Die Anlage spart somit jährlich 16.000 Tonnen Kohlenstoffdioxid ein. Für besonders heizwertreiche Brennstoffe aus Siedlungs- und Gewerbeabfällen steht neben der Biogasanlage auch eine Ersatzbrennstoffanlage bereit. Bei einer jährlichen Kapazität von 675.000 Tonnen Brennstoffen besitzt die Anlage eine Leistung von 70 MW<sub>el</sub> oder produziert 250 Tonnen Dampf, die im Versorgungsnetz des Standortes eingespeist werden können. Ebenso speist auch eine Klärschlammverbrennungsanlage in das Dampf- und Wärmenetz ein.

In der Abwasserreinigungsanlage befindet sich ein kleines Wasserkraftwerk, das aus potentieller Energie des Klärwassers am Auslauf immerhin eine elektrische Leistung von 30 kW regenerativ erzeugen kann.

Die Wasserstoffinfrastruktur am Standort verfügt über ein internes Hochdruck-Pipelinesystem und führt direkt zu einer Multi-Kraftstoff-Tankstelle. Über diese Tankstelle könnten rund 400 Busse mit Wasserstoff betrieben werden. In diversen chemischen Prozessen entstehen als Koppelprodukt 50 Millionen Normkubikmeter Wasserstoff wovon 30 Millionen Normkubikmeter für externe Zwecke genutzt werden können.

Im Folgenden werden Maßnahmen im Industriesektor für strombasierte Anwendungen dargestellt. Maßnahmen im Wärmesektor, insbesondere für die Prozesswärme werden im Kapitel Wärme berücksichtigt. Anhand Abbildung 78 wird die Anwendungsbilanz eines durchschnittlichen Industriebetriebs vorgestellt.

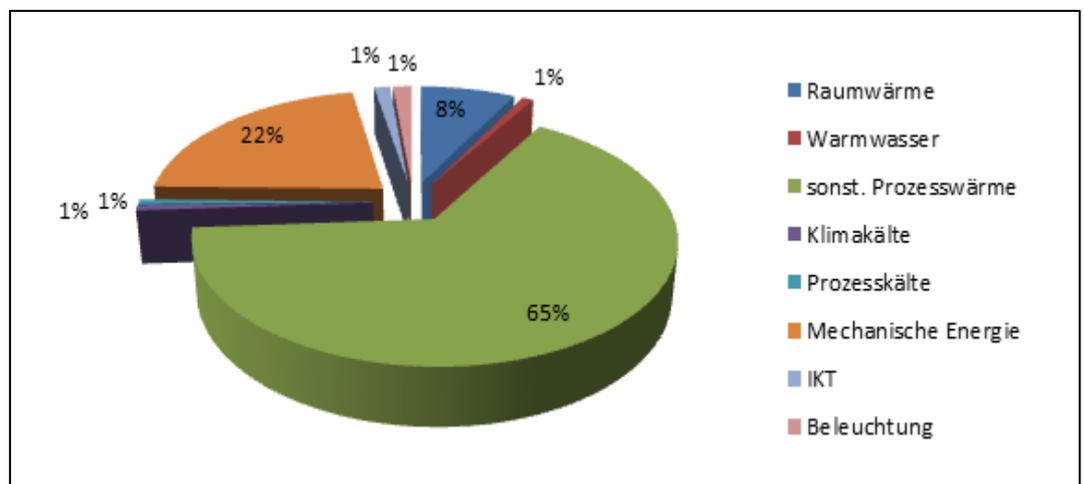


Abbildung 78: Anwendungsbilanz des Energieverbrauchs in der Industrie, Quelle (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2013)

Es wird deutlich, dass der größte Endenergieverbrauch für die Bereitstellung von Prozesswärme benötigt wird (65 Prozent). Der Strombedarf wird zum größten Teil durch mechanische Energieverbraucher (Motoren, Pumpen, Ventilatoren etc.) beeinflusst.

#### 4.4.1 Entwicklung von Effizienzmaßnahmen

In diesem Kapitel erfolgt die Vorstellung von Maßnahmen zur Reduktion des Stromeinsatzes in der Industrie. Dabei wird insbesondere auf die Prozesse der Chemiebranche als auch auf die Energiebereitstellung selbst eingegangen.

##### Effiziente Druckluft

Die chemische Industrie gehört gemäß der „Abschlussbroschüre Druckluft-Effizienz“ zu den großen Verbrauchern von Druckluft in der Industrie (Agricola, Radgen, & Zelinger, 2005). Der Leckageanteil beläuft sich in der Branche auf ca. 27 Prozent von der insgesamt erzeugten Druckluft. Das be-

deutet, dass mindestens ein Viertel der Druckluft ungenutzt beim Transport in den Rohrleitungssystemen verloren geht. Regelmäßige Kontrollen des Druckluftsystems auf Leckagen mit einem Ultraschall-Leckagesuchgerät sollen demnach in den Wartungsplänen aufgenommen und behoben werden. Nach Angaben des Industrieparks Höchst wurden in der Vergangenheit umfangreichen Maßnahmen zur Reduzierung der Leckagen vorgenommen. Die Einführung von Monitoringsystemen und eine monatliche Bilanzierung über Energiemanagementsysteme führten dazu, dass der Leckageanteil im Industriepark bei nahezu Null liegt.

Bei Betrachtung der Endenergieeffizienz von Druckluftsystemen stellt sich heraus, dass trotz weiterer Effizienzmaßnahmen wie Wärmerückgewinnung der Wirkungsgrad des Druckluftsystems nicht deutlich über 20 Prozent steigt (Pohl & Hesselbach, 2011). Daher sollte die Verwendung von Druckluft auf ein Minimum reduziert werden und nur dort, wo keine Alternative möglich ist, angewendet werden. Nach heutigem Stand der Technik ist es in den meisten Branchen generell möglich pneumatische Prozesse durch elektrisch betriebene Systeme zu ersetzen. Diese Substitution ermöglicht es die Endenergie direkt in Bewegungsenergie mit hohem Wirkungsgrad (> 90 Prozent) umzuwandeln.

### **Hemmnis**

Nach Angaben der Betreiber des Industriepark Höchst wurden größtenteils pneumatische in elektrische Systeme umgestellt. Dennoch kann aus unterschiedlichen Gründen wie beispielsweise aus Sicherheitsanforderungen (Explosionsschutz oder Ausfall der elektrischen Versorgung) nicht ganz auf Druckluft verzichtet werden. Neben diesen Anforderungen sind fehlende Informationen insbesondere in kleinen und mittleren Unternehmen als Hemmnis zu sehen.

### **Wirtschaftlichkeit**

Nach (Pohl & Hesselbach, 2011) amortisiert sich, die um 30 Prozent höhere Investition eines elektrischen gegenüber eines pneumatischen Systems, bereits nach 1,3 Jahren aufgrund der extrem hohen Betriebskosten von Druckluftsystemen.

### **Umweltwirkung**

Bei hohen Betriebsstunden (> 6000 Stunden, Drei-Schicht-Betrieb) kann die Ersparnis des elektrischen Systems gegenüber dem druckluftbetriebenen System bei rund 90 Prozent liegen.

#### *Einsatz von Hocheffizienzmotoren*

Mechanische Energie und somit Motoren für Kompressoren, Ventilatoren, etc. besitzen durchschnittlich den größten Anteil am Stromverbrauch in der Industrie. Nach (Plötz & Eichhammer, 2011) sind Elektromotoren für ungefähr 68 Prozent des industriellen Stromverbrauchs in Deutschland verantwortlich und somit auch für die Industrie im Frankfurt der bedeutendste Verbraucher

im Stromsektor. Abbildung 79 zeigt die Verteilung des Stromverbrauchs nach den typischen Verbrauchsanwendungen von Motoren.

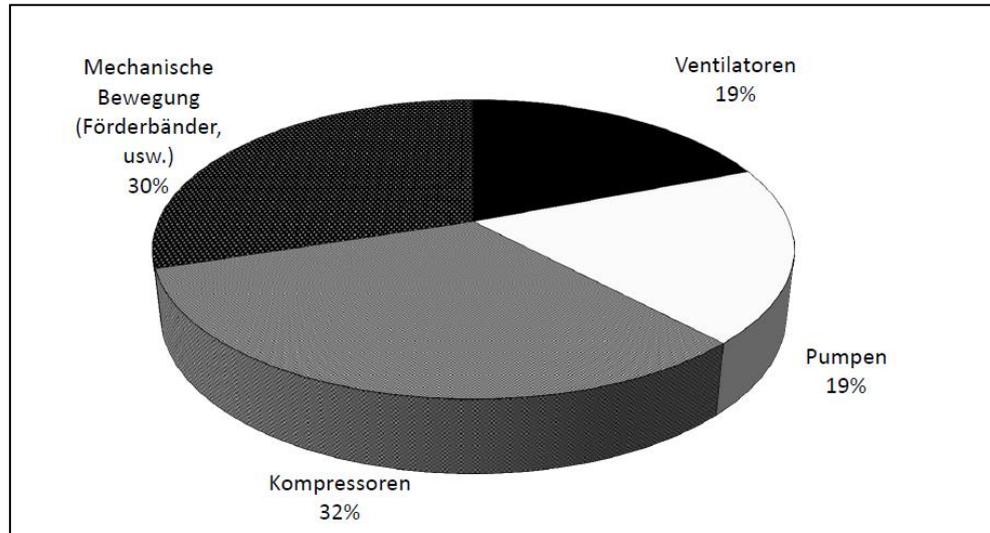


Abbildung 79: Aufteilung nach Verbrauchsanwendung von Motoren, Quelle: EuP Lot 30: Electric Motors and Drives, Task 2: Economic and Market Analysis, 2013

Eine effektive Möglichkeit ist es den Wirkungsgrad der Motoren zu verbessern, indem die vorhandenen Motoren durch hocheffizientere Modelle ersetzt werden. Weitere Vorteile nach (Kulterer, 2013) wären:

- Einsatzgebiet bei hoher Anzahl von Betriebsstunden in einem Lastbereich von über  $\frac{3}{4}$  der Last.
- Aufgrund besseren Temperaturmanagements im Motor halten die Motoren kurzfristig Überlastungen besser aus (bessere Anpassung an Anwendungsfall möglich)
- Geringere Temperaturentwicklung und leisere Belüftung
- Seit 2008 existieren einheitliche Effizienzstandards, basierend auf IEC 60034-30. Diese Klassen setzen sich wie folgt zusammen<sup>13</sup>:
  - IE4 Super Premium Efficiency
  - IE3 Premium Efficiency
  - IE2 High Efficiency
  - IE1 Standard Efficiency

In Europa sind hocheffiziente Motoren (IE3 und IE4<sup>14</sup>) bisher kaum verbreitet (Kulterer, 2013). Abbildung 80 zeigt die bisherigen Marktanteile von effizien-

---

<sup>13</sup> Die Effizienzklasse sind auf dem Typenschild der Motoren angebracht (<http://www.motorsystems.org/iec-standards>). IE4 wurde erst 2007 eingeführt und ist 15 % effizienter als IE3.

<sup>14</sup> IE-Standards sind höher und damit effizienter als EFF; EFF1 und EFF2 sind effizienter als EFF3

ten und hocheffizienten Motoren und verdeutlicht das noch zu hebende Einsparpotential in diesem Segment (Waide & Brunner, 2011).

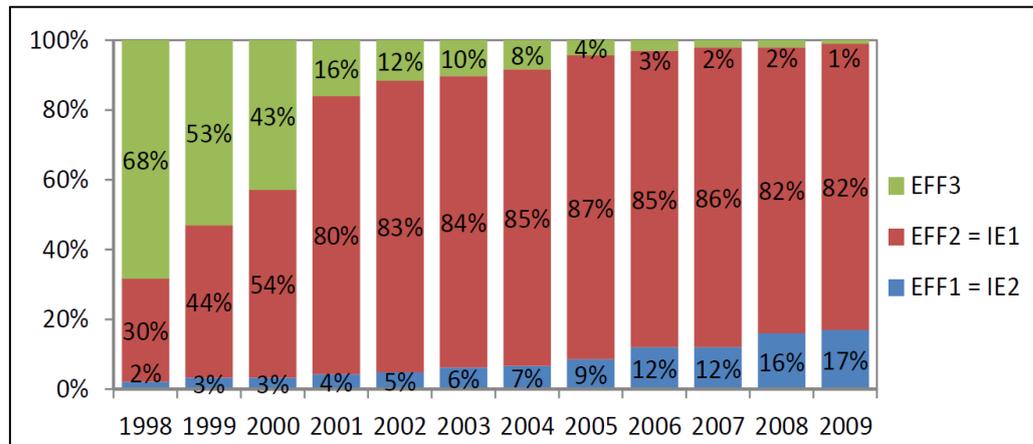


Abbildung 80: Marktanteile effizienter Elektromotoren in Europa, (Waide & Brunner, 2011).

Im Gegensatz zum europäischen und somit deutschen Markt sind auf dem amerikanischen Markt hocheffiziente Elektromotoren viel stärker verbreitet. Grund dafür sind die schon bestehenden Mindeststandards für IE3-Motoren. Als Hauptmaßnahme zur Reduzierung des Stromverbrauchs im Industriesektor gilt es die europäischen Mindeststandards bei der Effizienz von Elektromotoren weiter zu erhöhen. Weiter wäre die Ausarbeitung von Leitlinien in enger Kooperation mit der Industrie vorstellbar.

### Wirtschaftlichkeit

Die Energiekosten machen über 97 Prozent der Lebenszykluskosten von Motoren aus (Kulterer, 2013). Dies verdeutlicht wie wichtig hocheffiziente Motoren zur Reduzierung der Kosten sind.

### Hemmnis

Als Hemmnis kann der nicht voll ausgeschöpfte Mindeststandard auf europäischer Ebene sowie die oft übliche alleinige Betrachtung der Investitionskosten beim Kauf der Motoren angeführt werden. Aufgrund der deutlich geringeren Wartungs- und Betriebskosten hocheffizienter Motoren amortisieren sich die Mehrkosten der Investition nach wenigen Jahren.

### Umweltwirkung

Durch den Einsatz hocheffizienter Motoren können ökonomische Einsparungen bei Pumpen, Ventilatoren und Kompressoren von 20 Prozent, bei mechanischer Förderung (Fließbänder) in Höhe von rund zehn Prozent erzielt werden (Kulterer, 2013).

### Maßnahme

Abwrackprämie für ineffiziente Motoren in der Industrie

Da der Anteil von motorenbetriebenen Verbrauchern am gesamten Stromverbrauch bei über 70 Prozent liegt, sind Motoren (Ventilatoren, Pumpen,...) Hauptstromverbraucher in der Industrie und produzierenden Gewerbe. Als Maßnahme sollten nicht nur in neuen Betrieben hocheffiziente Motoren der neusten Effizienzklasse eingesetzt werden, sondern auch bestehende Betriebe zum Einsatz von effizienteren Motoren bewegt werden. Dabei kann eine Informationskampagne zu Stromverbräuchen von Motoren helfen. Weiter wird als Maßnahme vorgeschlagen eine Abwrackprämie für ineffiziente Motoren in Frankfurt einzuführen. Dabei sollte die Prämie in Abhängigkeit der Unternehmensgröße, wie Mitarbeiterzahl und Umsatz, gefördert werden.

### **Finanzierung**

Die Finanzierung könnte einerseits über einen Energieeffizienzfonds laufen oder durch Contracting oder Crowdfunding durch einen Dritten laufen, da hocheffiziente Motoren mit langen Laufzeiten sich schon nach wenigen Jahren (2-3) amortisieren und somit auch der Contractor als Investor in Effizienzmaßnahmen eine Marge erzielen kann.

### **Maßnahme**

#### *Netzwerke Energieeffizienz Industrie in Frankfurt etablieren*

Neben einem Netzwerk Energieeffiziente GHD Unternehmen gilt auch es ein Netzwerk Energieeffiziente Industrieunternehmen in Frankfurt zu etablieren. Hierbei gilt es wie beim GHD Netzwerk in den Austausch zu intensivieren und Best Practice Projekte aus Frankfurt und von außerhalb vorzustellen, um die Unternehmen zu motivieren. Folgende Abbildung zeigt einen Überblick des Instituts für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES), wie die einzelnen Phasen der Netzwerkbildung aussehen können. In der Startphase (Phase 1) werden die jeweiligen wirtschaftlichen Energieeffizienzpotentiale identifiziert und individuelle Ziele vereinbart. In Phase 2 wird der Erfahrungsaustausch durch regelmäßige Treffen intensiviert. Erste Ergebnisse in den jeweiligen Unternehmen zeigen erste Erfolge der durchgeführten Maßnahmen. In Phase 3 werden die Ergebnisse aller Unternehmen präsentiert und veröffentlicht.

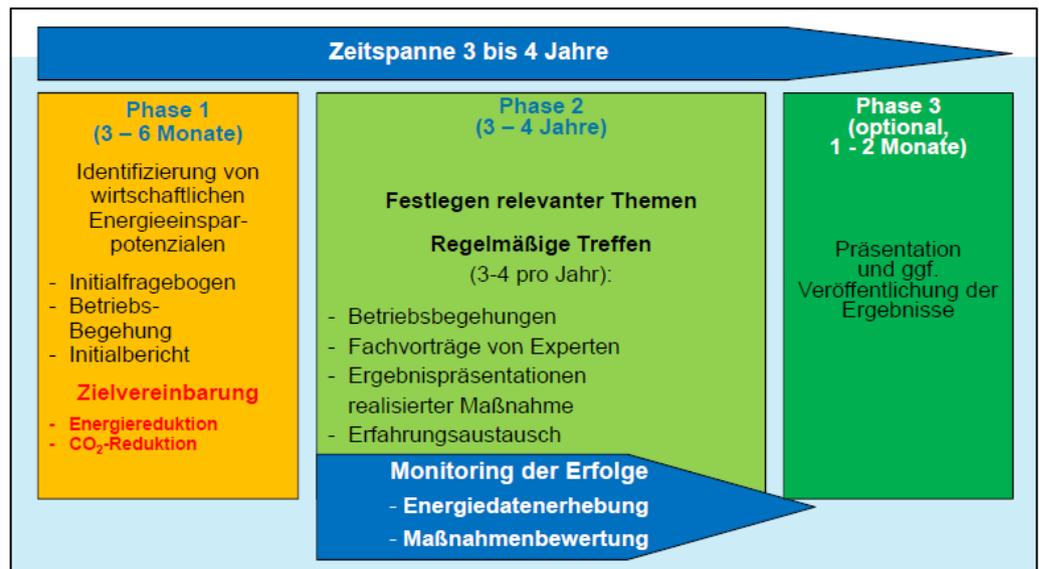


Abbildung 81: Phasen der Energieeffizienzberatung nach (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, IREES GmbH, TU Berlin, 2013)

### **Wirtschaftlichkeit/Finanzierung**

Die Projektkosten werden durch die beteiligten Unternehmen getragen. Räume und Organisation könnte das Energiereferat stellen.

### **Umweltverträglichkeit**

Es kann davon ausgegangen werden, dass rund 10 bis 20 Prozent des Energieverbrauchs in der Industrie durch wirtschaftliche Maßnahmen eingespart werden können.

### **Hemmnisse**

Die Hemmnisse für die Umsetzung von Effizienzmaßnahmen in der Industrie sind vielseitig (Abbildung 82). Als Haupthemmnisse mit der größten Relevanz sind nach (Jörg Meyer, 2013) fehlende politische Anreize, die jeweilige Marktsituation des Unternehmens und deren kurz- bis mittelfristigen Aussichten als auch die fehlende Finanzierung zu nennen. Anders als bei den oben beschriebenen Effizienzmaßnahmen (Austausch Motoren) scheitern viele andere Effizienzprojekte an zu langsamen Refinanzierung.

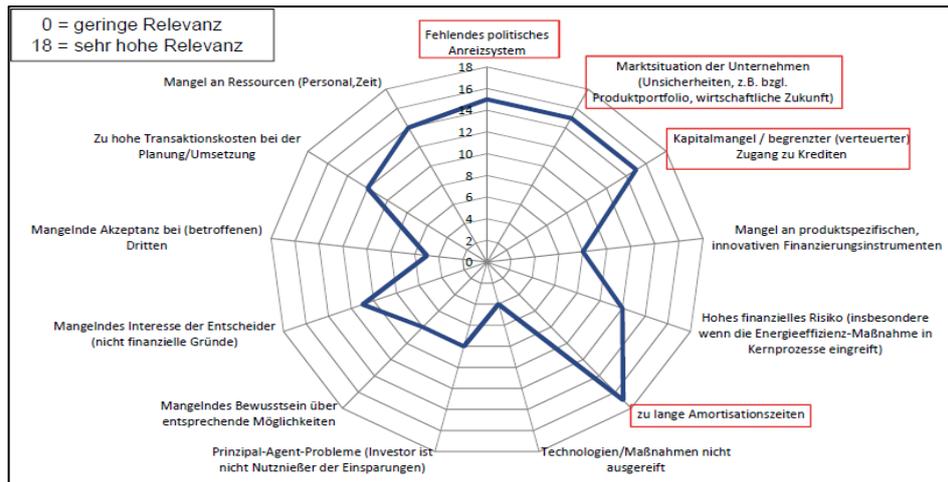


Abbildung 82: Hemmnisse zur Hebung von Effizienzpotentialen, Quelle: Jörg Meyer, Siemens AG.

### Gesamteffizienz im Industriesektor

Anhand der Studie vom Fraunhofer ISI und dem IREES kann bis zum Jahr 2035 eine Einsparung an Strom im Industriesektor von 15,6 Prozent bei einer normalen wirtschaftlichen Entwicklung erwartet werden. Diese Angabe kann jedoch nur als grobe Abschätzung betrachtet werden. Weitere künftige Möglichkeiten und neue Anwendungen bleiben unberücksichtigt. Auch eine Aussage über die Entwicklung des internationalen Handels und somit die Auswirkungen für den Frankfurter Standort sind in diesem Rahmen nicht möglich (Fleiter, Schlomann, & Eichhammer, 2013). Es wird angenommen, dass bis zum Jahr 2050 das Einsparpotential von 2035 auf rund 20 Prozent gesteigert werden kann.

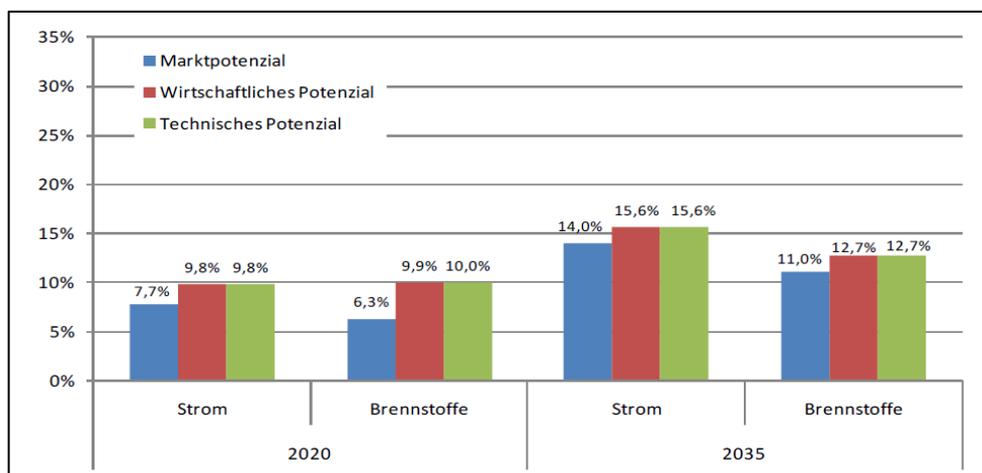


Abbildung 83: Einsparpotential in der Chemieindustrie bis zum Jahr 2020 bzw. 2035, Quelle: (Fleiter, Schlomann, & Eichhammer, 2013).

## 4.5 Fazit zur Stromeinsparung im Haushalts-, GHD- und Industriesektor

Insgesamt wurden 2010 rund 6.580 GWh Strom durch die Sektoren Haushalt, Gewerbe Handel und Dienstleistung und Industrie benötigt (Verkehr wird separat behandelt). Diese verursachten rund 4,04 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>. Durch die Umsetzung der vorgestellten Maßnahmen in allen Sektoren kann der Strombedarf um rund 30 Prozent reduziert werden. In Folge der erfolgreichen Umsetzung der nichttechnischen Maßnahmen und den rationellen Umgang mit Strom lässt sich der Strombedarf auf insgesamt rund 4.100 GWh reduzieren. Das Stromeinsparpotential beträgt somit in etwa 38 Prozent. Der zusätzliche Strombedarf aufgrund der Verbreitung von Elektrofahrzeugen im Verkehr sowie Wärmepumpen in der Wärmeversorgung wird hier nicht berücksichtigt.

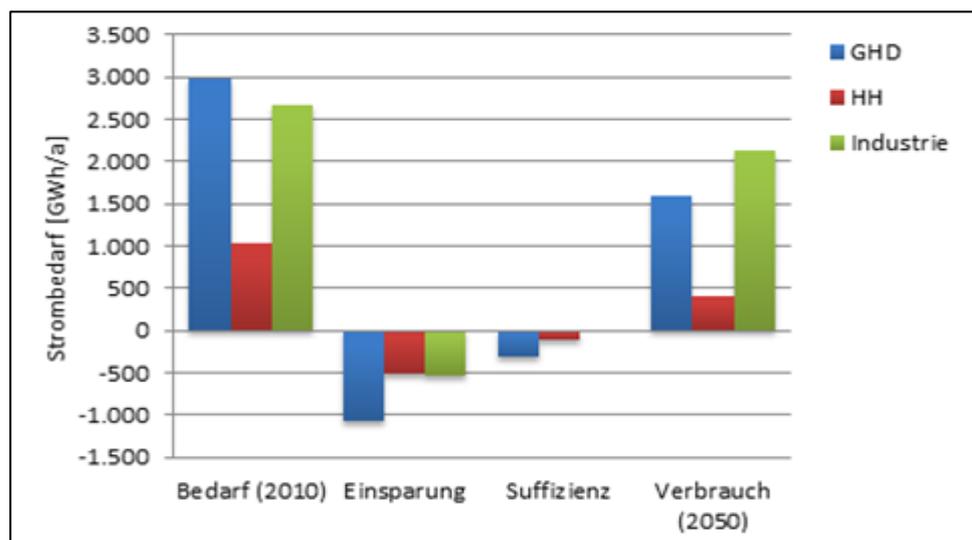


Abbildung 84: Zusammenfassung Stromverbrauch und Einsparpotential von Haushalten, GHD und Industrie in Frankfurt

## 4.6 Erneuerbare Energiepotentiale aus der Region in der Stadt-Land Interaktion

### 4.6.1 Stromverbrauch der Region

Die nachfolgende Abbildung 85 zeigt eine Abschätzung der Stromverbräuche für das Jahr 2010 im Gebiet des Regionalverbandes FrankfurtRheinMain. Das Gebiet mit einer Fläche von 14,755 qkm und 5,52 Mio. Einwohnern umfasst neben der Stadt Frankfurt und Offenbach, den Hochtaunuskreis, den Main-Taunus-Kreis, den Kreis Offenbach und mit den Main-Kinzig-Kreis, den Kreis Groß-Gerau und den Kreis Wetterau drei halbe Kreise ( FrankfurtRheinMain GmbH , 2015). Die Abschätzungen wurden in einem Bericht vom Fraunhofer IWES durch die Analyse der Bereiche Haushalt, verarbeitendes Gewerbe und Gewerbe / Handel / Dienstleistungen für die einzelnen Landkreise vorgenommen. Der Stromverbrauch wurde über die Gemeinden auf die Kommunen mit externen Datensätzen und eigenen Berechnungen abgeschätzt. Nach Abbildung 85, hat die Stadt Frankfurt am Main den höchsten Stromverbrauch (6.580 GWh) im Regionalverband. Der Kreis Offenbach hat mit 1.416 GWh den zweithöchsten Strombedarf, danach ordnen sich der Main-Kinzig-Kreis und der Main-Taunus-Kreis mit 8,5 Prozent (1.133 GWh) ein. Insgesamt liegt der Strombedarf des Regionalverband RheinMain bei 13.437 GWh.

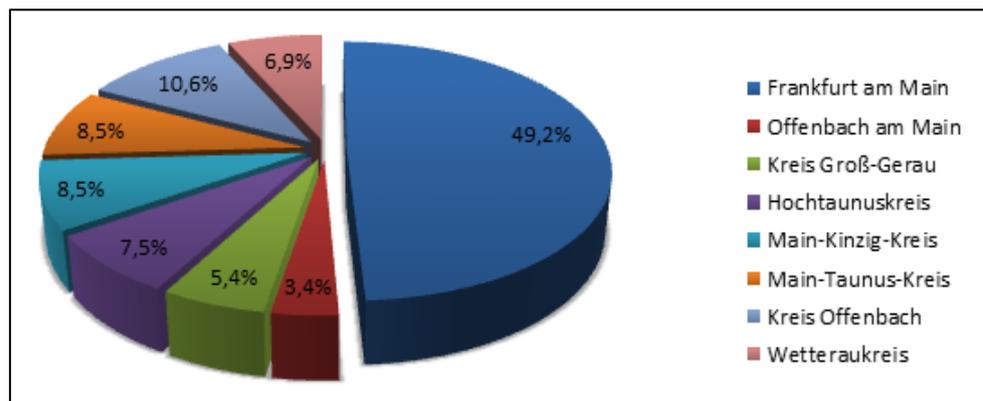


Abbildung 85: Gesamtverbrauchsabschätzung nach Landkreisen/Städte, Quelle IWES/KEEA Daten (2014).

### 4.6.2 Erzeugungspotential aus erneuerbaren Energien

Neben der Betrachtung des gesamten Strombedarfs der Region ist die Erzeugung aus erneuerbaren Energien Hauptbestandteil der Potentialanalyse aus dem Regionalkonzept. Nachfolgend werden die Potentiale der Stromerzeugung aus Photovoltaik, Windenergie und Biomasse/Biogas, die durch das Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesysteme ermittelt wurden, dargestellt. Es ist darauf hinzuweisen, dass das zeitliche Angebot erneuerbarer Energien oft nicht mit der Verbrauchseite kompatibel ist. Aufgrund der zeitlichen Verzögerung zwischen Einspeisung und Ausspeisung muss auf Technologien wie elektrische oder auch thermische Speicher zurückgegriffen werden, um die Ausschöpfung des Potentials zu maximieren. Weiter muss eine Anpassung der Verbraucherseite an die Erzeugung stattfinden (siehe Eigenstromlö-

sung S.70). Neben Maßnahmen auf der Verbraucherseite, kann durch die intelligente Steuerung und Zusammenschaltung unterschiedlicher EE-Erzeugungsanlagen (Virtuelle Kraftwerke) die Ausschöpfung erneuerbarer Energiepotentiale maximiert werden.

Nach der Vorstellung der EE-Strompotentiale werden diese den Stromverbräuchen bzw. zukünftigen Strombedarfen gegenübergestellt. Dabei ist stets darauf zu achten, dass der theoretisch mögliche Deckungsgrad eine vollständige Ausschöpfung der Potentiale berücksichtigt.

#### 4.6.3 Photovoltaik

Zur Nutzung der Photovoltaik wird das Potential zunächst in Aufdachanlagen, Fassadenanlagen und Freiflächen unterteilt. Die Methodik zur Berechnung der nutzbaren Dachflächen für die Aufdachanlagen nutzt die Gebäudegrundrissfläche, von der prozentuale Abzüge aufgrund von Dachtypen (Schräg-/ Flachdach), Flächennutzungsgrad, Verschattung und Anlagenausrichtung berücksichtigt werden. Die Fassadenflächen unterliegen ebenfalls dieser Systematik. Die exakten prozentualen Angaben sind aus der Literatur [Bericht IWES] zu entnehmen.

Da Wirkungsgrade der Photovoltaikanlagen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse der Potentialanalyse haben, werden die Potentiale mit Wirkungsgraden von 14 und 25 Prozent verglichen. In der ganzen Region beträgt das Potential zur Stromerzeugung auf Aufdachanlagen, Fassadenanlagen und Freiflächennutzung bei einem Systemwirkungsgrad von 14 Prozent rund 6.000 GWh. Es wird davon ausgegangen, dass durch die technische Entwicklung ein Gesamtwirkungsgrad von 25 Prozent durchaus realistisch erscheint. Damit würde sich das Potential aus Solarstromanlagen auf rund 11.000 GWh erhöhen. Theoretisch könnte somit der heutige Stromverbrauch des Regionalverbands zu 80 Prozent durch Solarstrom gedeckt werden. Welchen Deckungsanteil die Solarenergie an der Stromversorgung im Jahr 2050 übernehmen wird in Kapitel 8.5 „Energieszenarien für eine 100% erneuerbare Energieversorgung der Stadt Frankfurt am Main (KomMod4FFM) (Fraunhofer ISE) dargestellt. In Abbildung 86 wird die Auswirkung einer Wirkungsgradverbesserung bei Photovoltaikanlagen auf das Solarstrompotential in den Kreisen und Städten des Regionalverbundes dargestellt.

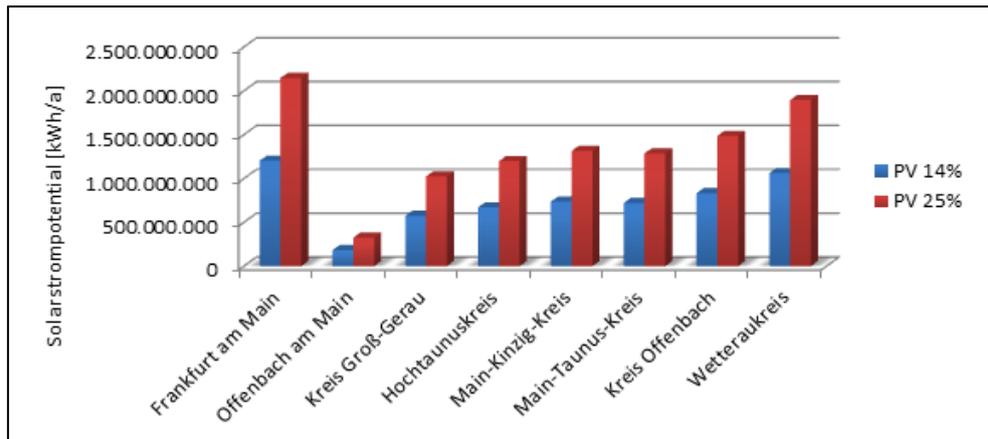


Abbildung 86: Vergleich zwischen 14 Prozent und 25 Prozent Wirkungsgrad, Quelle IWES/KEEA Daten (2014).

Das Solarpotential verteilt sich gleichmäßig auf die unterschiedlichen Landkreise, wobei die Stadt Frankfurt am Main mit 20 Prozent das größte Photovoltaikpotential besitzt. Bei einem Wirkungsgrad von 14 Prozent sind 1.201 GWh, bei 25 Prozent sind dies maximal 2.145 GWh Solarstrom auf den Dächern und Freiflächen der Stadt erzeugbar. Der Vergleich von Abbildung 87 und 73 zeigt, dass Frankfurt am Main das Photovoltaikpotential umliegender Landkreise benötigt, um den Eigenstrombedarf aus erneuerbaren Energien zu decken.

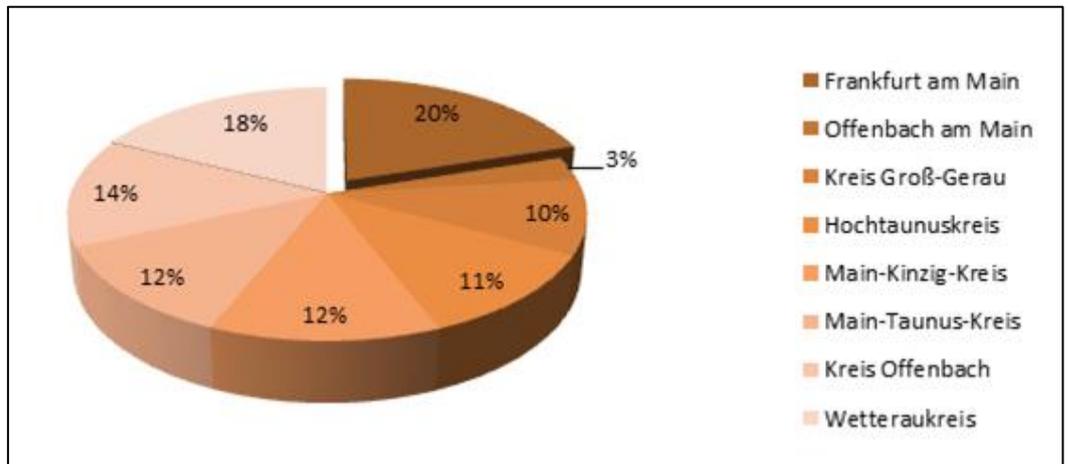


Abbildung 87: Gesamtpotential Photovoltaik nach Landkreisen, Quelle IWES/KEEA Daten (2014).

#### 4.6.4 Windenergie

Das Windpotential in allen Landkreisen beträgt ca. 576 GWh. Dies entspricht ca. 4,3 Prozent des Gesamtstrombedarfs im Regionalverband. Im Vergleich zur Photovoltaik ist das Potential an Windenergie relativ gering. Rechtliche Bestimmungen, wie beispielweise Mindestabstände zu Siedlungen führen zu einer Verringerung der nutzbaren Flächen zur Windenergienutzung. Aus den ermittelten Flächen und der von der Deutschen Energie-Agentur GmbH 2010 herausgegeben „Erntepotential“ von Windkraftanlagen in dieser Region von

sieben ha/MW ergibt sich ein technisches Leistungspotential von rund 300 MW.

Abbildung 88 verdeutlicht, dass die Installation von Windkraftanlagen in Ballungsgebieten wie Frankfurt und Offenbach aufgrund der Flugsicherheit derzeit ausgeschlossen ist. Potentiale aus Regionen südlich von Frankfurt sind aufgrund der dort herrschenden Windverhältnisse nicht wirtschaftlich zu heben. Dagegen verfügen der Hochtaunus-, Main-Kinzig-, Main-Taunus- und Wetteraukreis über Windkraftpotentiale. Im Wetteraukreis ist das Potential mit rund 413-GWh Windstrom am höchsten. Jedoch reicht das Potential nur aus um theoretisch 45 Prozent des Strombedarfs im Wetteraukreis (917 GWh) zu decken.

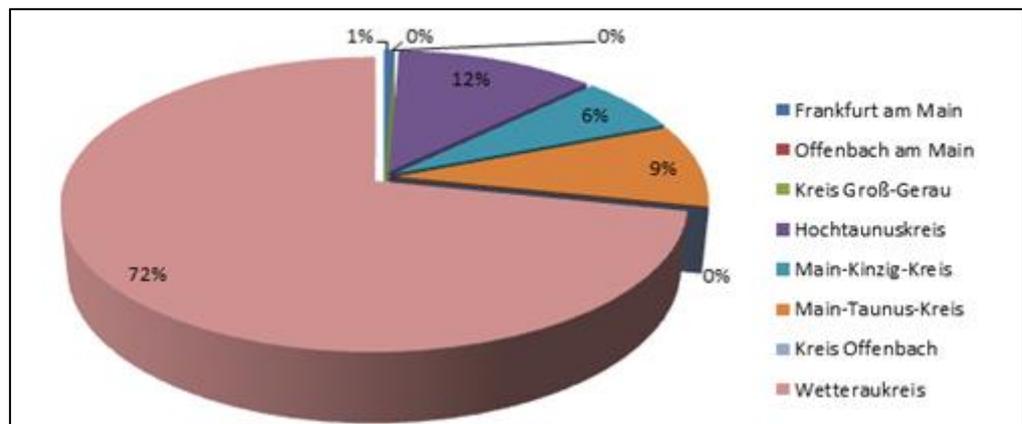


Abbildung 88: Windpotential nach Landkreisen, Quelle IWES/KEEA Daten (2014).

#### 4.6.5 Biomasse/Biogas

Die Grundlage zur Abschätzung des Strompotentials von Biomasse/Biogas beruht auf dem KomInteg-Projekt<sup>15</sup>, das Daten aus der Land- und Forstwirtschaftlichen Produktion beinhaltet. In diesem Abschnitt wird nur das elektrische Potential betrachtet, Treibstoffe und die thermische Nutzung fallen aus der Betrachtung raus.

Das elektrische Gesamtpotential bei der Nutzung von Biomasse im Regionalverband beträgt 1.024 GWh. Das sind 7,6 Prozent des Gesamtstromverbrauchs der Region. Der Wetteraukreis besitzt mit 25 Prozent (251 GWh) den größten Anteil. Der Anteil der Stadt Frankfurt am Main beträgt durch die Berücksichtigung von Abfallresten und Grünschnitt rund 18 Prozent (184 GWh). Diese werden heute schon fast vollständig genutzt (siehe Kapitel dezentrale Stromerzeugung in Frankfurt S.36). Die prozentualen Anteile des elektrischen

---

<sup>15</sup> IZES (2014): KomInteg. IZES. Online verfügbar unter <http://www.izes.de/deutsch/projekte-ab-2012/kominteg.html>, zuletzt geprüft am 09.04.2014.

Gesamtpotentials der Landkreise und Städte aus Biomasse wird nachfolgende in Abbildung 89 dargestellt.

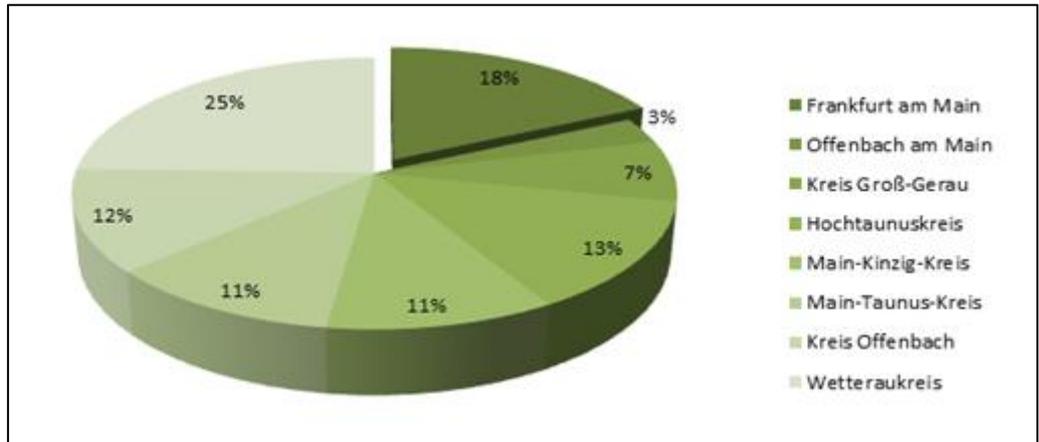


Abbildung 89: Elektrisches Potential der Biomasse in den Landkreisen, Quelle IWES/KEEA-Daten (2014).

Abschließend wird in Abbildung 90 der Stromverbrauch der Stadt Frankfurt und des Regionalverbandes (inkl. Frankfurt) für die Jahre 2010 und 2050 dargestellt. Demnach halbiert sich der Stromverbrauch des Regionalverbandes durch die Umsetzungen von Effizienzmaßnahmen bis 2050. In Frankfurt liegt das Einsparpotential bei rund 38 Prozent. Die Gegenüberstellung der Stromverbräuche und der gesamten technischen Potentiale aus Solarstrom, Wind- und Bioenergie zeigt, dass bei einem heutigen Verbrauchsniveau eine Deckung des Strombedarfs durch erneuerbaren Energien aus der Region nicht möglich wäre. In Frankfurt könnte lediglich ein Deckungsanteil in Höhe von 35 Prozent; im Regionalverband immerhin von 92 Prozent erreicht werden. Durch eine Reduktion des Strombedarfes durch die oben beschriebenen Maßnahmen, lässt sich der errechnete Strombedarf im Jahr 2050 lediglich im Regionalverband durch erneuerbare Energien decken. Die Stadt Frankfurt könnte allein durch die Effizienzmaßnahmen den Deckungsanteil auf 56 Prozent steigern. Im Regionalverbandes bestünde die Möglichkeit mehr erneuerbaren Strom zu erzeugen (184 Prozent) als zu verbrauchen.

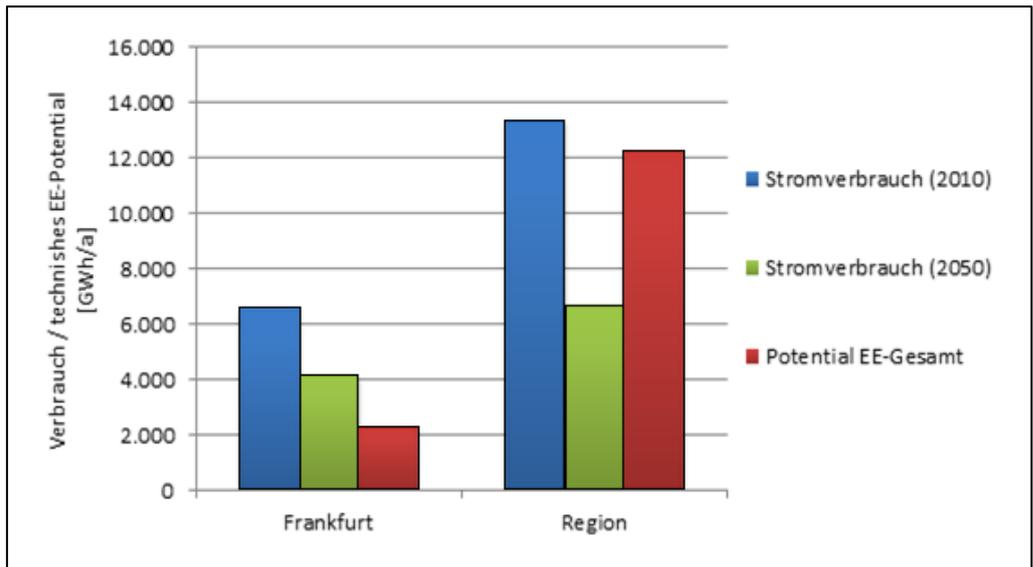


Abbildung 90: Vergleich der Stromverbräuche 2010 und 2050 für Frankfurt und der Region und deren EE-Potentiale, eigene Darstellung auf Grundlage von KEEA/lwes Daten (2014).

## 5 Maßnahmen – Energieeinsparpotentiale und Einsatz von erneuerbaren Energien im Sektor Wärme

### 5.1 Einsatz von erneuerbaren und dezentralen Anlagen in Wohn- und Nichtwohngebäuden

Im folgenden Kapitel werden die Einsatzmöglichkeiten von dezentralen erneuerbaren Energieanlagen in Wohn- und Nichtwohngebäuden beschrieben.

#### 5.1.1 Blockheizkraftwerke

Im Beschluss „Blockheizkraftwerke für Frankfurt“ der Stadtverordnetenversammlung von 1990 wurde der verstärkte Ausbau von Blockheizkraftwerken beschlossen. Unter den dezentralen Energieanlagen sind Blockheizkraftwerke (BHKWs) besonders effizient. Statt einer getrennten Erzeugung von Strom und Wärme, erzeugen BHKWs mittels Kraft-Wärme-Kopplung Strom und Wärme gleichzeitig. Dies ermöglicht Wirkungsgrade größer 90 Prozent.

#### **Maßnahmen**

##### Förderung des BHKW-Ausbaus

Der Einsatz von BHKWs in Wohngebäuden orientiert sich am Wärmebedarf der zu versorgenden Objekte. Bei Gebäudesanierungen muss der künftige Wärmebedarf mit in die Planung (Auslegung der Leistungsgröße) einbezogen werden. Je nach Situation und Leistungsgröße kann in Industrie- bzw. GHD-Anlagen eine stromgeführte Betriebsweise des BHKWs durchaus sinnvoll sein. Insbesondere bei wärmegeführten BHKWs (häufig in Wohnsiedlungen) ist der Zusammenschluss von Versorgungsobjekten für den wirtschaftlichen Betrieb der Anlage ausschlaggebend. Durch den Aufbau von kleinen Nahwärmenetzen können dezentrale Insellösungen in Stadtquartieren wirtschaftlich realisiert werden.

Neben den klassischen Versorgungskonzepten, kommt unter anderem den BHKWs eine entscheidende Integrationsrolle in der zukünftigen Energieversorgung zu. Vor dem Hintergrund einer zunehmend fluktuierenden Stromerzeugung aus Wind- und Sonnenenergie und den Ausbauzielen der Stadt Frankfurt (100 Prozent erneuerbarer Energien Anteil in der Strom und Wärmeerzeugung) können BHKWs aufgrund ihrer flexiblen Betriebsweise Engpässe in der Energieversorgung mit auffangen. Der damit erforderliche Auf- und Ausbau von Wärmespeichern ermöglicht somit die Interaktion zwischen Wärme und Stromerzeugung.

#### **Wirtschaftlichkeit**

In wieweit sich eine Flexibilisierung von BHKWs und der Einsatz von thermischen Speichern als wirtschaftlich interessant erweist, ist von den Rahmenbedingungen vor Ort, am Markt und somit von der Energiepolitik auf Bundesebene abhängig.

#### **Umweltverträglichkeit**

Um eine exergetisch hohe Qualität der Wärmeauskopplung sinnvoll zu nutzen sollten BHKWs insbesondere dort eingesetzt werden, wo Wärmepumpen derzeit aber auch künftig nur sehr ineffizient betrieben werden können. BHKWs sind zwar eine hocheffiziente Lösung, emittieren derzeit noch in Abhängigkeit der Energieträger CO<sub>2</sub>. Der Einsatz von Biogas und Holzgas könnte den CO<sub>2</sub>-Ausstoß von BHKWs auf ein Minimum reduzieren. Aufgrund der unten angesprochenen Nutzungskonkurrenz von Biomasse im Verkehr, Industrie und der Wärmeversorgung der Haushalte sollte die begrenzt verfügbare Biomasse stets in KWK-Anlagen effizient genutzt werden.

### 5.1.2 Solarthermie

Wie in Kapitel 3.4.5 steigt die Anzahl an solarthermischen Anlagen in Frankfurt stetig an. Allein zwischen 2010 und 2013 wurden rund 250 Anlagen auf den Dächern in Frankfurt installiert (Energierferat 2014). Ziel ist der weitere Ausbau der solarthermischen Anlagen bis 2050.

#### **Potentiale (lokale und regionale)**

Um den Anteil solarthermischer Wärme zu erhöhen, hat die FH-Frankfurt in Auftrag des Landes und der Mainova einen Solarkataster erstellt. Durch das öffentlich zugängliche Solarkataster lässt sich für jedes Gebäude das Solarpotential für Solarthermie- und Photovoltaikanlagen darstellen. Bislang konnten jedoch noch keine Rückschlüsse daraus gezogen werden, inwieweit das Solarkataster den Ausbau der Solaranlagen beeinflusst hat.

Nach dem Regionalkonzept des Fraunhofer IWES, der Klima und Energieeffizienz Agentur KEEA und dem Regionalverband Frankfurt Rhein Main liegt das technische Potential aus Solarthermie bei rund 6.283 GWh<sub>th</sub>. Zur Bestimmung der Potenziale für die Wärmegewinnung aus Solarthermie wurden die Flächen der Schrägdächer herangezogen. Mit Hilfe des Photovoltaic Geographical Information Systems (PGIS 2014) wurde die durchschnittliche Globalstrahlung für die geografische Lage von Frankfurt ermittelt. Bei einer Ausrichtung von ±50° ergibt sich dabei ein Wert von 1.225 kWh/m<sup>2</sup> pro Jahr. Sonnenkollektoren erreichen Wirkungsgrade von bis zu 75 Prozent. Rechnet man Verluste in Leitungen, Speichern, Pumpen etc. ein, so ergibt sich ein Systemwirkungsgrad von 45 Prozent (Henke, K. et al 2013). Das Potential der Flächen für Frankfurt allein beruht auf 2.514.784 m<sup>2</sup> was einem technischen Solarthermiepotential von 1.386 GWh<sub>th</sub> entspricht. Diese Fläche steht in direkter Nutzungskonkurrenz zur Photovoltaik. Beim Gesamtwärmeverbrauch (2010) von rund 11.713 GWh kann die Solarthermie somit einen theoretischen Anteil von 11,8 Prozent abdecken. Bei der Betrachtung wurde der Dampfbedarf der Industrie nicht berücksichtigt. Damit steigt der Anteil an Wärme aus Solaranlagen auf ca. 19 Prozent an.

Mit Hilfe des Solarkatasters Frankfurt<sup>16</sup> lassen sich die Potentiale zur Verwendung von Solarthermie abschätzen. Die nachfolgende Abbildung 91 zeigt einen Auszug aus dem Norden des Stadtteils Bockenheim. Die Gebäude zwischen der Sophienstraße und Mulanskystraße eignen sich sehr gut (rot) bis gut (orange) für die Nutzung von Solarthermie. Gelbe Gebäudedächer sind nur bedingt für die solare Nutzung geeignet.



Abbildung 91: Auszug des Solarkatasters der Stadt Frankfurt, Bockenheim.

## Maßnahmen

### Ausbau der Förderprogramme für Solarthermie

Um den Anteil der Solarthermie von unter einem Prozent bis zum Jahr 2050 deutlich zu steigern, bedarf es trotz reduziertem Wärmebedarfs im Jahr 2050 großer Anstrengungen bei der Umsetzung. Ein erster Schritt wurde mit der Solarpotentialanalyse bereits gegangen. Im nächsten Schritt sollte sich auf die Kostenreduktion und einen angepassten Zubau konzentriert werden. Durch das Aufsetzen von lokalen langfristigen Förderprogrammen seitens der Stadt und/oder die Fortführung des Marktanreizprogramms der Bafa kann den Unternehmen und Privatpersonen die Investitionsunsicherheit genommen werden. Die spezifischen Kosten der solarthermischen Anlage variieren mit der Quadratmeterzahl; je größer die Anlage, desto geringer die spezifischen Kosten. Größere Anlagen können auch wie Groß-Wärmepumpen ganze Straßenzüge oder kleine Quartiere versorgen. Weiter sollte bei der Planung ein maximierter solarer Deckungsanteil angestrebt werden; je höher der solare Deckungsanteil, desto wirtschaftlicher das Gesamtsystem. Demnach sind Solar Kollektoren insbesondere bei Nutzungstypen mit einem hohen über das Jahr konstant anfallenden Warmwasserbedarf besonders geeignet. Darunter zäh-

---

<sup>16</sup> zu erreichen unter <http://www.gpm-kom8.de/geoapp/solarkataster/frankfurt/>

len beispielsweise Hotels, Gaststätten, Jugendherbergen, Altersheime, Krankenhäuser, Sportanlagen oder Wohnheime.

### **Wirtschaftlichkeit**

Die Kosten für eine Kombi-Anlage belaufen sich auf durchschnittlich 700 €/m<sup>2</sup>, bei üblichen 15 m<sup>2</sup> Kollektorfläche sind das 10.500 €. Dieser Investitionsbetrag berücksichtigt alle Kosten – auch die Erneuerung des Speichers, der bei einer Heizungssanierung ebenfalls erneuert werden müsste. Nach Literaturangaben kann der Amortisationszeitraum bis zu 20 Jahre betragen. Eine Verkürzung der Amortisationszeit kann durch Preissteigerungen fossiler Energieträger, Lernkurveneffekte (sinkende Herstellungskosten) und einer angepassten Planung (siehe Maßnahmenbeschreibung) realisiert werden. Insbesondere ein hoher Warmwasserbedarf im Einklang mit der solaren Einstrahlung, die Größe der Anlage beeinflusst die Amortisationszeit stark. Restaurants, Hotels oder Pflegeheime sind typische Verbraucher bei denen ein hoher Warmwasserbedarf über das ganze Jahr vorhanden ist.

### **Umweltauswirkungen**

Im EFH lassen sich mit einer optimalen Auslegung einer Standardanlage (Solaranlage, Pufferspeicher und Gastherme) ca. 60 Prozent des TWW-Bedarfs und ca. 15 bis 35 Prozent des Gesamtwärmebedarfs decken. Hierzu ist das Know-How der ausführenden Firma von hoher Bedeutung.

Besonders geeignet sind solarthermischen Energiesysteme für die Trinkwarmwasserbereitung. Eine Integration bietet sich bei Dach- und Heizungssanierungsarbeiten bzw. Neubauten an. Der typische Warmwasserbedarf von 30 bis 40 Litern pro Person und Tag ist nahezu unabhängig ganzjährig durch eine ausreichend dimensionierte Anlage zu decken. Der Einsatz von Solarthermie zur Unterstützung der Raumheizung bietet sich hingegen nur in Verbindung mit einer Niedertemperaturheizung (45°C Vorlauftemperatur) in Neubauten und im sanierten Bestand an. Die Laufzeit der Raumheizung ist nahezu antizyklisch zur Sonneneinstrahlung und kann lediglich einen kleinen Beitrag zur Wärmeversorgung im Frühjahr und Herbst leisten. Die damit verbundene Einsparung an fossilen Brennstoffen liegt abhängig vom Standort zwischen 15 und 20 Prozent. Aus diesen Gründen ist der Fokus auf die TWW Erwärmung und die Beladung großer Thermischer Speicher (Nahwärmnetz) durch Solarthermie zu setzen.

### **Hemmnisse**

#### Fördersituation auf Bundesebene

Als Hindernis ist die Fördersituation auf Bundesebene anzuführen. In den letzten Jahren unterlagen die Forschungsgelder für Niedertemperatur Solarthermie Schwankungen. Unter den Erzeugungstechnologien ist der Anteil der zugesprochenen Fördergeldern für die Niedertemperatur Solarthermie am geringsten. Während PV insgesamt 35 Prozent, Wind 27 Prozent und Tiefengeothermie rund 15 Prozent der Fördergelder für EE des BMU zugesprochen kommt liegen die Forschungsausgaben für die Niedertemperatur Solarthermie

bei lediglich sechs Prozent. In Abbildung 92 wird die Verteilung der Fördergelder für Erneuerbare Energie durch das BMU von 2006 bis 2012 dargestellt.

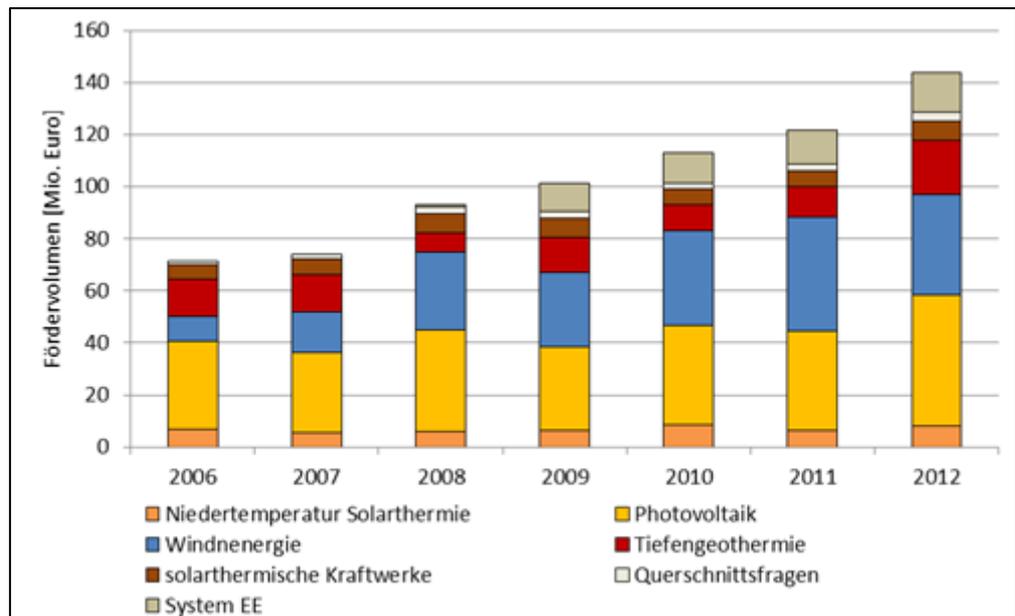


Abbildung 92: Entwicklung und Verteilung der Fördergelder des BMU für erneuerbare Energien von 2006 bis 2012, (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 2013).

Trotz der vergleichsweise geringen Förderung der Niedertemperatur Solarthermie konnten die Systemkosten in den vergangenen Jahren deutlich gesenkt werden. Aufgrund der oben aufgezeigten Förderpolitik des Bundes und der damit verbundenen Entwicklung der Photovoltaik, kann davon ausgegangen werden, dass bei höheren Forschungsgeldern für die Solarthermie die Systemkosten weiter sinken und sich damit die Wirtschaftlichkeit von Solarthermie stark verbessert.

#### Investor-Nutzer-Dilemma

Das Investor-Nutzer-Dilemma tritt bei allen energetischen Modernisierungsmaßnahmen (Dämmung, Austausch der Anlagentechnik, Integration von Erneuerbaren Energien) auf. Die Kernproblematik des Investor-Nutzer-Dilemmas liegt darin, dass Investor und Nutzer, der von der Investition profitiert, nicht dieselbe Person sind. Der Investor (Vermieter) geht mit der Finanzierung der Solaranlage in Vorlage und verrechnet diese rückwirkend auf den spezifischen Quadratmetermietpreis. Nach zwei Jahren möchte der Vermieter im Rahmen der örtlichen Vergleichsmiete die Mietpreise anpassen. Aufgrund der zuvor erhöhten Miete durch den Zubau der Solaranlage fällt die Anpassung wesentlich geringer aus. Damit trägt der Vermieter die Kosten der Solaranlage zum Großteil selbst.

#### Flächenkonkurrenz & Begrenztheit der Fläche

Die Dachausrichtung und der Denkmalschutz älterer Gebäude begrenzen die Flächen für solarthermische Kollektoren. Weiter stehen die verfügbaren, geeigneten Dachflächen in direkter Konkurrenz zur Flächennutzung mit der Photovoltaik. Abhängig vom Szenario bzw. der gewünschten und wirtschaftlichen Entwicklung der Versorgungssysteme müssten die verfügbaren Dachflächen für die Nutzung von PV und Solarthermie ausgewiesen werden. Hinsichtlich der Gesamtfunktionalität/ -effizienz sollte darüber nachgedacht werden, inwieweit Satzungen geändert bzw. erlassen werden könnten, mit der gezielte Ausbau gesteuert werden könnte.

#### Erhöhte Kosten durch Kran bzw. Gerüst

Die Installation einer großen solarthermischen Anlage auf Dächern oder in der Fassade erfordert den Einsatz eines Kranes oder Gerüsts, der eine deutliche Erhöhung der Installationskosten und folglich eine Verlängerung der Amortisation bedeutet.

#### **Maßnahmen zum Abbau von Hemmnissen**

##### Warmmietenneutralität unabhängig vom örtlichen Mietspiegel → Investor-Nutzer-Dilemma

Für eine erfolgreiche energetische Sanierung ohne drastische Mietsteigerung steht beispielsweise das Null-Heizkosten-Haus der LUWOG in Ludwigshafener Stadtteil Pflingstweide:<sup>17</sup>

„Die Mieter zahlen weiter so viel wie bisher für Miete und Wärme an die LUWOG. Dieser Betrag bleibt somit konstant, bis auf eine Art Inflationsaufschlag von zwölf Euro je Wohnung alle 15 Monate.“

Durch Verzicht auf eine Erhöhung und Senkung der Miet- und Heizkosten ist ein Kompromiss zwischen Investor (Vermieter) und Nutzer (Mieter) möglich, die eine energetischen Sanierungsmaßnahmen am Gebäude zulässt, die Mieter von zukünftigen Energiepreiserhöhungen entkoppelt, und zugleich eine übermäßige finanzielle Belastung der Mieter verhindert. Stattdessen werden die Investitionskosten durch die Differenz zwischen eingesparten Heizkosten und gleich bleibenden bis moderat ansteigenden (Inflationsaufschlag) Mieten langfristig abgetragen. Es ist kritisch zu beurteilen, dass der Mieter eine Art Flatrate durch den fixierten Mietpreis erhält. Somit würde verschwenderischer Umgang mit Energie zum Nachteil des Vermieters führen. Dieser trägt somit das Risiko der energetischen Modernisierung am Mietobjekt.

#### **Wirtschaftlichkeit / Finanzierung**

---

<sup>17</sup> <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/wirtschaftspolitik/null-heizkosten-haus-rundum-isoliert-wie-eine-thermoskanne-1410811.html> (06.11.2013)

Die Kosten für die Stadt Frankfurt befinden sich hierbei lediglich in der Öffentlichkeitsberatung und Bewerbung dieses Konzepts. Es fallen keine direkten Kosten für die wärmietneutrale Sanierung an.

### **Umweltverträglichkeit**

Durch eine wärmietneutrale Sanierung könnten in Zukunft Immobilien saniert werden, die bisher als unrentabel galten. Folglich erhöht sich insgesamt die Sanierungsrate. Langfristig werden der Energieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Frankfurter Gebäudebestands gesenkt.

### **Hemmnisse**

Zwischen Mieter und Vermieter kommt es oftmals zu Differenzen über die Anhebung der Miete nach vorgenommenen Energieeffizienzmaßnahmen am Wohnhaus. Für den Vermieter ist diese Mieterhöhung aber notwendig, damit er die Investitionskosten der Sanierung wieder einspielt und gleichzeitig Anreize gesetzt bekommt um überhaupt Sanierungen vorzunehmen. Infolgedessen werden oftmals notwendige und sinnvolle energetische Gebäudesanierungen nicht oder nur unzureichend vorgenommen (ausführliche Beschreibung der Hemmnisse auf Seite 159 - 163)

## 5.1.3 Wärmepumpen

Aufgrund der hohen Potenziale regenerativer Erzeugung aus den Primärenergiequellen Wind- und Solarenergie, wird die Nutzung von Strom für die Heizwärmeversorgung und Trinkwarmwasserbereitung von Gebäuden energetisch interessant. Da Wärmepumpen, anders als Stromdirektheizungen, einen wesentlich größeren Teil der Energie aus Umweltwärme (Wasser, Luft, Erdwärme) beziehen, stellen sie eine zunehmend umweltfreundliche Option zur Wärmeversorgung dar.

### **Maßnahmen**

#### Förderung zum Einsatz von Wärmepumpen im Neubau und Bestand

Neben Biomasse und Solarthermie sind Wärmepumpen einer der Haupthebel um den regenerativen Anteil im Wärmesektor zu erhöhen. Gerade im Winter, wenn die Wärmeerzeugung aus Solarthermie begrenzt ist, können Wärmepumpen einen wichtigen Beitrag zur Wärmeerzeugung leisten. Wärmepumpen können einzelne Objekte aber auch Gebäudeensemble in Kombination mit einem Nahwärmenetz effizient mit Wärme versorgen. Ausschlaggebend für die Effizienz und damit auch für die Wirtschaftlichkeit ist das Verhältnis aus der Summe der abgegebenen Wärme zu der zugeführten elektrischen Energie über das Jahr (Jahresarbeitszahl). Wie Abbildung 93 zeigt, wird die Effizienz der Wärmepumpenanlage maßgeblich durch die Temperaturdifferenz zwischen Umweltwärmequelle und Vorlauftemperatur im Heizkreis bestimmt. Ein Maß für die Effizienz der Wärmepumpe im realen Betrieb stellt die Jahresarbeitszahl (JAZ) dar. Nach dem Marktanreizprogramm (MAP) sind elektrisch betriebene Sole/Wasser- und Wasser/Wasser Wärmepumpen förderfähig,

wenn sie mindestens eine JAZ von 3,8; Luft/Wasser Wärmepumpen eine JAZ von 3,5 erreichen.

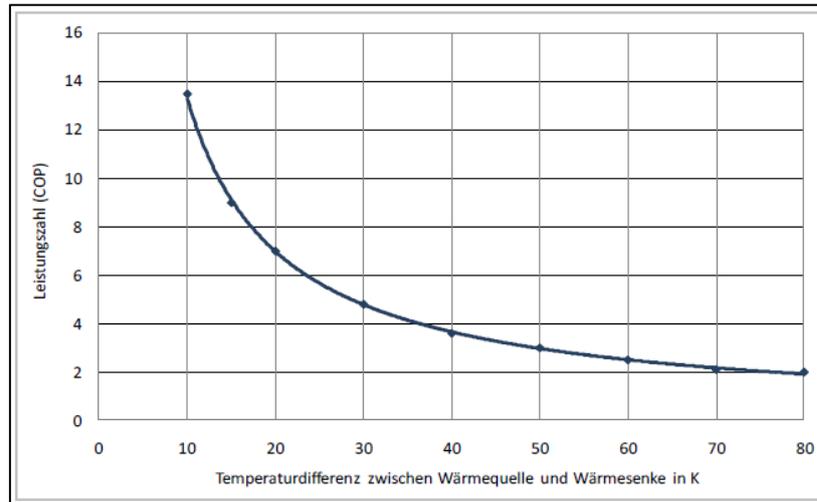


Abbildung 93: Theoretische Leistungszahl in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke, Quelle (Baumann, 2007).

Die Senkung der benötigten Vorlauftemperaturen kann zum einen über eine energetische Sanierung der Gebäudehülle, zum anderen durch einen Austausch der Radiatoren erfolgen. Dafür kommen vor allem großflächige Heizsysteme wie Fußboden-, Decken- oder Wandheizungen, die erst seit den 80er Jahren vermehrt in Wohngebäuden eingesetzt werden (Diefenbach, Cischinsky, Rodenfels, & Clausnitzer, 2010), sowie Niedertemperaturradiatoren und Konvektoren in Frage. In Gebäuden in denen energetische Sanierungen nur teilweise umsetzbar sind, können Hybridsysteme (z.B. durch eine Wärmepumpe in Kombination mit einem Gaskessel) in Betracht gezogen werden. Weiter sind die Freiheiten im Hinblick auf die Wahl der Wärmequelle meist größer. Der Verzicht auf Komponenten von fossil betriebenen Anlagen wie z.B. Schornstein, Gasanschluss, Öltank führen zu Kostenersparnissen. Aufgrund der relativ hohen Investitionskosten eignet sich ein konventionelles Wärmepumpensystem allerdings nur für Gebäude, die einen Heizenergiebedarf zwischen 40 und 79 kWh/m<sup>2</sup>a ausweisen (Niedrigenergiehaus). Auch die Kopplung einer Wärmepumpe mit einer solarthermischen Anlage oder Photovoltaik kann die Energiebilanz des Gebäudes weiter optimieren. Im besten Fall erzeugt die Anlage bilanziell mehr als der Bewohner verbraucht (Plusenergiehaus).

Aufgrund der benötigten niedrigen Vorlauftemperatur kommen Wärmepumpen nur für einen Teil der Bestandsgebäude in Frage. Um den Anteil an Wärmepumpen in die Breite zu treten, müssen dort wo möglich energetische Sanierung und Flächenheizungen nachträglich installiert werden (Bestandsgebäude). Alternativ könnte über den Einsatz von Hybridkollektoren in Kombination mit einer Wärmepumpe und Eispeicher nachgedacht werden, der die Umrüstung von Radiatoren auf Flächenheizungen egalisiert (siehe Maßnahme

„Kombination von Solarthermie und Wärmepumpe“) (Consolar - Solare Energieysteme GmbH, 2013).

Insbesondere in Bestandsgebäuden bei denen sich ein Fernwärmeanschluss aus ökonomischer als auch energetischer Sicht nicht lohnt, muss unter Berücksichtigung der begrenzt zur Verfügung stehenden Biomasse über den Einsatz von Wärmepumpen nachgedacht werden. Für das Beheizen und Kühlen von Nichtwohngebäudekomplexen, großen Mehrfamilienhäusern und Rechenzentren eignen sich Großwärmepumpe ( $>100$  kW). Gerade im Ballungsraum Frankfurt mit einem hohen Anteil an Mehrfamilienhäusern und großen Mehrfamilienhäusern (ca. 80 Prozent der vorhandenen Wohnfläche) sowie GHD könnten Großwärmepumpen einen Beitrag zur nachhaltigen Wärmeversorgung leisten.

Neben der Wärmesenke mit geringen Temperaturen ist die Wärmequelle mit möglichst hohen Temperaturen ausschlaggebend für die Effizienz einer Wärmepumpe. Wärmequellen sind vorrangig abhängig von der Verfügbarkeit, den gesetzlichen Rahmenbedingungen und dem Platzangebot. Aufgrund der unterschiedlichen Ausgangssituationen wird für Frankfurt am Main eine grundsätzliche Unterscheidung zwischen Stadtzentrum und Stadtrandgebieten vorgenommen. Im Stadtzentrum bietet sich als natürliche Wärmequelle vorrangig die Außenluft an. Das wärmere Mikroklima innerhalb der Stadt wirkt sich dabei positiv auf die möglichen Quellentemperaturen aus. Nach Angaben des HLOG (Abbildung 94) ist für den Osten der Innenstadt auch die Errichtung von Erdwärmesonden zulässig. Die Sonden werden meistens mit einer senkrechten Bohrung in 50 bis 100 Meter Tiefe eingebracht. Jedoch ist diese Technik in Ballungsgebieten aufgrund der dichten Bebauungsart nur schwer realisierbar. Weiter können Großwärmepumpen auch in das bestehende Fernwärmenetz eingebunden werden.

Eine leichter umsetzbare Möglichkeit zur Nutzung von Erdwärme stellt der Bau von Erdwärmekollektoren dar. Dabei werden die Absorberrohre großflächig in zwei bis drei Metern Tiefe verlegt. In städtischen Bereichen bieten sich dafür z.B. Parkplätze und Parkflächen an. Eine weitere natürliche Wärmequelle in Frankfurt stellt die Nutzung des Flusswassers des Mains dar. Ein realisiertes Projekt im städtischen Bereich findet sich beispielsweise in Bamberg (siehe Best Practice). Diese Option ist vor allem für größere Anlagen interessant. Weiter bietet sich im Zentrum von Frankfurt die Nutzung von verschiedenen künstlichen Wärmequellen an. So kann über einen Wärmetauscher in der Kanalwand dem Abwasser bzw. den U-Bahnschächten Wärme entzogen werden. Diese Option ist aufgrund der hohen Wärmedichte besonders für Ballungsgebiete interessant. Weiterhin kann Kühlwasser und Abluft aus industriellen Prozessen oder Rechenzentren genutzt werden. Ein wenn auch kleines Potential stellt die Nutzung der Abgase vorhandener BHKWs. Ebenso kann Wärme aus der Abluft von Lüftungsanlagen entzogen werden.

In den Randgebieten liegt der Anteil an Ein- und Zweifamilienhäusern deutlich höher als in der Innenstadt. Die Freiflächen sind größer und die Nutzung von Erdwärmequellen durch Sonden, Grundwasserpumpen und Kollektoren einfa-

cher zu realisieren. Wie aus Abbildung 94 ersichtlich, liegen die Gebiete für eine vorrangige Nutzung im östlichen und südwestlichen Randgebiet der Stadt.

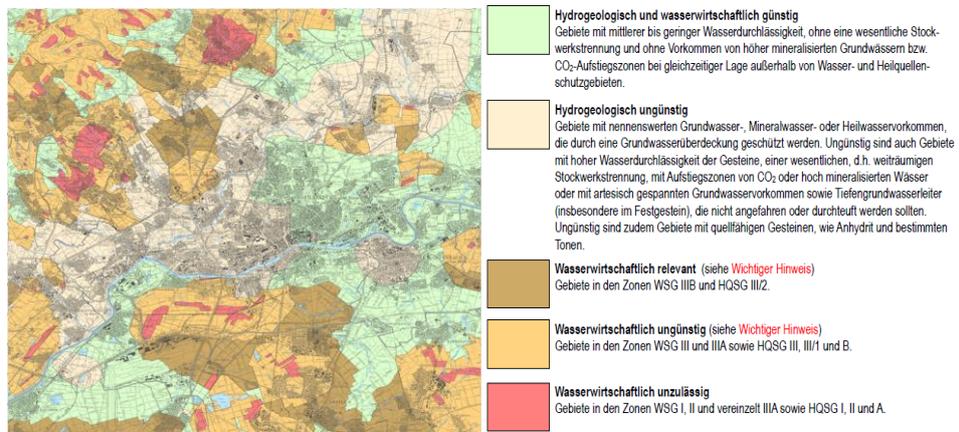


Abbildung 94: Hydrogeologische und wasserwirtschaftliche Standortbeurteilung für die Errichtung von Erdwärmesonden in Frankfurt, Quelle (Geologie, 2012).

### Kombination von Solarthermie und Wärmepumpe

Durch den kombinierten Einsatz einer solarthermischen Anlage mit einer Wärmepumpe und einem Eisspeicher kann die Effizienz der Wärmepumpe deutlich gesteigert werden.

Dabei werden als Kollektor sogenannte Solar- Luftabsorber eingesetzt. Neben den Wärmeeinträgen aus der solaren Einstrahlung entzieht der Kollektor Wärmeenergie aus der Umgebungsluft. Als Wärmequellen der Wärmepumpe wird ein Kombi- (Solaranlage) und ein Eisspeicher genutzt. Für die Nutzung des Eisspeichers ist weder eine Bohrung noch eine Baugenehmigung zu beantragen. Mit einem zehn m<sup>3</sup> großen Eisspeicher kann ca. der Energiegehalt von 100 Liter Heizöl gespeichert werden. In der Kombination mit einer Wärmepumpe (JAZ: 6) kann somit der Heizenergiebedarf eines Einfamilienhauses zu 100 Prozent gedeckt werden.

### **Funktionsprinzip**

Zu Beginn der Heizperiode bezieht die Wärmepumpe Energie aus den Luftabsorbieren der Kollektoren. Wenn die Außentemperatur unter 0°C sinkt wählt das Wärmequellen Management der Wärmepumpe den Eisspeicher als neue Wärmequelle. Dessen Volumen reicht aus, um den Heizbetrieb über den Winter zu 100 Prozent zu decken (Abbildung 95). Durch den Wärmeentzug gefriert das Wasser im Speicher.

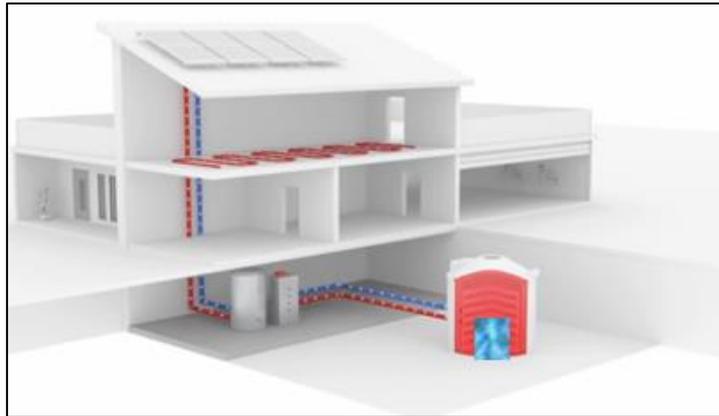


Abbildung 95: Betrieb eines Wärmepumpensystems mit Eisspeicher und Solarthermie während der Heizperiode, Bild: Viessmann.

In der Übergangszeit (Frühling) wechselt die Wärmepumpe die Wärmebezugsquelle vom Eis- zum Kombispeicher, der nun durch die Wärme aus den Solarkollektoren bzw. Luftabsorbieren gespeist wird. Nach Beendigung der Heizperiode wird der Betrieb der Wärmepumpe eingestellt. Die in den Kollektoren gewonnen Wärme in den Sommermonaten wird zur Warmwasserbereitung und für das Enttauen (Aufladen) des Eisspeichers verwendet. Zusätzlich ist in den Sommermonaten eine Kühlung über Flächenheizungssysteme mit dem Eisspeicher möglich. Der damit verbundene Kälteentzug führt zum Aufladen des Speichers (Abbildung 96).

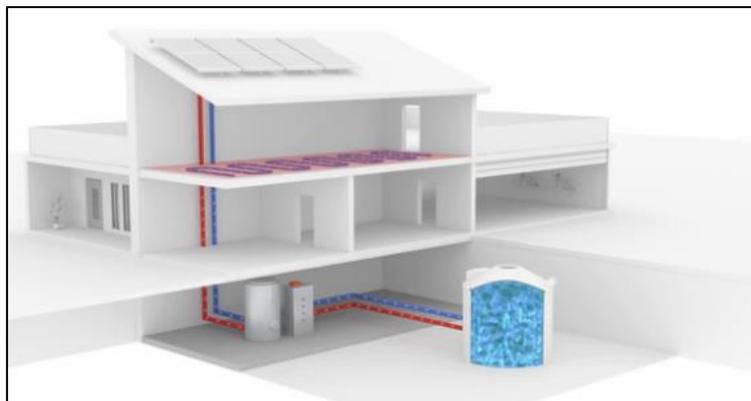


Abbildung 96: Betrieb eines Wärmepumpensystems mit Eisspeicher und Solarthermie während der Sommerperiode, Bild: Viessmann.

### **Wirtschaftlichkeit/Finanzierung**

Derzeit summieren sich die Kosten der Anschaffung eines Wärmepumpen-Eisspeicher-Solarthermie- Systems für ein Einfamilienhaus auf rund 27.000 Euro ohne Mehrwertsteuer. Die jährlichen Einsparungen (bei 50 Prozent Eigenstromnutzung der WP durch PV) liegen bei rund 1.000 Euro (Preise, Kosten: Stand 2013) gegenüber einer konventionellen Ölheizung. Damit ergibt sich eine Amortisationszeit von rund 27 Jahren gegenüber einer bestehenden Ölheizung (Eisheizung-GmbH, 2012).

Unter den aktuellen Bedingungen stellt sich die Maßnahme als unwirtschaftlich dar. Allerdings kann zukünftig mit sinkenden Kosten für Eispeicher und Solarkollektoren und steigenden Energiepreisen für konventionelle Brennstoffe gerechnet werden. Wird von einer Steigerung der Betriebskosten von jährlich vier Prozent in den nächsten 15 Jahren ausgegangen, verkürzt sich die Amortisationszeit auf 15 Jahre (Eisheizung-GmbH, 2012).

## **Maßnahme**

### Förderprojekt: Wärmepumpen im Lastmanagement

Wärmepumpen lassen sich als schalt- und steuerbare dezentrale Verbraucher in ein intelligentes Stromnetz einbinden. Der erzeugungsorientierte Verbrauch zur verbraucherseitige Steuerung des Lastgangs zur Leistungsregelung in elektrischen Netzen wird als Demand Side Management (DSM) oder Demand Response (DR) zusammengefasst. Unter dem Begriff der Laststeuerung wird dies in Deutschland in der Industrie und durch Nachtstromtarife für Elektro-speicherheizungen schon seit Jahrzehnten umgesetzt. Durch Speicherung in Warmwasserspeichern und der Gebäudemasse durch temporäre Überheizung können Wärmepumpen durch eine Lastverschiebung ein fluktuierendes Leistungsangebot ausgleichen und durch Speicherung eine zeitliche Entkopplung von Angebot und Nachfrage erreichen. Auch die Nachrüstung von Wärmepumpen für Trinkwarmwasserspeicher ab 300 Litern und Heizungspufferspeicher bei Solarthermie- und Pelletheizungen ist unter dem Aspekt des Lastmanagements sinnvoll.

In einer Studie der Institute Ecofys und Prognos (Nabe, et al., 2011) zum Einsatz von Wärmepumpen im Lastmanagement wird eine Minderung der abgeregelten EE-Einspeisung um 13 Prozent bis 18 Prozent prognostiziert. Die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen beträgt dabei bis zu minus 20 Prozent. In Simulationen, die am Fraunhofer-Institut für Bauphysik durchgeführt wurden, ergibt sich je nach Anlagen- und Gebäudekonfiguration eine mögliche negative Regelleistungsbereitstellung von fünf bis 15 Prozent des Gesamtenergiebedarfs.

Aufgrund der beschränkten Speicherkapazität eignen sich Wärmepumpen allerdings nur für eine Verschiebung im Stunden- bis maximal Tagesbereich. Für den Ausgleich mehrtätiger Lastschwankungen müssen andere Speicher (thermische oder elektrische) genutzt werden.

Für die technische Umsetzung der Ansteuerung der Wärmepumpen kommen mehrere Möglichkeiten in Betracht. Relativ kurzfristig umsetzbar ist die Nutzung der Rundsteuertechnik. Rund 60 Prozent der Anlagen sind bereits damit ausgestattet (Miara, 2012). Längerfristig umsetzbar ist der Aufbau einer entsprechenden Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) zur bidirektionalen Kommunikation. Für diesen Zweck zertifiziert der Bundesverband Wärmepumpe mittlerweile eine einfache Lösung mit dem Label „SG ready“. Die ökonomische Umsetzung kann durch ein Pooling der dezentralen Verbraucher und die Teilnahme am Regelleistungsmarkt zum Angebot negativer Minutenreserve oder sekundärer Regelleistung erfolgen. Der mögliche Betrieb durch einen Contractor kann ebenfalls ein interessantes Geschäftsmodell darstellen.

Weiter könnten flexible mehrstufige Stromtarife angeboten werden, um gezielt Anreize zur Steuerung der Pumpe beim Verbraucher zu initiieren.

### Eigenverbrauchserhöhung bei Wärmepumpen

Neben dem Einsatz von Wärmepumpen im Lastmanagement kann ein Ausgleich auch direkt zwischen Erzeugung und Verbrauch auf Gebäudeebene stattfinden. Durch die Einbindung der Wärmepumpe zur Gebäudeheizung und Trinkwassererwärmung kann der Eigenverbrauch einer PV-Anlage nach einer Studie der Fraunhofer IBP sowie SMA und Stiebel Eltron um rund 15 Prozent erhöht werden. Insbesondere die Abweichung zwischen der Einspeise- und Lastkurve der Trinkwarmwasserbereitung zeigt, dass durch den Einsatz einer Wärmepumpe in Kombination mit einem Warmwasserspeicher der Eigenverbrauch signifikant erhöht werden kann. Der wirtschaftliche Anreiz ergibt sich aus der sinkenden Vergütung von PV-Strom sowie den steigenden Strompreis am Markt.

### **Wirtschaftlichkeit/Finanzierung**

Bei Wärmepumpenheizsystemen fallen während der Nutzungsdauer verschiedenen Kostenpositionen an. Neben den Investitionskosten (Gerätekosten, Wärmequellenerschließung, Material und Montage) fallen in kontinuierlichen Abständen verbrauchs-(Strom) und betriebsgebundene- (Bedienung, Wartung, Inspektion) sowie sonstige Kosten (Versicherung) an. Für Wärmeversorgungssysteme wird standardmäßig eine Laufzeit von 20 Jahren angenommen. In (Miara, 2012) wird mittels Annuitätenmethode eine Vollkostenrechnung für verschiedene Heizsysteme in einem exemplarischen Wohngebäude mit 150 m<sup>2</sup> Wohnfläche, einem spezifischen Heizwärmebedarf von 70 kWh/m<sup>2</sup>\*a (Stand EnEV 2009) und einen Trinkwarmwasserbedarf von 1.875 kWh/a durchgeführt. Dabei werden die Heizsysteme Erdgas-Brennwertkessel, Holzpellet Kessel, eine Sole- und Luft-Wasser Wärmepumpe verglichen. Die Ergebnisse in Abbildung 97 zeigen, dass die jährliche Gesamtannuität für das Erdgas Brennwertgerät und die Luft-Wasser Wärmepumpe in einem ähnlichen Bereich liegen (ca. 2.500 €). Die Sole-Wasser Wärmepumpe weist eine jährliche Annuität von rd. 3.000 € und der Pellet Kessel von rd. 3.500 € auf. Weiter werden in Abbildung 97 die vergleichsweise hohen Investitionskosten der Wärmepumpensysteme gegenüber dem Erdgas-Brennwertsystem deutlich. Diese können jedoch über den Betrachtungszeitraum von 20 Jahren durch die deutlich geringeren betriebs- und verbrauchsgebundenen Kosten ausgeglichen werden. Die Einbindung der Wärmepumpe in ein Lastmanagement führt dazu, dass die verbrauchsgebundenen Kosten weiter gesenkt werden könnten.

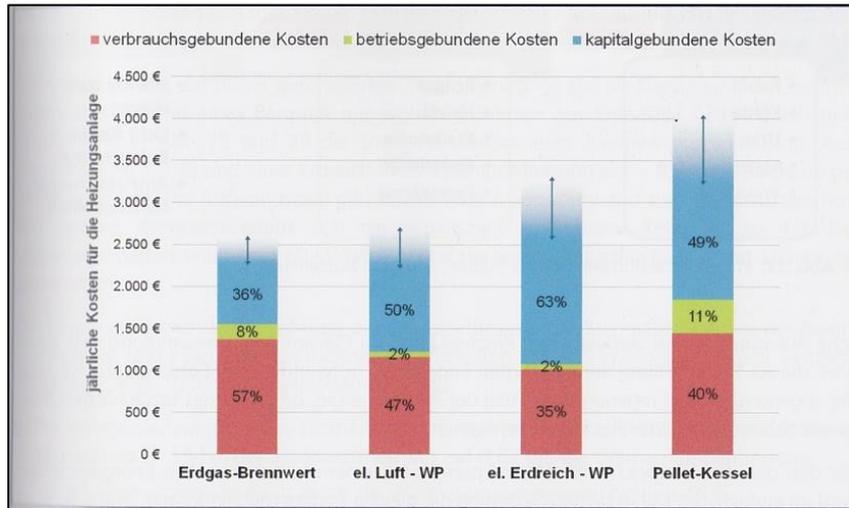


Abbildung 97: Kostenvergleich verschiedener Wärmeerzeuger Quelle (Miara, 2012)

Abbildung 97 zeigt, dass zu den derzeitigen Gaspreisen Wärmepumpen weiterhin nur durch die Förderung des Marktanzreizprogramms konkurrieren können. Dabei sind Wärmepumpen besonders dort zu erschließen wo Wärmequellen mit relativ hohen Temperaturen zur Verfügung stehen.

### Umweltauswirkungen

Die Umweltauswirkung einer Wärmepumpe wird durch die Effizienz der Wärmepumpenanlage und den Primärenergieaufwand des verwendeten Stroms definiert. Die Freisetzung von Treibhausgasemissionen ist demnach, anders als bei fossil betriebenen Kesseln, auf den vorgelagerten Kraftwerkspark verlagert und so direkt vom Mix im lokalen (Frankfurt) und deutschen Stromnetz abhängig. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Strommix von 2011 betragen 575 g/kWh CO<sub>2äq.</sub> nach (Nitsch, 2012). Bei einer Jahresarbeitszahl von 3,8<sup>18</sup> betragen die CO<sub>2</sub>-Emissionen je kWh Wärme:

$$\frac{575 \text{ g CO}_2/\text{kWh}}{3,8} = 151 \text{ g/kWh CO}_2 \text{ äq.}$$

Für eine Luft-Wasser Wärmepumpe mit einer förderfähigen Arbeitszahl von 2,8 betragen die CO<sub>2</sub>-Emissionen im derzeitigen Strommix

$$\frac{575 \text{ g CO}_2/\text{kWh}}{2,8} = 205 \text{ g/kWh CO}_2 \text{ äq.}$$

Damit liegen die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Wärmepumpe deutlich unterhalb der von Gas-Brennwert-Thermen (246 g/kWh CO<sub>2äq.</sub>) (IINAS) oder Heizöl-Brennwert Geräten (325 g/kWh CO<sub>2äq.</sub>) (IINAS). Die Pelletheizung mit rund 28 g/kWh CO<sub>2äq.</sub> (IINAS) liegt aufgrund der ausschließlichen Nutzung erneu-

<sup>18</sup> Mindestjahreszahl einer Wärmepumpe, um über das Marktanzreizprogramm gefördert zu werden.

erbarer Energien außer Konkurrenz. Mit einem steigenden Anteil erneuerbarer Energien im Strommix werden sich zukünftig die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Wärmepumpe weiter reduzieren, ebenso bei einem Einsatz in Lastmanagement zum Ausgleich hoher PV- und Windenergieeinspeisung. Auch bei der Nutzung der Wärmepumpe zur Erhöhung des Eigenverbrauchs liegen die CO<sub>2</sub>-Emissionen niedriger.

### **Hemmnisse**

Da Biomasse und Abfall (begrenzte verfügbares Potential) und Solarthermie während Heizperiode nur bedingt nutzbar ist, besitzen Wärmepumpen einen besonderen Stellenwert im künftigen Energiesystem. Derzeit besteht jedoch eine Vielzahl an Hemmnissen, die eher zu einem Marktrückgang der Wärmepumpen führen:

- Als ein wesentliches Hemmnis sind wohl die steigenden Stromkosten zu nennen, die die Wirtschaftlichkeit von Wärmepumpen mit geringer Effizienz stark reduzieren.
- Weiter kann die geringe energetische Sanierung der Anlagentechnik bzw. hier speziell im Verteilsystem als Hemmnis gesehen werden. Besonders Decken- und Wandheizungen sind den Installateuren nicht immer bekannt. Einfache und kostengünstige Systeme nicht überall vorhanden;
- Als Hemmnis kann auch die an der Haushaltssituation angepasste und damit von Jahr zu Jahr schwankende Förderung genannt werden. Im Gegensatz zum Strommarkt mit seinem EEG konnten langfristige Sicherheiten und damit ein Ausbau der Produktionsstätten nicht erfolgen. Soll nicht nur im Strommarkt der erneuerbare Energieanteil gesteigert werden, sondern auch im wesentlich größeren Wärmemarkt sind klare langfristige Fördermodelle unabdingbar.
- Als ein weiteres Hemmnis können enttäuschende Erfahrungen von Wärmepumpenbesitzern aufgrund von zu hoch gesetzten Erwartungen an die Energieeffizienz seitens der Wärmepumpenhersteller angeführt werden. Oft können beim Verbraucher geweckten Erwartungen hinsichtlich der Performance der Wärmepumpe nicht in der Praxis bestätigt werden. Dies ist zum Einem auf eine stark übertriebene Verkaufsstrategie und zum Anderem auf fehlendes Know-How bei der Planung und Umsetzung von ausführenden Firmen zurückzuführen. Langzeitmessungen des Fraunhofer ISE zeigen jedoch, dass die Jahresarbeitszahlen durchaus erreicht werden können.
- Als bedeutendes Hemmnis kann die grundsätzliche Erneuerung von Heizungsanlagen genannt werden. Heizungsanlagen werden in der Regel dann ausgetauscht, wenn die Altanlage nicht mehr funktionstüchtig ist. Dies passiert in der Regel im Winter und führt dazu, dass eine ähnliche Neuanlage ohne zusätzlichen Mehraufwand, welche schnell installiert werden muss, angeschafft wird. Die Antragsstellung und Installation von Sole-Wasser-Wärmepumpen ist demgegenüber besonders zeitaufwendig.

## **Maßnahmen zum Abbau von Hemmnissen**

### Fördermittel / vergünstigte Tarife für WP mit hohem COP

Der Zubau von Wärmepumpen sollte so gesteuert werden, dass Temperatur-senken zur Erhöhung der Vorlauftemperatur genutzt werden, um die Effizienz (COP) der Wärmepumpe deutlich zu erhöhen. Durch die verbesserte Effizienz sinken die spezifischen Wärmegestehungskosten. Steigende Strompreise fallen somit nicht so stark ins Gewicht. Weiter können Förderprogramme der BAFA „Förderung von effizienten Wärmepumpen“, die sich am COP der Wärmepumpe orientieren in Anspruch genommen werden. Hier könnte das Energierferat in Form einer Informationskampagne auf die Förderangebote aufmerksam machen. Eine andere Möglichkeit bestünde in einem von den Energieversorgern angebotenen, differenzierten Wärmepumpentarif, dessen Höhe sich an der Wärmepumpenquelle (Luft/Wasser, Wasser/Wasser, Sol-e/Wasser) und dem Anteil aus erneuerbaren Energien im Stromnetz orientiert. So würden besonders effiziente und emissionsarme Wärmepumpen gefördert.

### Früher Austausch alter Heizungsanlagen

Damit Eigenheimbesitzer nicht bei einem Ausfall während der Heizperiode eine neue Heizungsanlage installieren müssen, sollte eine Förderung so aufgestellt werden, dass Anlagen im Alter von beispielsweise 25 Jahren ausgetauscht werden müssen. Ein Kataster für den Heizungsanlagenbestand kann helfen um frühzeitig Bewohner auf einen möglichen Umtausch aufmerksam zu machen.

### Schulung/Qualitätssicherung des regionalen Handwerks

In Lehrgängen und Schulungen der Handwerkskammer wird den regionalen Heizungsinstallateuren die neue/alte Technik nähergebracht. Die fachmännische korrekte Installation einer Wärmepumpe bzw. Wärmepumpe mit Eisspeicher und Hybridkollektor in der Praxis runden das Schulungsprogramm ab. Beim erfolgreichen Abschluss erhält der Schulungsteilnehmer eine Zertifizierung. Unternehmen mit zertifizierten Mitarbeitern werden Interessenten bei Beratungsgesprächen mit dem Energiepunkt vorgeschlagen. Damit entsteht eine Win-Win Situation für alle Beteiligte. Der Interessent kann sich auf einen fachmännisch korrekten Einbau verlassen. Das zertifizierte Unternehmen hat durch die Empfehlung seitens des Energiepunktes eine verbesserte Auftragslage.

## **Best Practice**

### *Abwasserwärmepumpe (Bamberg)*

Die Umstellung der Energieversorgung im Zuge der energetischen Sanierung des Mühlenviertels in Bamberg kann als Beispiel für die Nutzung von Flusswasser zur Wärmegewinnung herangezogen werden. In Form einer Kleinwasserkraft Anlage mit 270 kW Leistung wird aus dem Fluss zunächst in mecha-

nischer Form Energie gewonnen. Der erzeugte Strom wird zum Betrieb einer Wärmepumpe eingesetzt, die als Wärmequelle das Abwasser nutzt. Dafür wird das Wasser über einen Plattenwärmetauscher (Abbildung 98) geleitet, der direkt als Verdampfer der Wärmepumpe fungiert. Die elektrische Wärmepumpe hat eine elektrische Anschlussleistung von 800 kW, die eine thermische Leistung von 2.400 kW bereitstellen kann. Über ein Nahwärmenetz werden unterschiedliche Altbauten sowie weitere nahegelegene öffentliche Gebäude versorgt. Ist kein Wärmebedarf vorhanden, wird der erzeugte Strom in das örtliche Verteilnetz eingespeist.



Abbildung 98: Verdampferplatten zur Wärmegewinnung Quelle (Stadt Bamberg).

#### 5.1.4 Bioenergie

Bioenergie nimmt unter den regenerativen Energieträgern eine Sonderrolle ein. Biomasse ist in fester Form wie Scheitholz, Pellets, Holzhackschnitzel oder in gasförmiger Form wie beispielsweise Biogas bzw. aufbereitetes Bio-Erdgas und in flüssiger Form (Biotreibstoffen) vorzufinden. Bei der Umstellung auf eine maximale regenerative Energieversorgung in den Sektoren Strom, Wärme und Mobilität kann Bioenergie in allen drei Sektoren eingesetzt werden. Bioenergie in flüssiger und gasförmiger Form kann vermehrt im Langenstreckenverkehr (Lkw, Schiff, Flugverkehr) eingesetzt aber auch verstromt werden und somit bestehende Erzeugungslücken zwischen Wind- und Solarenergie füllen. Im Wärmesektor ist die Biomasse anders wie die Solarthermie nicht von der zeitlichen Verfügbarkeit abhängig und kann durch Lagerung als energetischer „Speicher“ verstanden werden.

##### **Potentiale (lokal und regional)**

Beim Potential von Bioenergie kann zwischen innerstädtischer und regionaler Herkunft unterschieden werden. Unter innerstädtischer Biomasse werden meist Bioabfälle der Frankfurter Haushalte (Biotonne), gewerbliche Abfälle von Obst und Gemüse aus der Aufbereitung von Lebensmittelherstellern und

Grünschnitte, die beim Gartenlandschaftsbau oder in der Grünflächenpflege anfallen verstanden. Nach Angaben der Frankfurter Entsorgung-Service GmbH werden derzeit jährlich 30.000 Tonnen innerstädtische Biomasse verarbeitet. Diese setzen sich zu 17 Prozent aus Grünschnitt und 83 Prozent aus Bioabfällen zusammen (Entsorgungs- und Service GmbH Frankfurt, 2013). Die Umwandlung der Biomasse zu Biogas wird von der Rhein-Main-Biokompost GmbH ausgeführt. Somit können jährlich durchschnittlich rund 12.000 Tonnen Komposterde und 1,65 Mio. m<sup>3</sup> Biogas gewonnen werden (Rhein-Main Biokompost GmbH, 2013). Nach Schätzungen des Fraunhofer-Instituts für Windenergie und Energiesystemtechnik liegt das innerstädtische Bioenergiepotential bei ca. 169 GWh<sub>th</sub>. Weiter wird in Frankfurt Deponie- und Klärgas aus Mülldeponien und Kläranlagen gewonnen. Den Berechnungen nach bestünde hier noch ein ungenutztes Potential von rund 41 GWh Wärme. Demnach liegt das gesamte jährliche innerstädtische Wärmepotential aus Biomasse (Bioenergie + Klär- + Deponiegas) bei rund 210 GWh.

Das regionale Biomassepotential übersteigt das Innerstädtische um ein Vielfaches. Demnach können durch die Ausschöpfung des Biomassepotentials des Regionalverbandes Frankfurt RheinMain rund 1.225 Gigawattstunden Wärme bereitgestellt werden. Beim Klär- und Deponiegas beläuft sich das Potential auf ca. 72 GWh<sub>th</sub>. In Summe können rund 1.297 GWh<sub>th</sub> durch die Nutzung der regional verfügbaren Biomasse genutzt werden (Klima- und Energieeffizienz Agentur (KEEA), 2013).

Mit einem theoretischen Gesamtpotential (innerstädtisch + regional) von 1.507 GWh<sub>th</sub> könnte die Biomasse rund 13 Prozent des Gesamtwärmebedarfs von Frankfurt (Stand: 2010) decken. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Region selbst einen Eigenbedarf an Biomasse hat, um das sich das Potential reduziert.

## **Maßnahme**

### Priorisierung des Biomasseeinsatzes

Wie oben beschrieben muss aufgrund der Biomasseknappheit eine Priorisierung hinsichtlich des Einsatzes vorgenommen werden. Laut den Zielen der Stadt Frankfurt sollen bis 2050 alle Sektoren in Frankfurt zu 100 Prozent mit erneuerbaren Energien versorgt werden. In vielen Sektoren wie beispielsweise in den Haushalten kann zwischen Energieversorgungssystemen gewählt werden. Anders verhält es sich im Sektor Industrie. Dort wird häufig Dampf in Hochtemperaturprozessanwendungen benötigt (z.B. Chemieindustrie Temperaturen > 300°C). Die Bereitstellung von Dampf aus erneuerbare Energien erweist sich als schwierig. Einzig allein die Biomasse oder erneuerbarer Direktstrom verfügt über die exergetisch hochwertige Qualität diese Temperaturen durch Verbrennung oder Verstromung zu gewährleisten. Mangels Alternativen muss dem Einsatz von Biomasse in industriellen Hochtemperaturprozessen höchste Priorität eingeräumt werden. Anders ist eine ganzheitliche flä-

chendeckende Versorgung der Stadt Frankfurt mit erneuerbarer Energie nicht realisierbar.

Neben der Nutzung im Industriebereich ist der Einsatz von Biomasse in der Fernwärme in manchen Netzen nicht substituierbar. Biomasse sollte möglichst dort eingesetzt werden, wo die Netztemperaturen nicht weiter reduziert werden können. Die Bürogebäudekomplexe und Hochhäuser im Innenstadtkern von Frankfurt erfordern aufgrund ihrer hohen Wärmeabnahme und der Absorptionskühlung auch zukünftig den Anschluss an ein Dampfnetz (Mainova AG). Zusammengefasst lässt sich der Einsatz von Biomasse wie folgt priorisieren:

- 1) Industrieprozesse (Neben Power-to-Heat aus EE-Strom)
- 2) Dampfnetze (Neben Power-to-Heat aus EE-Strom)
- 3) Dezentrale KWK-Nutzung (Strom- und Wärmenutzung)
- 4) Objektversorgung in der peripheren Lage (Stadttrand)

### **Wirtschaftlichkeit**

Eine allgemein gültige Aussage zur Wirtschaftlichkeit von biomassebefeuelten Anlagen kann aufgrund der Heterogenität von Projekten nicht getroffen werden. Durch das Marktanzreizprogramm (MAP) werden Biomassekessel (Pellets, Holzhackschnitzel, etc.) für Einzelhaushalte sowie große Biomassekessel für Nahwärmenetze gefördert. Eine Betrachtung der Wirtschaftlichkeit muss somit projektspezifisch erfolgen.

### **Umweltverträglichkeit**

Gegenüber Erdgas Heizungen mit einem spezifischen CO<sub>2</sub> Äquivalent Emissionen (CO<sub>2</sub>eq.) von 252 Gramm pro Kilowattstunde werden die CO<sub>2</sub>e-Emissionen von holzartiger, gasförmiger und flüssiger Biomasse mit Null angenommen. Es wird davon ausgegangen, dass für die Aufbereitung (Aufzucht und Ernte) nur CO<sub>2</sub>-neutrale Techniken und Produkte eingesetzt werden. Weiter nehmen die Pflanzen, den bei der Verbrennung frei gesetzten Kohlendioxid, zuvor während ihrer Wachstumsphase aus der Luft auf.

### **Hemmnisse**

#### Begrenztheit und Nutzungskonkurrenz der Biomasse

Der Umstand, dass Bioenergie regenerativ aber dennoch begrenzt zur Verfügung steht und vielschichtige Einsatzmöglichkeiten bietet, führt zu einer konkurrierenden Nutzung der Biomasse zwischen den drei Sektoren. Dabei ist abzuwägen, in welchen Anwendungen bzw. Sektoren nicht auf Bioenergie verzichtet werden kann. Demnach muss in der Beschreibung der Szenarien eine Priorisierung für den Einsatz von Bioenergie vorgenommen werden.

#### Innerstädtische Feinstaubbelastung

Bei der Verbrennung von fester Biomasse (Stückholz, Pellet) entsteht eine höhere Feinstaubbelastung als bei der Verfeuerung von Gas. In dicht bebauten Stadtteilen kann es durch den Ausbau der Biomassekamine /-öfen zu Über-

schreitungen der Feinstaubgrenzwerte kommen. Des Weiteren hat die Anlieferung von Biomasse in Städten ein erhöhtes Verkehrsaufkommen und somit weitere Emissionen zur Folge.

#### 5.1.5 Einsatz von thermischen Speichern

Durch die Flexibilisierung des Strommarktes rücken Speicher immer näher in den Fokus der Betrachtung. Diese ermöglichen eine unterbrechungsfreie Stromversorgung an bewölkten und windstillen Tagen. Neben den Stromquartiersspeichern zur Netzunterstützung oder kleine Batteriespeicher zur Erhöhung der Eigenerzeugung, steigt die Bedeutung von Wärmespeichern. In Frankfurt befinden sich bereits installierte thermischer Speicher. Das Fernwärmenetz und die vielen kleinen Nahwärmenetze können aufgrund ihrer Wärmeaufnahmekapazitäten als Puffer betrachtet werden. In Kombination mit flexibel geschalteten KWK-Anlagen und Wärmepumpen kann durch ausreichend große Speicher eine Interaktion zwischen Strom und Wärmesektor realisiert werden.

Speziell für den Betrieb von Blockheizkraftwerken haben sich die ABGnova und Mainova AG in Frankfurt an das Demonstrationsprojekt „Virtuelles Großkraftwerk“ herangemacht. In diesem wurden zehn BHKW in verschiedenen Liegenschaften mit moderner Kommunikations- und Informationstechnologie ausgeschattet. Derzeit werden die BHKW wärmegeführt betrieben. D.h. die Wärmenachfrage der angeschlossenen Haushalte und Nichtwohngebäude bestimmen die Einschaltzeiten. Zukünftig soll die Betriebsweise von wärme- auf stromgeführt geändert werden. Dies bedeutet eine Anpassung der Betriebsführung an die Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien. Konkret würden BHKW dann anspringen, wenn nicht genug erneuerbarer Strom dem Netz zur Verfügung steht. Die dabei anfallende Wärme wird in thermischen Speichern zwischen gespeichert und bei Bedarf an die Haushalte weitergeleitet.

Für die Erhöhung des regenerativen Anteils an Wärme aus Strom (Wärmepumpe), Wärme aus Biomasse (BHKW mit Biogas bzw. KWK-Anlagen) und die Erhöhung des regenerativen Wärmeanteils ist der Ausbau von thermischen Speichern notwendig. Mit dem Ausbau großer saisonaler Wärmespeicher kann der solare Deckungsgrad in Straßenzügen und Quartieren von solarthermischen Großanlagen auf über 50 Prozent angehoben werden.

Neben dem Einsatz von Großwärmespeichern in Kombination mit solarthermischen Anlagen kann die Kopplung der Wärmepumpen an thermische Speicher die Fahrweise der Wärmepumpe weiter flexibilisieren.

Der Einsatz und die Betriebsweise von KWK-Anlagen stehen im direkten Zusammenhang mit thermischen Speichern. Bei stromgeführten Anlagen wird ein Speicher benötigt, um die unvorhergesehene Wärmeproduktion zu sichern. In Nahwärmenetze eingebundene KWK-Anlagen nutzen das Netz schon heute als Speicher. Durch das Speichern von Wärme, lassen sich die

Volllaststunden der KWK-Anlage erhöhen und damit deren Wirtschaftlichkeit verbessern.

Als technische Maßnahme gilt es künftig in Frankfurt geeignete Flächen für größere thermische Speicher zu finden. Da insbesondere im innerstädtischen Bereich die Erschließung großer unterirdischer Speicher nahezu unmöglich ist, können alternativ nicht mehr nutzbare Gebäude zum Wärmespeicher umfunktioniert werden, wie das Beispiel in Abbildung 99 des Bunkers in Hamburg zeigt.



Abbildung 99: Wärmespeicher im Bunker in Hamburg-Wilhelmsburg, Quelle: FAZ.

Innerstädtisch bieten sich meist größere Hinterhöfe oder auch Kinderspielplätze für unterirdische Speicher an. Soll der innerstädtische erneuerbare Energieanteil auf 25 Prozent erhöht werden, sind thermische Speicher notwendig. Die Simulationsergebnisse des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme (ISE) zeigen, dass bis zum Jahr 2050 der Bedarf an thermischen Speichern in Frankfurt abhängig vom Szenario auf 2,7 GWh - 4,2 GWh ansteigen muss (Vgl. 8.5), um die ehrgeizigen Ziele zu erreichen.

### **Wirtschaftlichkeit**

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Speichern erweist sich als schwierig. Meist hat der Einsatz von Speichern direkten Einfluss auf die Betriebsweise von Erzeugungsanlagen. Die Betriebsweise hängt unmittelbar mit der Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems zusammen. Damit beeinflussen Speicher auch die Wirtschaftlichkeit von Energieversorgungssystemen. Beispielsweise können durch die Installation eines Speichers die Volllaststunden einer KWK-Anlage erhöht werden. Neben einer erhöhten Betriebsstundenzahl lassen sich je nach Größe des Speichers weitere Anlagentechniken, wie beispielsweise ein Spitzenlastkessel, einsparen und somit die Gesamtwirtschaftlichkeit des Systems steigern. Den Einsparungen durch den Speicher, stehen Investitionskosten für die Errichtung gegenüber. Die Investitionssumme ist abhängig vom Standort und der Größe des Speichers. Eine unterirdische Einbettung, beispielsweise in einem Hinterhof oder Kinderspielplatz, ist mit kostenintensiven Aushubarbeiten verbunden. Aufgrund des zwingend erforderlichen Ausbaus

der Wärmespeicher in Frankfurt stellt sich die Frage der Wirtschaftlichkeit nicht immer primär.

### **Umweltverträglichkeit**

Die ökologische Bewertung eines thermischen Speichers ist abhängig vom Gesamtsystem. Führt der Einsatz des Speichers dazu, dass der Anteil erneuerbarer Energien gesteigert und gleichzeitig der Einsatz fossiler Brennstoffe reduziert wird, hat dieser eine positive Wirkung.

### **Hemmnisse**

#### Innerstädtisch begrenztes Platzangebot für thermische Speicher

Aufgrund der engen Bebauung insbesondere in der Innenstadt erweist sich die Integration und der Ausbau von thermischen Speichern als schwierig.

#### Errichtungskosten von thermischen Speichern

Aufgrund des geringen Platzangebots in der Innenstadt müssen Speicher unterirdisch angelegt werden. Eine unterirdische Einbettung beispielsweise in Hinterhöfen erweist sich aufgrund der Aushubarbeiten als kostenintensiv.

### **Best Practice**

#### *Nahwärmenetz mit Saisonalem Speicher in Hamburg-Bramfeld*

Ein passendes Best-Practice Beispiel ist die Aufrüstung des seit 1996 betriebenen solaren Nahwärmenetzes mit saisonalem Wärmespeicher in Hamburg-Bramfeld. Im Januar 2010 wurde der saisonale Wärmespeicher zu einem Multifunktions-Wärmespeicher erweitert. Neben der Wärme von 3.000 m<sup>2</sup> Kollektorfläche wird die Abwärme eines Müllheizkraftwerks zwischen gespeichert. Das Speichervolumen beläuft sich auf rund 4.000 m<sup>3</sup>. Durch die zusätzliche Abwärme aus dem Müllheizkraftwerk kann der Spitzenlastbedarf in Hamburg-Ost gedeckt und auf einen zusätzlichen Spitzenlast Heizkessel verzichtet werden (Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme, 2010).

## 5.2 Energetischer Standard im Neubau

Seit dem Beschluss der Stadtverordnetenversammlung vom Herbst 2007 werden stadteigene Gebäude nun mehr als Passivhausstandard mit einem spezifischen Heizwärmebedarf von 15 kWh/m<sup>2</sup> erbaut. Weiter bewirkt der Beschluss, dass beim Kauf eines städtischen Grundstückes der Bauherr den Passivhausstandard bei der Bebauung einhalten muss. Aufgrund des Beschlusses hat sich Frankfurt selbst zu Europas Passivhauhauptstadt berufen. Insgesamt wurden bis heute durch die Stadt und Wohnungsbaugesellschaften wie die ABG Frankfurt Holding über 2.500 Wohnungen, Schulen, Kindertagesstätten, Turnhallen und Bürogebäude in bzw. auf Passivhausbaustandard errichtet und saniert. Die kumulierte Nutzfläche aller in Frankfurt erbauten Passivhäuser betrug im Jahr 2014 rund 560.000 m<sup>2</sup>. Seit 2010, also allein in den letzten vier Jahren, konnte die im Passivhausstandard erbaute Nutzfläche um Faktor fünf

erhöht werden (Abbildung 100). Als eine der größten Wohnungsbaugesellschaften baut die ABG Frankfurt Holding nur noch nach dem Passivhausstandard.

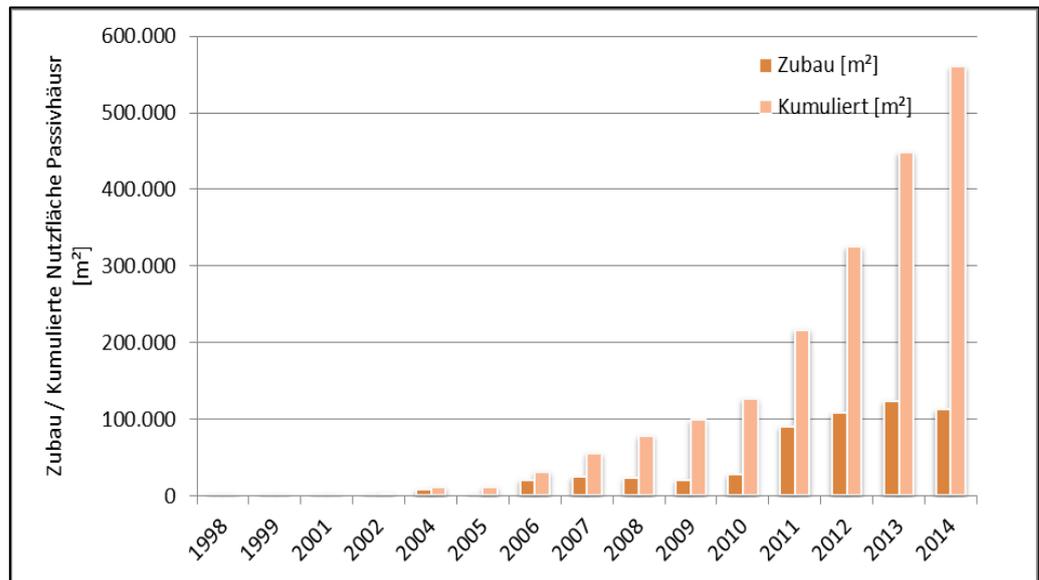


Abbildung 100: Entwicklung der jährlich zugebauten und kumulierten Nutzfläche nach Passivhausstandard in Frankfurt am Main, Quelle (Energierreferat der Stadt Frankfurt).

## Maßnahme

### Mindestens Passivhausstandard bei Neubauten

Als technische Maßnahme und deren Wirkung auf die errechneten Szenarien wird weiter von einer Fortführung des Passivhausstandards bei sämtlichen städtischen Neubauten und ab 2020 für alle anderen Neubauten ausgegangen. Dennoch sollte die Stadt sich weiterhin als Vorreiter bei den städtischen Neubauten positionieren, um den privaten Immobiliengesellschaften und Bauherren zu verdeutlichen, dass Ökonomie und Ökologie nicht zwingend im Widerspruch zueinander stehen. Im Maßnahmenzenario wird davon ausgegangen, dass ab 2020 die Anzahl an Fertigstellungen von Plusenergiehäusern zunimmt. Diese Gebäude erzeugen bilanziell mehr Energie als diese über das Jahr gesehen verbrauchen.

### Wirtschaftlichkeit

Nach Erfahrungswerten der ABG Frankfurt Holding liegen die Kosten eines Passivhauses rund fünf bis acht Prozent über den Kosten herkömmlichen Bauweise (EnEV 2015). Mit Ausblick auf die EnEV 2016 wird eine weitere Reduktion der Mehrkosten erwartet. Eine alleinige Betrachtung der Investitionskosten wäre zudem zu kurz gegriffen. Für einen aussagekräftigen Kostenvergleich müssen alle Kosten, die über den gesamten Lebenszyklus anfallen betrachtet werden. Aufgrund des sehr geringen Energieverbrauchs und steigen-

den Energiepreisen stellt das Passivhaus über den gesamten Lebenszyklus eine wirtschaftliche Alternative dar.

### **Umweltverträglichkeit**

Durch den Zubau von Neubauten in Passivhausstandard erhöht sich der Energiebedarf für Wärme und Strom nur minimal. Um als Passivhaus zertifiziert zu werden, sollte der Heizwärmebedarf 15 Kilowattstunden pro Quadratmeter bzw. einen Primärenergiebedarf von 120 kWh/m<sup>2</sup>\*a nicht überschreiten. Die Versorgung des Restenergiebedarfs erfolgt über die Lüftung mit Wärmerückgewinnung, die Nutzung von Rückläufen von Wärmenetzen oder Abwärme.

### **Hemmnis**

#### EU-Gebäuderichtlinie

Die Umsetzung der EU-Gebäuderichtlinie würde dazu führen, dass ab 2020 ausschließlich nearly-zero-emission-buildings gebaut werden dürften. Dieser Baustandard ist bisher noch nicht definiert.

#### Falsche Darstellung durch die Medien

Falsche Berichterstattungen führen dazu, dass private Bauherren der Errichtung eines Passivhauses häufig kritisch gegenüber stehen.

#### Mangelnde Qualität bei den ausführenden Firmen

Ein weiterer Punkt der zum schlechten Image von Passivhäusern beiträgt ist die mangelnde Qualität beim Bau durch die Firmen. Schulungen und Prüfungen können dabei helfen die Qualität der ausführender Firmen zu verbessern.

### **Maßnahmen zum Abbau von Hemmnissen**

#### Begehbare Sanierungsprojekte

Durch frei begehbare Modelle können den potentiellen Bauherren bestehende Bedenken genommen werden. Denkbar wäre die Errichtung von zwei Passivhäusern seitens der Stadt, in denen Familien wochenweise das Leben in einem Passivhaus testen können.

#### Qualitätssicherung im Handwerk

Analog zu der Qualitätssicherung bei energetischen Sanierungen zertifiziert die Handwerkskammer Firmen, die Erfahrung und Qualität beim Bau von Passivhäusern nachweisen können. Diese werden Passivhaus-Interessierten durch den Energiepunkt des Energierreferats weiter empfohlen.

### **Best Practice**

#### *(Mehrfamilienhaus Frankfurt)*

Als Best-Practice ist die Errichtung eines Mehrfamilienhauses in Passivhaus-Plus Standard im Stadtteil Gallus zu nennen. Das Architekturbüro Faktor zehn Gesellschaft für Siedlungs- und Hochbauplanung mbH aus Darmstadt wurde von der ABG Holding Frankfurt mit der Planung beauftragt. Bei dem Projekt

werden zusätzlich zu dem bisherigen Passivhausstandard folgende Maßnahmen berücksichtigt:

- Reduzierung des Energiebedarfs für die Warmwasserbereitung durch Absenkung der Warmwasser-Temperatur auf 45 Grad,
- Verringerung der Verteilverluste und Einbauten zur Reduktion des Wasserverbrauchs,
- Reduzierung des Hilfsstroms durch besonders energieeffiziente Anlagentechnik,
- Reduzierung des Strombedarfs der Haushalte durch Ausstattung der Wohnungen mit Geräten höchster Energieeffizienzklassen, energieeffizienter Beleuchtung (LED) und vereinfachter Abschaltung des Standby-Verbrauchs,
- Und besonders hervorzuheben: Informationsabende zur Reduktion des Energieverbrauchs, insbesondere des Haushaltsstroms für zukünftige Mieter.

Eine weitere Besonderheit ist die Vorbeugung gegen Legionellen im Trinkwarmwasser durch den Einsatz einer chemischen Desinfektion (Diaphragmalyse) und nicht durch ein erhöhtes Aufheizen des Warmwassers auf rund 60°C. Das reduzierte Aufheizen auf 45°C bewirkt, dass Wärmeverluste in der Hausverteilung und im Speicher aufgrund niedriger Vorlauftemperaturen gesenkt werden können.

### **Weitere Neubaustandards**

Neben dem Passivhaus sind sogenannte Plusenergiehäuser (bilanzielle Energieerzeugung liegt höher als der Energieverbrauch), Niedrigexergiehäuser (Gebäude mit sehr niedrigen Verteilnetztemperaturen und Niedertemperaturheizungen) und Solarhäuser mit solaren Deckungsgraden von 50 bis sogar 100 Prozent weiter zu etablieren. Zur Vereinfachung der Hochrechnung der Szenarien wurde von einer weiteren Unterteilung des Neubaustandards abgesehen.

## **5.3 Energetische Sanierung der Wohn- und Nichtwohngebäude**

Der Wärmeverbrauch ohne Witterungskorrektur in Wohn- und Nichtwohngebäuden ohne Industrie lag im Jahr 2010 nach aktualisierten Daten des Ifeu Instituts bei rund 7.407 GWh. Es wird angenommen, dass rund 15 Prozent der Wärme für die Bereitstellung von Warmwasser benötigt wird. Demnach konnte der Heizwärmeverbrauch gegenüber 1995 von 7.072 GWh trotz eines Anstiegs der Wohn- und Gewerbeflächen um ca. 11 Prozent auf 6.290 GWh (2010) reduziert werden. Dies entspricht einem jährlichen Rückgang des Heizwärmeverbrauchs um 0,7 Prozent. Trotz allem bedarf es einer Steigerung der Sanierungsrate um in Frankfurt die von dem Land Hessen als Ziel gesetzte Sanierungsrate von rund zweieinhalb bis drei Prozent p.a. zu erreichen (CDU Hessen und Bündnis 90/Die Grünen Hessen, 2013). Nach Berechnungen der Allianz für Gebäude-Energie-Effizienz (geea) sind rund 70 Prozent der Gebäude, die vor 1979 in Deutschland nicht gedämmt. Bei 20 Prozent ist die Dämmung unzureichend. Die restlichen zehn Prozent der in Deutschland befindlichen Altbauten verfügen über eine Dämmung, die den aktuellen Anfor-

derungen entspricht (Deutsche Energie Agentur, 2011). Der Übertrag der Situation auf Frankfurt zeigt, dass ein enormes Einsparpotential in der energetischen Modernisierung der Gebäude schlummert. Der Steigerung der Sanierungsrate stehen meist Hemmnisse und Barrieren von technischer und nicht-technischer Natur gegenüber. Auf diese wird nach der Darstellung des technisch möglichen Einsparpotentials näher eingegangen.

## Maßnahmen

### Energetische Sanierung von Wohn-und Nichtwohngebäuden

Im Rahmen der Maßnahmenbeschreibung kann nicht auf alle Stadtteile mit ihren unterschiedlichen Baualtersklassen und Nutzungstypen eingegangen werden. Die hier beschriebene Maßnahme zur möglichen energetischen Sanierung beruht auf der Voruntersuchungen des Ingenieurbüros Maaß und deren technisch möglichen Einsparungen durch energetische Sanierung. Basis der Untersuchung war die Tabula-Studie des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU) 2011. Diese klassifiziert Wohngebäude nach Gebäudeklassen und Baujahren.

Tabelle 3: Energetische Einsparpotentiale an Wohngebäuden, eigene Darstellung (IBP)nach (Ingenieur Büro Maaß 2011).

	EFH		ZFH		GMH/MFH	
	[kWh/(m <sup>2</sup> *a)]					
	unsaniert	vollsaniert	unsaniert	vollsaniert	unsaniert	vollsaniert
bis 1860	293	100	283	85	193	68
1861-1918						
1919-1948	267	85	257	72	132	58
1949-1957	295	94	285	80	155	64
1958-1968	295	94	285	80	155	64
1969-1978	237	92	227	78	132	63
1979-1983	167	80	143	68	107	54
1984-1994	146	80	124	68	90	54
1995-2001	128	80	107	68	78	54
2002-2012	108	79	92	67	67	53

Nach Berechnungen des Fraunhofer IBPs würde sich bei einer konsequenten Umsetzung der energetischen Sanierung in allen Baualtersklassen und Nutzungstypen (EFH, ZFH, MFH, GMH) der Wärmeverbrauch allein bei den Wohngebäuden um 62 Prozent auf 1.627 GWh reduzieren. Dies würde einem jährlichen Rückgang des Wärmeverbrauchs von 2,4 Prozent entsprechen. Gegenüber dem bisherigen Trend von jährlich 0,7 Prozent (1995 und 2012 trotz steigender Flächenentwicklung) müsste sich die energetische Sanierung mehr als verdreifachen. Dennoch hat Frankfurt eine überdurchschnittliche Ein-

sparquote. Zum Vergleich liegt die durchschnittlich jährliche Wärmeeinsparungsrate in Deutschland bei minus 0,2 Prozent (Destatis, 2008). Um die Einhaltung der Klimaziele zu gewährleisten, sollte die Sanierungsrate immer in Zusammenhang mit fest definierten Sanierungsstandards (bspw. Passivhausstandard) gekoppelt werden.

### **Wirtschaftlichkeit**

Die Wirtschaftlichkeit einer umfangreichen energetischer Modernisierungen ist für viele Eigentümer nicht attraktiv genug. Einer hohen Investitionssumme steht meist eine lange Amortisationszeit gegenüber (siehe Hemmnisse). Durch die Aufklärung über Mehrkosten effizienter Sanierungen ggü. sogenannter „Sowieso- und Gesamtkosten“ kann die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit deutlich gesteigert werden.

### **Umweltverträglichkeit**

Die Umweltverträglichkeit einer energetischen Sanierung ist durchweg positiv zu bewerten, wenn umweltverträgliche (recyclebare Dämmstoffe) verwendet werden. Insgesamt kann durch eine energetische Modernisierung der Wohn- und Nichtwohngebäuden der Wärmebedarf um rund 62 Prozent reduziert werden.

### **Hemmnisse**

Durch die Heterogenität hinsichtlich des Eigentumsverhältnisses (Mieter, Vermieter, Wohneigentümergeinschaften und die unterschiedlichen Generationen (Alter) gibt es eine Reihe an Hemmnissen und Barrieren, die einer energetischen Modernisierung im Wege stehen.

In Abbildung 101 werden die meist genannten Barrieren einer energetischen Sanierung auf Seiten der Eigenheimbesitzer aus Umfrageergebnissen des (Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE), Hochschule Lausitz/Senftenberg, 2010) zusammengefasst. Diese wurden nach der genannten Häufigkeit in eine Matrix eingeteilt.

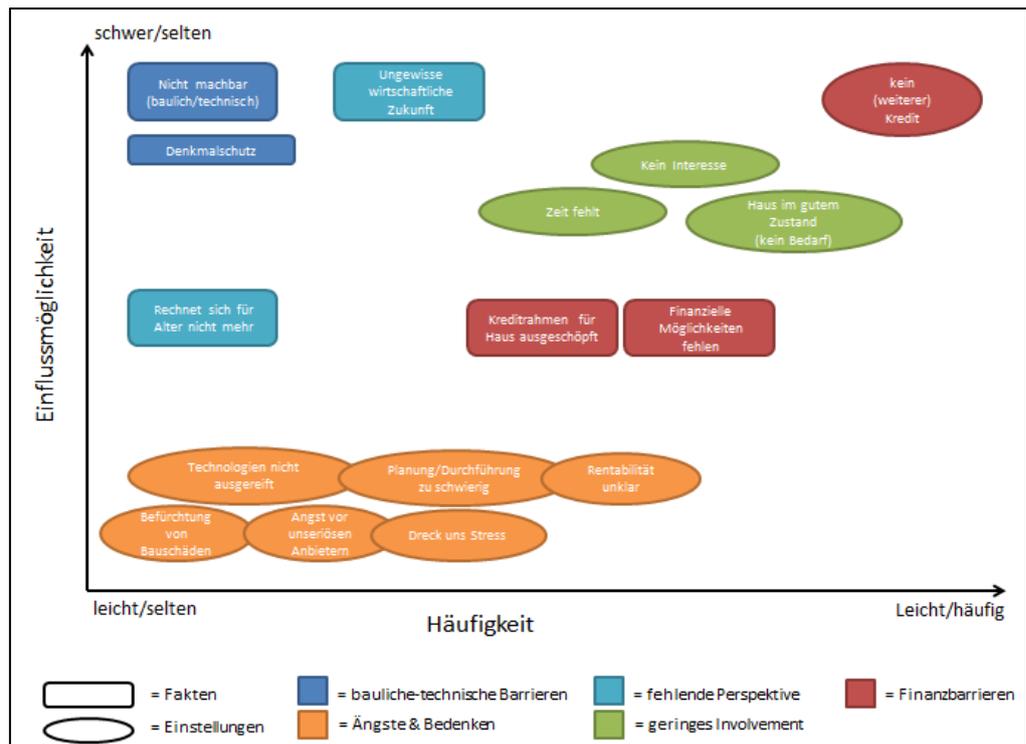


Abbildung 101: Einflussmöglichkeiten und Bedeutung von Barrieren gegen eine energetische Sanierung, eigene Darstellung IBP nach (Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE), Hochschule Lausitz/Senftenberg, 2010).

Nachfolgend werden häufig genannte nicht-technische Hemmnisse und bestehenden technische Restriktionen einer energetischen Modernisierung vorgestellt. Die nicht-technischen Hemmnisse beziehen sich vorerst auf die in Abbildung 101 dargestellten Aussagen von Hauseigentümern. Weiter nicht-technische Hemmnisse für andere Wohnkonstellationen (Mieter-Vermieter, Wohneigentümergeinschaften) werden nachfolgend separat erläutert.

### Fehlende Perspektive

Vor allem für ältere Menschen stellt eine energetische Sanierung aufgrund der langen Amortisationszeit keine interessante Möglichkeit der Geldanlage dar. Für den Fall, dass kein Erbe vorhanden ist, stellt sich für viele die Frage „Für wen soll ich sanieren?“. Oft kann die energetische Modernisierung aufgrund fehlender finanzieller Mittel nicht durchgeführt werden. Die Vergabe von höheren Krediten an ältere Menschen wird in den meisten Fällen von der Bank abgelehnt. Die ungewisse wirtschaftliche Situation privater Personen stellt ein weiteres Hindernis energetischer Sanierungen dar. Gerade bei Eigenheimbesitzer mit befristeten Arbeitsverträgen, stellt eine Investition in energetische Sanierungen ein erhebliches finanzielles Risiko dar.

Beim Neukauf einer Immobilie steht meist dessen Finanzierung und nicht die Sanierung im Vordergrund. Meist fehlen die nötigen Finanzmittel für eine umfangreiche energetische Sanierung des neu erworbenen Gebäudes. Die Sanierung des Gebäudes besitzt in solchen Situationen nicht oberste Priorität.

### Geringe Einbindung

Bei vielen Hausbesitzern ist die empfundene Wichtigkeit hinsichtlich einer energetischen Modernisierung nicht ausreichend. Dies spiegelt sich im fehlendem Interesse und Fehleinschätzung bezüglich des energetischen Ist-Zustandes des Eigenheims wieder. Meist fehlt Hauseigentümer mit geringen Involvement das Wissen über den Energieverbrauch und das Sanierungspotential des Gebäudes. Als Ursache wurde oft die vermeidliche Komplexität der Heizkostenabrechnung und des Energieausweises angeführt.

### Finanzierbarkeit

Das Problem der Finanzierbarkeit ist bei privaten Hausbesitzer sowie Kommunen häufig gegeben. Bei Kommunen können energetische Modernisierungen meist durch passende Finanzierungsmodelle wie Intracting oder Private-Public-Partnership (PPP) trotzdem realisiert werden. In Wohneigentümergeinschaften werden oft unzureichende Rücklagen gebildet, die für eine energetische Modernisierung nicht ausreichen. Weiter stellt die Vergabe von zinsgünstigen Krediten für Wohneigentümergeinschaft ein nur schwierig anwendbares Fördermittel dar.

### Erneuerungszyklus von Bauteilen → mangelnde Wirtschaftlichkeit

Der Erneuerungszyklus von Bauteilen wirkt sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierungen aus. Durch die Kopplung von Instandhaltungs- und energetischen Maßnahmen kann die Wirtschaftlichkeit der Sanierung deutlich gesteigert werden. Das Veranschlagen von Sowieso-Kosten<sup>19</sup> reduziert die Kosten für zusätzliche Sanierungen am Gebäude. Beispielsweise könnten im Zuge eines geplanten Neuanstrichs, die Fassade gedämmt werden. Die Kosten für das Aufstellen des Gerüsts wären in diesem Falle „Sowieso-Kosten“, um die sich die Kosten der Fassadendämmung reduzieren. Aufgrund der bevorstehenden Modernisierung kann damit die Wirtschaftlichkeit (Verkürzung der Amortisationszeit) verbessert werden.

Gleichzeitig hat der Erneuerungszyklus von Bauteilen eine bremsende Wirkung. Wurden Bauteile erst kürzlich ausgetauscht und nicht im gleichem Zuge energetisch saniert, so ist wird die energetische Modernisierung auf den nächsten Erneuerungszyklus rausgeschoben. Durch das Aufsetzen von umfangreichen Förderprogrammen kann die Erneuerung von Bauteilen vorgezogen werden, sodass sich der Erneuerungszyklus verkürzt.

### Bedenken

Die bestehenden Ängste und Bedenken hinsichtlich einer energetischen Sanierung sind häufig auf eine schlechte Informations- und Wissenslage der Eigentümer zurückzuführen. Als Gründe für eine nicht Umsetzung der Sanierung wird oft die vermeidliche Komplexität und der damit verbundene Stress,

---

<sup>19</sup> Kosten die ohnehin für die Erneuerung der Anlagenteile anfallen

genannt. In vielen Fällen besteht die Angst an einen unseriösen Energieberater oder an ein nicht ausreichend qualifiziertes Unternehmen zu geraten. Diese Ängste werden durch nicht wissenschaftliche Medienberichte und widersprüchliche Aussagen zur Sanierung weiter verstärkt.

#### Mehrheitsbeschlüsse von Wohneigentümergeinschaften

Häufig ist die Durchführung von energetischen Sanierungen in Gebäuden mit mehreren Eigentümern nur schwer umsetzbar. Neben der Notwendigkeit eine Mehrheit in der Eigentümerversammlung für die Sanierung zu bekommen sind die Rücklagen der Wohneigentümergeinschaft für eine umfangreiche energetische Modernisierung nicht ausreichend. Weiter ist vieles von der Motivation und der Qualifikation des Hausverwalters abhängig. Oft kommt es aufgrund von mangelnden Engagements und fehlender Qualifikation nicht zu einer effizienten Sanierung.

#### Investor-Nutzer-Dilemma

Das Investor-Nutzer-Dilemma stellt für die energetische Modernisierung von vermieteten Gebäuden ein Hindernis dar. Der Kern des Investor-Nutzer-Dilemmas liegt darin, dass Investor und Nutzer nicht dieselbe Person ist. In den Augen des Vermieters (Investor) verbessert sich seine Rendite durch die energetische Sanierung des Gebäudes nicht. Der Mieter hingegen profitiert von der Energieeinsparung. Ein Aufschlag der eingesparten Nebenkosten auf die Miete stellt für den Vermieter eine Option dar, seine Investition zu refinanzieren. Damit entstehen dem Vermieter jedoch keinerlei finanzielle Vorteile. Das Argument einer wertsteigernden Maßnahme des Gebäudes und der Steigerung der Attraktivität der Immobilie stehen für viele Vermieter nicht in Relation zum Aufwand. Weiter wird in Frankfurt derzeit eine mögliche Erhöhung der Miete durch den Anstieg der ortsüblichen Vergleichsmieten eingeholt, sodass der Anreiz für den Vermieter weiter sinkt. Aus diesem Grund ziehen viele Vermieter eine Neuvermietung mit erhöhter Kaltmiete einer energetischen Sanierung vor.

#### Ökologischer Mietspiegel → Investor-Nutzer-Dilemma (Neuvermietungen mit erhöhter Kaltmiete)

Durch die Einführung eines ökologischen Mietspiegels kann der Anstieg der Kaltmieten bei Neuvermietungen kontrolliert werden. Durch die ökologische Komponente „wärmetechnische Beschaffenheit des Gebäudes“ in der Kaltmiete können Vermieter mit energetisch modernisierten Gebäuden eine höhere Vergleichsmiete, als Vermieter mit schlecht sanierten Gebäuden einfordern. Somit würde der Anreiz einer Neuvermietung ohne energetische Sanierung mit dem Ziel einer Mieterhöhung nicht bestehen. Hierzu wurde das Modellprojekt „Ökologischer Mietspiegel Darmstadt“ durch das Institut für Wohnen und Umwelt in Darmstadt durchgeführt (Institut für Wohnen und Umwelt, 2003).

#### Mietrecht: Instandhaltungs- oder Modernisierungsmaßnahme

Auch die Problematik der Trennung von Instandhaltungs- und Modernisierungskosten (z.B. bei Fenstern) ist derzeit noch nicht klar geregelt. Nach § 554 Abs. 1 BGB ist der Mieter verpflichtet Instandhaltungsmaßnahmen zu dulden.

Grundsätzlich müssen Mieter energetische Modernisierungen dulden. Nur wenn der Mieter sich auf Härtegründe berufen kann, findet eine Interessenabwägung statt. Somit kann es zu Fällen kommen, dass gewollte Maßnahmen unterbunden werden.

#### Unmöglichkeit von Vollsanierungen bei Nicht-Leerstand

Ein weiteres Hemmnis einer vollständigen Sanierung auf Seiten des Vermieters besteht, wenn kein Leerstand vorliegt. Ein Leerstand während der Sanierung ist häufig nicht möglich, da für den Mieter durch den Vermieter keine alternativen Wohnungen bereitgestellt werden können (anders evtl. bei Wohnungsbau-Gesellschaften). Durch den Leerstand würde dem Vermieter ein Mietausfall drohen und somit Opportunitätskosten entstehen, die zum „Anstieg“ der Modernisierungskosten führen. Bei einer Sanierung ohne Leerstand hat der Mieter nach § 536 Abs. 1 BGB das Recht auf Mietminderung, wenn die Sanierungsarbeiten seine Wohnqualität beeinflussen und länger als drei Monate andauert. Für den Vermieter stellen Mietausfall wie Mietminderung durch die Sanierung des Gebäudes ein weiteres Hindernis dar.

#### Energetische Sanierung in Wohnungen der Generation 65+

Häufig leben ältere Menschen (nachfolgend Generation 65+ genannt) in größeren Wohnungen. Diese sind meist nicht bereit in eine umfangreiche energetische Modernisierung zu investieren. Aus diesen Gründen kommt es bei Wohnungen, die von der Generation 65+ bewohnt werden häufig zu einem Sanierungsstau.

#### Mangelnde Bürgeraktivierung

Die Aktivierung von Bürgern ist Grundvoraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung von Effizienzmaßnahmen sowie die Sammlung von Informationen hinsichtlich der Eigentumsverhältnisse und der energetischen Ist-Situation vieler Gebäude in Frankfurt. Nur durch aktive Einbindung der Bürger in den Prozess können die ambitionierten Einsparziele der Stadt erreicht werden. Beispielsweise kann die Maßnahme „Erstellung einer räumlichen Eigentümerstrukturkarte“ durch eine aktive Bürgerauskunft deutlich schneller umgesetzt werden. Zur besseren Aktivierung werden Zielgruppenspezifische Informationen benötigt (Wer saniert Was und Wann?).

#### Bautechnische Restriktionen energetischer Sanierungen

Nach der gemeinsamen Studie der Beuth Hochschule für Technik Berlin und dem ifeu Institut von 2012 nehmen technische Restriktionen deutschlandweit heute einen Anteil von ca. fünf Prozent vom Heizwärmebedarf ein. Bei einer ambitionierten Sanierungsrate von rund zwei Prozent pro Jahr werden diese

im Jahre 2050 für rund 23 Prozent des dann noch verbleibenden Heizwärmebedarfs verantwortlich sein (Jochum & Mellwig, 2012).

Inwieweit sich die Werte von Deutschland auf Frankfurt übertragen lassen bzw. runtergebrochen werden können ist in Frage zu stellen. In Frankfurt befinden sich neben Gebäuden aus der Gründerzeit, Gebäude des Projekts „Neues Frankfurt“. Die sogenannten Ernst-May<sup>20</sup> Häuser wurden zwischen 1922-1930 erbaut und stehen zu großen Teilen unter Denkmalschutz. Welchen Anteil die unter Denkmalschutz gestellten Gebäude in Frankfurt am Gesamtwärmebedarf ausmachen ist aufgrund der Datenlage nicht möglich. Ziel des Kapitels ist es einen Überblick über mögliche Restriktionen bei der energetischen Modernisierung von Bestandsgebäuden zu geben. Nachfolgend werden kurz technische Restriktionen beim Dämmen von Bauteilen erläutert und quantifiziert.

### Außenwand

Dämmrestriktion:

- Außendämmung: Sichtmauerwerk/erhaltenswerte Fassade
- Innendämmung Außenwand/Außendämmung: Stuck/Ornamente/Faschen
- Außendämmung: Architektur/Erscheinungsbild

Die Dämmung der Außenwand ist meist der erste Gedanke, wenn über eine energetische Sanierung gesprochen wird. Die Dämmung der Gebäudeaußenhülle unterliegt zahlreichen Restriktionen. Der Denkmalschutz, das Gesamterscheinungsbild der Stadt, sowie erhaltenswerte Fassaden führen dazu, dass energetische Modernisierungen an der Außenwand nur eingeschränkt durchgeführt werden können. Der Studie zufolge besitzen 15 Prozent der Wohngebäude eine Fassade mit Sichtmauerwerk und erhaltenswerter Fassade. Elemente wie Stuck, Ornamente und Faschen führen dazu, dass eine Außen- und Innendämmung nicht umgesetzt werden kann. Dennoch liegen die Sanierungsrestriktionen bei den Außenwänden bei einem Anteilsehr geringen Anteil von rund 1,5 Prozent am Gesamtwärmebedarf (Jochum & Mellwig, 2012).

### Oberste Geschossdecke

Dämmrestriktion:

- Nicht zugänglich

Bei der energetischen Modernisierung der oberen Geschossdecke ist nur in den seltensten Fällen mit Dämmrestriktionen zu rechnen. Die Restriktionen

---

<sup>20</sup> Ernst May (war Siedlungsdezernent der Stadt Frankfurt am Main zwischen 1925 und 1930)

betreffen lediglich Gebäude mit unbeheiztem bzw. zum Teil beheiztem Dachgeschoss. Bei den Gebäuden bis Baujahr 1978 liegt der Anteil der beheizten Flächen bei rund 34 Prozent. Bei rund 18 Prozent der Gebäude ist das Dachgeschoss teilweise beheizt. Bei knapp der Hälfte (48 Prozent) ist das Dachgeschoss unbeheizt. Lediglich beim unbeheizten bzw. teilweise beheizten Dachgeschoss ist eine Dämmung sinnvoll. Demnach reduziert sich die Wärmemenge aufgrund der Anzahl der potentiellen Gebäude. Klassische Restriktionen die bei der Dämmung der obersten Geschossdecke auftreten können, sind die Unzugänglichkeit und die Gefahr der Feuchtebildung. Das Potential der nicht wegdämmbaren Wärmemenge dort, beträgt knapp ein Promille des Gesamtheizwärmebedarfs.

#### Kellerdecke

Dämmrestriktion:

- Durchgangshöhe unzureichend
- Installationen unter der Decke

Dem Institut für Wohnen und Umwelt nach liegt der Anteil im Altbau bis zum Jahr 1978 von unbeheiztem Keller bei 62 Prozent und teilweise beheizter Keller bei 22 Prozent. 20 Prozent der unbeheizten Keller weisen eine zu geringe Deckenhöhe auf, dass eine Person gerade noch stehen kann. Als Restriktion bei der Dämmung der Kellerdecke von unbeheizten bzw. teilweise beheizten Kellern ist die unzureichende Deckenhöhe zu nennen, die das Aufbringen der Dämmung nicht zulässt. In Summe beträgt die Dämmrestriktion knapp ein Prozent des gesamten Wärmebedarfs.

#### Bauteile gegen Erdreich

Dämmrestriktion:

- Durchgangshöhe nicht ausreichend
- nicht zugänglich (Überbauung)

Bei der Dämmung der Bauteile gegen das Erdreich sind alle Baualtersklassen, jedoch nur voll beheizte Keller (3,3 Prozent) und teilweise beheizte Keller (22,2 Prozent) von Dämmrestriktionen betroffen. Als Restriktion sind wie bei der Dämmung der Kellerdecke eine unzureichende Durchgangshöhe und eine Überbauung zu nennen, die das Aufbringen einer Dämmung nicht ermöglichen.

#### Fenster

Dämmrestriktion:

- Gefahr von Feuchtebildung an anderen Bauteilen

Die Modernisierung der Fenster unterliegt nur selten einer Dämmrestriktion. Jedoch besteht die Gefahr von Feuchtebildung an anderen Bauteilen, wenn Fenster mit zu hohem U-Wert eingesetzt werden. Häufig wird aus diesem Grund bei Sanierungen auf optimale Fenster mit sehr gutem U-Wert ( $< 1,0$ ) verzichtet. Die damit verbundene nicht wegdämmbare Wärmemenge beträgt

ca. 0,55 Prozent am Gesamtwärmebedarf Deutschlands. Durch den verpflichteten Einbau einer Lüftungsanlage nach DIN 1962-2 ist die Problematik der Feuchtebildung schon entgegengesetzt worden.

Somit ist der Austausch der Fenster vor dem Hintergrund einer ganzheitlichen Betrachtung des Gebäudes durchzuführen.

Zusammenfassend soll mit Abbildung 102 eine bessere Übersicht zur Problematik gegeben werden. Der Heizwärmebedarf wird dazu in drei Zonen untergliedert. Zone 1 ist der durch Dämmung mögliche einzusparende Heizwärmebedarf. Dieser nimmt solange ab, bis alle Dämmmaßnahmen durchgeführt wurden. Insgesamt kann der Wärmebedarf um 58 Prozent durch Dämmen reduziert werden (Annahme Passivhaus oder Effizienzhaus 55). Der verbleibende Sockel-Heizwärmebedarf (42 Prozent) setzt sich aus Zone 2 und 3 zusammen. In Zone 2 ist der Heizwärmebedarf, der nicht durch Dämmung einzusparen ist abgebildet. Eine Reduktion in dieser Zone ist lediglich durch das Verkleinern der zu beheizenden Flächen oder einen Rückbau von Gebäuden zu erreichen. Zone 3 ist die aufgrund von Dämmrestriktionen nicht einsparbare Heizenergie. Der prozentuale Anteil steigt bis 2050 mit sinkendem Heizwärmebedarf an.

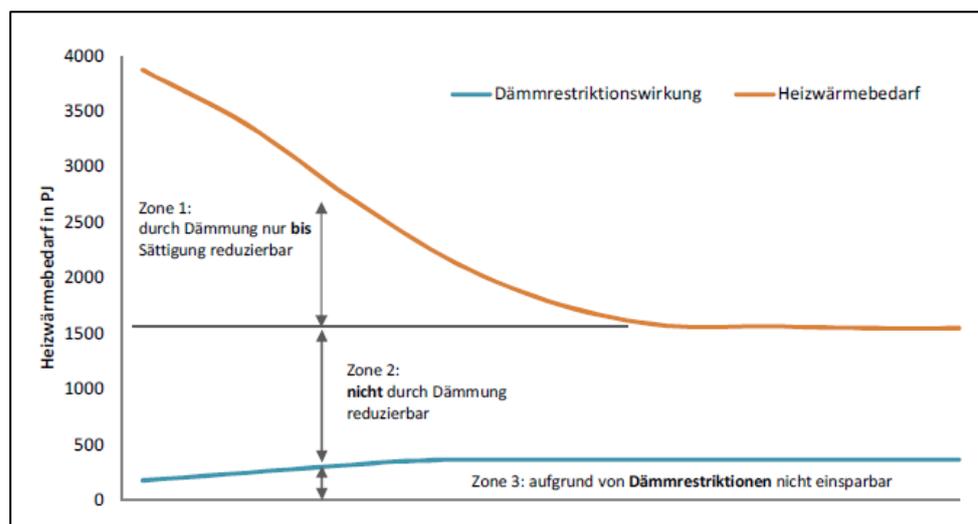


Abbildung 102: Einteilung des Heizwärmebedarfs in dämmbare, nicht dämmbare Zonen und Zonen mit Dämmrestriktionen), Quelle: (Jochum & Mellwig, 2012).

### Modernisierungsarbeiten im Sozialbau

Eine nachhaltige Sanierung der Sozialbauten in Frankfurt am Main führt langfristig zu finanziellen Einsparungen bei der Stadt. Durch die Senkung des Heizenergiebedarfs verringern sich die von der Stadt Frankfurt am Main bezahlten Sozialzuschüsse. Die Investor-Nutzer-Problematik bleibt auch in diesem Bereich bestehen, da für den Nutzer kein Anreiz zum rationellen Umgang mit Energie geschaffen wird. Kosten der Stadt werden auch dadurch reduziert, dass einkommensschwache Haushalte ihre Energiekosten nach einer energetischen Sanierung schneller begleichen können.

### Modernisierungsvereinbarung im Mietvertrag → Investor-Nutzer-Dilemma

Der Abschluss einer sogenannten Modernisierungsvereinbarung im Mietvertrag verschafft beiden Seiten eine Rechtsicherheit. Damit können Bedenken hinsichtlich des Ablaufs und der Folgen von Sanierungsmaßnahmen im Vorfeld geklärt werden. Würde eine gemeinsame Ausarbeitung einer Modernisierungsvereinbarung durch Mieter, vertreten durch den „Frankfurter Mieterbund“, und Vermieter, vertreten durch Eigentümerverband „Haus & Grund Frankfurt am Main“, eine faire Lösung für beide Seiten darstellen. Weiter sollte über die Errichtung einer zentralen Schlichtungsstelle für Vermieter und Mieter in Frankfurt nachgedacht werden.

### Grundsteuererleichterungen → Investor-Nutzer-Dilemma / Finanzierbarkeit

Eine weitere Möglichkeit Anreize für energetische Sanierungen durch Eigentümern in Miet- und Nichtmietgebäuden zu setzen, ist eine verminderte Belastung durch die Grundsteuer. Die Reduzierung der Grundsteuer im Falle einer energetischen Modernisierung könnte neben Fördermitteln einen weiteren, wenn auch geringeren, Anreiz zur energetischen Sanierung bei Hauseigentümern setzen. Für die erfolgreiche Umsetzung müssen bestimmte energetische Standards definiert werden, anhand derer sich die Steuererleichterung bemisst. Die Kopplung eines Grundsteuernachlasses an einen zu erreichenden energetischen Mindeststandard muss durch die Stadtverordnetenversammlung erlassen werden. Bedacht werden sollte, dass durch die energetische Sanierung und das ausübende Handwerk Arbeitsplätze geschaffen werden und somit auch Steuereinnahmen generiert werden.

### Integrierte Quartiersentwicklung (Quartiersmanagement)

Durch ein funktionierendes Quartiersmanagement steigt die Lebensqualität im Quartier. Neben einem energetisch hohen Standard der Gebäude tragen vor allem auf den ersten Augenblick sichtbare Dinge (Sauberkeit, ÖPNV-Anbindung, Spielmöglichkeiten für Kinder, Verkehrssicherheit etc.) zu einer Gesamtaufwertung des Quartiers bei. Durch die Gesamtaufwertung des Quartiers lassen sich höhere Grundmieten bei neusanierten Gebäuden rechtfertigen. Dies ist jedoch vor dem Hintergrund einer möglichen Gentrifizierung stets kritisch zu beurteilen. Es ist somit ein Balanceakt die Lebensqualität in den Quartieren nachhaltig zu erhöhen und gleichzeitig eine sozialverträgliche Lösung zu finden.

### Abbau des Sanierungsstaus in von Generation 65+ bewohnten Gebäuden

Altersbedingt sind viele Menschen der Generation 65+ mit der Größe ihrer Wohnung überfordert. Die Lage der Wohnung (nicht Erdgeschoss) sowie eine schlechte Anbindung an den ÖPNV führen in vielen Fällen dazu, dass diese nicht mehr am öffentlichen Leben teilnehmen können. Durch das Umsteigen auf kleinere altersgerechte Wohnungen in unmittelbarer Umgebung mit guter ÖPNV Anbindung wird diesen ermöglicht am öffentlichen Leben weiter teilzunehmen. Als Ansprechpartner und Beratungsstellen für solch eine Maßnahme könnten beispielsweise Diakonie und Caritas dienen. Gleichzeitig wer-

den unsanierte Wohnungen für energetische Sanierungen frei (Workshop Energierreferat Frankfurt, 2014).

#### Ausbau von Beratungsstellen für Bürger → Bedenken

Durch den Ausbau von Beratungsstellen, wie dem Energiepunkt können Ängste und Bedenken bei Wohnungseigentümern, die schlichtweg mit der Sanierungsentscheidung überfordert sind, genommen werden. Als Unterstützung zum Energiepunkt könnten durch die Inanspruchnahme des KfW Programms „432 Sanierungsmanager“ zentrale Ansprechpartner für Fragen zu Finanzierung und Förderung kostengünstig durch die Stadt eingestellt werden. Neben der Beratung ist deren Aufgabe das Aktivieren und Vernetzen von Akteuren innerhalb des Quartiers, die Planung und ggf. die Koordination und Kontrolle von Maßnahmen.

In einer zweiten Phase erfolgt die von der Bafa angebotene vor Ort Beratung des Eigentümers anhand des konkreten Objekts. Bei nicht vermieteten Gebäuden sollte die Möglichkeit des steuerlichen geltend machen von Beratungskosten durch den Eigentümer berücksichtigt werden.

Neben der technischen Beratung gilt es in zweiter Linie das Bewusstsein der Gebäudeeigentümer für die Bereitstellung von Rücklagen aufgrund zukünftiger Sanierungsmaßnahmen zu schärfen. Frei nach Artikel 14 des Grundgesetzes „Eigentum verpflichtet“ muss eine gewisse Selbstverantwortung den Eigentümern im Beratungsgespräch vermittelt werden.

#### Klimahaus Frankfurt am Main

Klimaschutz und Klimaanpassung sind Themen der Stadtgesellschaft. Bisher fehlt es jedoch an Anlaufstellen für Bürgerinnen und Bürger, ihre Ideen diesbezüglich einzubringen und sich auszutauschen.

In Frankfurt am Main gibt es zum einen vielfältige Bürgerinitiativen, zum anderen eine Vielzahl von Institutionen, die die Themen Energie und Klima auf unterschiedlichen Ebenen vorantreiben. Die verschiedenen Akteure arbeiten allerdings oft isoliert, da es bislang keine Plattform gibt, die eine Vernetzung dieser Akteure und der Stadt Frankfurt am Main ermöglicht. Synergien können somit nicht genutzt werden und das Potential der gemeinsamen Arbeit an einer Zukunftsvision bleibt weitgehend ungenutzt.

Aus diesem Grund ist ein zentraler Anlaufpunkt einzurichten, der Klima- und Energiethemen praxisnah zum Ausdruck bringt. Als Grundlage soll ein solches Klimahaus die Räumlichkeiten bieten, die den Austausch untereinander ermöglichen und fördern. Das Thema Klimaschutz soll hier über Modelle und das Gebäude „Klimahaus“ an sich sichtbar und fühlbar gemacht werden, und so die Dynamik des Klimaschutzes dargestellt werden. Information, Bildung und Beratung sind dabei grundlegende Elemente. Ein weiteres Ziel soll sein, Ideen ganzheitlich, im Sinne eines langfristig unabhängigen Fortbestehens entwickeln zu können. Die Entwicklung nachhaltiger Produkte oder Dienstleistungen soll hierbei unterstützt werden, da sie als Erfolgsfaktoren die Trans-

formation der Stadt Frankfurt am Main in Richtung einer 100% klimaneutralen Stadt vorantreiben.

#### Gründung eines Sanierungsfonds → Finanzierbarkeit

Durch die Gründung eines Sanierungsfonds, dessen Vermögen in die energetische Sanierung fließen, entstehen neue Finanzierungsmöglichkeiten, siehe auch Kapitel 7. Dabei sind diverse Ausprägungen von Immobilienfonds mit eigenen sanierungsbedürftigen Liegenschaften bis hin zu einem Fond, der in allgemeine Sanierungsprojekte investiert denkbar. Als Anleger wären Unternehmen, privat Personen aber auch Vereine denkbar. Insbesondere für Unternehmen könnte die "Fonds-Patenschaft" eine verbesserte Außendarstellung mit sich bringen. Anleger mit starkem Nachhaltigkeitsbewusstsein sind Zielgruppe für diesen Fond (Center for Corporate Responsibility and Sustainability an der Universität Zürich, 2013).

#### Vorgefertigte Sanierungselemente → Finanzierbarkeit

Eine Lösung für die Überwindung der derzeitigen Hindernisse könnte der Einsatz von vorgefertigten Fassadenelementen bei mittleren und großen Mehrfamilienhäusern darstellen. Aufgrund des hohen Vorfertigungsgrades verkürzt sich die Bauzeit am zu sanierenden Objekt. Weiter können durch eine durchaus vorstellbare Massenfertigung die Kosten gesenkt und somit die Amortisationszeit verkürzt werden. Durch die Integration von Komponenten für Heizen, Kühlen und Lüften sowie den jeweiligen Verteilsystemen bieten vorgefertigte Fassaden die Möglichkeit mehrere Gewerke/Sanierungsmaßnahmen zusammenzufassen. Weiterhin besteht die Möglichkeit, dass Bewohner während der Gebäudesanierung in ihren Wohnungen bleiben können. Die bisherigen Arbeiten zu vorgefertigten Sanierungselementen sind jedoch durch weitere Modellvorhaben als auch Forschungsvorhaben zu verbessern und zu optimieren. Als gutes Beispiel für Frankfurt am Main kann das derzeit laufende europäische Projekt „RetroKit“ genannt werden in der auch die ABGNova beteiligt ist.

#### Demonstrations- und Vorzeigeprojekte durch die Stadt Frankfurt

Die Stadt Frankfurt am Main zeigt schon heute für Gründerzeitgebäude (Mehrfamilien- Einfamilien- und Reihenhäuser) mögliche Mustersanierungen auf. Neben der Mustersanierung sollte ein Monitoring-Konzept zur Überwachung und als Illustration für die Bürger geschaffen werden. In den für Bürger frei zugänglichen Mustersanierungen oder mögliche Themenführungen, können vor Ort Fragen interessierter Gebäudeeigentümer, die über eine energetische Modernisierung nachdenken, am Objekt erklärt werden. Im Zusammenspiel mit einem begleitenden Monitoring des Gebäudes führt dies dazu, dass wesentliche Ängste und Bedenken der Gebäudeeigentümer ausgeräumt werden können. Ideal wären verschiedene Leuchtturmprojekte in Abhängigkeit der vorzufindenden Gebäudetypologie in den einzelnen Stadtquartieren. Zum anderen könnten Anlaufstellen, wie die der ABGNova zu verschiedenen Mus-

terbeispielen (z.B. Wandaufbau) in Frankfurt am Main weiter ausgebaut werden.

#### Schaffung von Anreizen zur energetischen Modernisierung

Die Beweggründe eine energetische Sanierung durchzuführen sind oft unterschiedlicher Natur. Unentschlossenen Hauseigentümern muss ein Anreiz gegeben werden, sich für eine energetische Modernisierung zu entscheiden. Die Stadt Frankfurt am Main hat somit die Möglichkeit über Zugeständnisse und Förderungen den Unentschlossenen zu überzeugen. Die Bauaufsicht könnte beispielsweise in Einzelfällen die Aufstockung von Gebäuden in Zuge einer energetischen Dachsanierung bewilligen. Als Beispiel können die Erfahrungen der NH-Projektstadt und der FH Frankfurt mit "Symbiont" (Solar Decathlon 2014) genannt werden. Erfahrungen aus dem Piloten sollten ausgewertet und hinsichtlich einer Skalierung des Ansatzes analysiert werden.

Dem Gebäudeeigentümer entsteht neben der Wertsteigerung des Objektes zusätzlicher Wohnraum, der vermietbar oder bewohnbar ist. Weiter könnten steuerliche Anreize, wie z.B. die Senkung der Grundsteuer für Eigentümer, die ihr Gebäude auf einen bestimmten Standard sanieren, durch Satzungen im Stadtparlament gesetzt werden.

#### Weiterbildung und Qualitätssicherung im Handwerk

Auszubildende Handwerker übernehmen unter Anleitung von zertifizierten Handwerks- und Baufirmen die Sanierung der Demonstrations- und Vorzeigelienschaften. Im Rahmen der Sanierung finden Begehungen durch Eigentümer, die über eine Sanierung nachdenken statt. Weiter wird das Thema Energieeffizienz im Gebäudebestand bzw. Neubau in Schulen behandelt und durch Ausflügen auf die Baustelle mit praktischen Einblicken unterstützt. Auch bei der Sanierung gilt es Firmen über Lehrgänge der Handwerkskammer zu zertifizieren. Firmen die ein Zertifikat erhalten haben, werden auf Listen des Energiepunktes an sanierungsinteressierte Eigentümer weiter empfohlen. Somit wird die Qualitätssicherung im Handwerk nachhaltig gefestigt.

#### Übersichtskarte zur Eigentümerstruktur

Mit der Erstellung einer Übersichtskarte zur Eigentümerstruktur in Frankfurt durch das Energiereferat können verschiedenen Eigentümer gezielt angesprochen werden. Aus der Kategorisierung der Eigentümer nach Wohnungsbau-gesellschaft, Privateigentümer und Wohnungseigentümergeinschaften (vermietet, selbstgenutzt) können „unkomplizierte“ schnell durchführbare Sanierungsobjekte lokalisiert werden. Aus Datenschutzgründen ist eine Berücksichtigung der Privateigentümer nicht möglich. Somit ist die Übersichtskarte auf Liegenschaften von Wohnungsbau-gesellschaften begrenzt. Diese sind aufgrund der kurzen Abstimmungswege interessante Ansprechpartner. Durch die Erstellung der Übersichtskarte, weiß die Stadt Frankfurt, wo an welchen Standorten am schnellsten Primärenergie eingespart werden kann.

#### **Best Practice**

### *Technikhaus in Melsungen*

Das Technikhaus in Melsungen führt viele der oben beschriebenen Maßnahmen zusammen. Im Fokus steht jedoch die anschauliche Aufbereitung von Unterrichtsinhalten. Schulklassen und Interessierte Bauherren können während eines Rundgangs durch Sichtfenster Einblicke in Wände und Böden erhalten. Hierbei wurde jeder Raum mit einem unterschiedlichen Fenster, Akustik- und Dämmverbundsystemen ausgestattet. Informationstafeln geben Hintergrundinformationen zu Material und Technik. Tablets, Bildschirme und mit dem Smartphone scanbare QR-Codes ermöglichen das Abspielen von Videos, in denen Handwerker über Vor- und Nachteil von Materialien aufklären. Die Weiterentwicklung des Technikhauses erfolgt in enger Zusammenarbeit mit der Industrie. Diese stellt die neusten Techniken zu Verfügung, die unter fachlicher Aufsicht von Lehrlingen montiert werden.

## **Maßnahmen zur Steigerung der Bürgeraktivierung**

### Veranstaltungen mit Bürgerbeteiligung

In der Vergangenheit wurden von Seiten der Stadt Diskussionsrunden mit Bürgerbeteiligung im Kontext des Masterplans durchgeführt. Solche sind auch während der Umsetzungsphase notwendig um das Interesse und die Aufmerksamkeit der Bürger am Masterplan weiter zu fördern. Neben Informationen hinsichtlich des Fortschritts im Masterplan sollten auch Interessen seitens der Bürger in der Veranstaltung vorgetragen werden. Die Gestaltung des Masterplans als eine Art demokratischer Prozess steigert die Akzeptanz und Aktivität der Bürger langfristig. Wie schon in der Vergangenheit geschehen, fungiert hierbei das Energierreferat Frankfurt als Veranstalter und koordinierende Stelle.

### Befragungsbögen bei Wahlzetteln

Die Stadt Frankfurt am Main legt zu den nächsten Wahlen zu den Wahlbriefen einen Fragebogen über die Wohnverhältnisse (Eigentum/Miete) bei. Diese werden beim Urnengang separat abgegeben. Damit können wichtige Informationen für die Erstellung der räumlichen Eigentümerstrukturkarte gewonnen werden. Die Stadt ist in Absprache mit dem Energierreferat, das die fachliche Ausarbeitung und Auswertung des Fragebogens übernimmt, als Initiator für die Umsetzung verantwortlich.

### Straßenfeste als Treffen für Multiplikatoren

An Straßenfesten kommen Bürger miteinander in Kontakt. Zuvor bestimmte Multiplikatoren aus den Stadtquartieren können solche Events nutzen, um das Thema Quartierskonzept zu diskutieren und in die Breite zu tragen.

## 5.4 Effiziente Anlagentechnik und Wärmeverteilung

Wie in Kapitel 4.1 beschrieben ist der Heizenergiebedarf nur bis zu einem bestimmten Punkt zu reduzieren. Auch nach Ausschöpfung aller Dämmpotentia-

le bleibt ein Restwärmebedarf bestehen. Diesen gilt es durch den Einsatz modernisierter Erzeugungsanlagen und Verteilsysteme effizient und nachhaltig bereitzustellen, um somit den Primärenergieeinsatz und den damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Ausstoß weiter zu reduzieren. Der Bestand an dezentralen Heizkesseln in Frankfurt unterteilt sich in Öl- und Gaskessel. Dabei dominieren die gasversorgten Kessel mit rund 91 Prozent die Versorgungsstruktur (Abbildung 103).

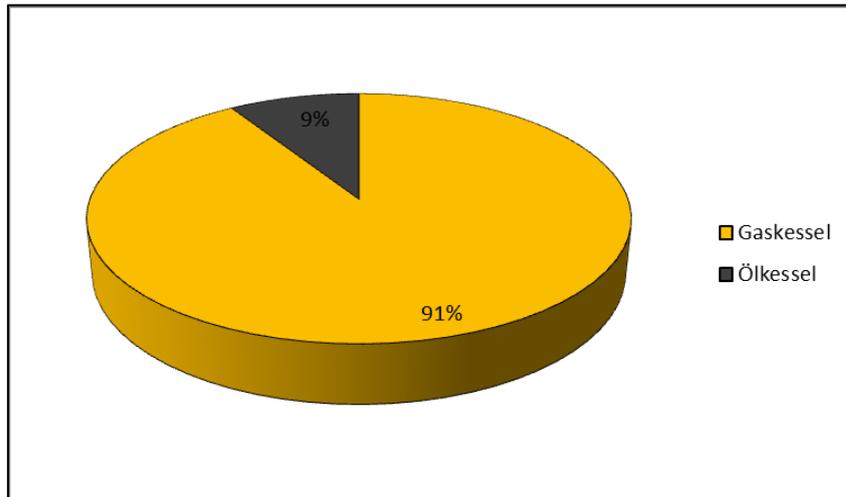


Abbildung 103: Heizungsbestand in Frankfurt am Main, Quelle (Schornsteinfegerdaten FRANKFURT 2010).

Die Aufschlüsselung der Heizungsanlagen nach Jahr der Inbetriebnahme gibt Auskunft über die Altersstruktur des Anlagenbestands.

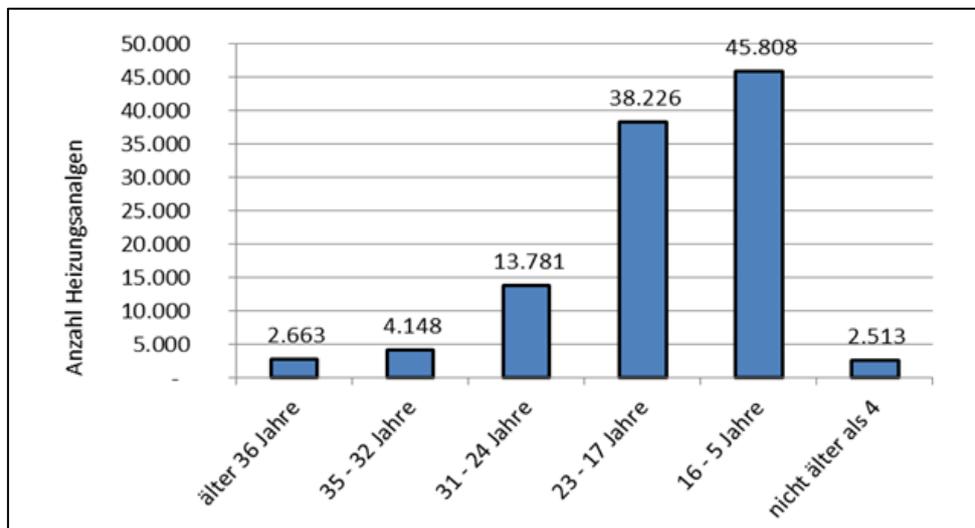


Abbildung 104: Altersstruktur des Heizungsbestands der Frankfurter Haushalte, Quelle (Schornsteinfegerdaten FRANKFURT 2010).

Demnach sind lediglich zwei Prozent aller installierten Heizkessel nicht älter als vier Jahre. Der Großteil der Heizkessel (43 Prozent) stammt aus der Zeit zwischen 1998 und 2009. Weiter haben Heizungskessel aus dem Jahr 1991-1997

mit 36 Prozent einen hohen Anteil am Bestand. Der Anteil an Heizkesselanlagen älter 24 Jahre macht rund 19 Prozent der Anlagen im Bestand aus.

## **Maßnahmen**

### Förderung zum Austausch ineffizienter Heizungsanlagen

Als technische Maßnahme zur Reduktion des Energieverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen wird der Austausch alter ineffizienter Heizungsanlagen gegen neue Effiziente vorgeschlagen. Unterstellt man den Heizungsanlagen eine Nutzungsdauer von rund 20 Jahren könnten in den nächsten Jahren knapp 50 Prozent der Anlagen ausgewechselt werden.

Ein Anreize sollte geschaffen werden besonders ältere Anlagen (>20 Jahre) in effiziente Anlagen auf Basis erneuerbaren Energien oder auf Fernwärme zu wechseln. Zur Bewilligung der zusätzlichen Förderung sollte ein Mindestanteil aus erneuerbaren Energien erreicht werden.

Insbesondere Anlagen aus den 70er und 80er Jahren weisen einen extrem niedrigen Wirkungsgrad auf. Meist sind dies keine Kessel mit Brennwertnutzung, sodass dort ein erhebliches Primärenergieeinsparpotential besteht. Ein alleiniger Kesselaustausch ist jedoch zur Zielerreichung 100% erneuerbare Energien nicht zielführend. Will man den Zielsetzungen der Stadt Frankfurt folgen, dürfen abgeschriebene Kessel nicht eins zu eins ersetzt werden. Vielmehr muss über die Nutzung von Synergien im innerstädtischen Kontext nachgedacht werden. Damit könnten abhängig von der individuellen Situation auf Quartiersebene, Maßnahmen wie die oben beschriebene Verdichtung der Fernwärme und der Einsatz von Wärmepumpen, der Solarthermie- und der BHKW-Nutzung zur Wärmebereitstellung zum Einsatz kommen. Der Einbau von Pelletheizungen ist aus Gesundheitsgründen der Feinstaubbelastung im innerstädtischen Kernbereichen als kritisch zu betrachten.

## **Wirtschaftlichkeit**

Der Austausch veralteter meist überdimensionierter Kessel gegen Kessel mit Stand der Technik (Brennwertkessel) amortisiert sich bei Heizkosten von etwa 3.000 Euro pro Jahr nach ungefähr 10 Jahren (Anschaffungskosten rund 10.000 Euro). Es kann davon ausgegangen werden, dass sich die Amortisationsdauer durch den Anstieg der Gas- und Ölpreise weiter verkürzt. Zudem wird der Austausch durch zinsverbilligte Kredite oder einmalige Investitionszuschüsse der KfW-Bank bezuschusst. Für den Fall, dass die Heizzentrale erst vor wenigen Jahren installiert wurde, kann allein durch das richtige Einstellen der Heizzentrale (wie zum Beispiel Auswahl der richtigen Vorlauftemperatur) in Kombination mit einem hydraulischen Abgleich Heizenergie eingespart werden. Die Umstellung des Heizsystems (z.B. von Kessel auf Wärmepumpe) ist oft mit einem finanziellen Mehraufwand verbunden.

## **Umweltverträglichkeit**

Auf Grundlage der Schornsteinfegerdaten von FFM kann von einer Einsparung an Heizenergie von rund 10 – 15 Prozent durch den Austausch veralteter Heizkessel in Kombination mit einem hydraulischen Abgleich ausgegangen werden (eigene Berechnung IBP). Der dadurch vermiedene Primärenergieeinsatz führt zu CO<sub>2</sub>-Einsparung in Höhe von etwa 115.000 Tonnen.

#### Ausbau von Beratungsstellen

Frankfurt am Main hat mit der Gründung der Beratungsstelle „Energiepunkt“ im Jahr 2010 bereits den ersten Schritt in die richtige Richtung gemacht. Ziel muss der Aufbau des bestehenden und möglicherweise weiteren „Energiepunkten“ in unterschiedlichen Stadtteilen Frankfurts sein.

#### Ermittlung von differenzierten Sanierungsstandards mittels Simulationstool

Wie oben beschrieben hängt die Wahl des Versorgungssystems direkt vom Gebäudetyp, der Baualtersklasse und der Quartiersstruktur ab. Ein festgeschriebener Sanierungsstandard für alle Gebäudetypen wäre somit nicht zielführend. Vielmehr muss ein differenzierter Sanierungsstandard in Abhängigkeit der Gebäudetypologie und der Quartiersstruktur definiert werden. Aus diesem Grund beschäftigt sich das Energiereferat seit geraumer Zeit mit der Entwicklung eines solchen Sanierungstools. Mit diesem könnten zentrale Fragestellungen über den notwendigen Sanierungs- bzw. Neubaustandard von verschiedenen Gebäudegruppen, zur Erreichung eines für den Klimaschutz notwendigen Niveaus, beantwortet werden. Die im Laufe der Zeit umgesetzten Sanierungsprojekte werden mit in das Tool aufgenommen. Damit verfügt das Tool über einen prospektiven Charakter unter Berücksichtigung einer sich ständig ändernden Ausgangssituation (Monitoring). Für die Entwicklung eines differenzierten Sanierungsstandards ist die Durchführung von Modellvorhaben in unterschiedlichen Baualtersklassen notwendig. Die aus den Referenzgebäuden bzw. -quartieren gewonnenen Erkenntnisse fließen in das Simulationstool mit dem unterschiedliche Entwicklungen des Wärmebedarfs betrachtet werden können.

#### Sanierungsfahrplan

Die Sanierung des Frankfurter Gebäudebestandes sowie die Transformation der lokalen Energieversorgung sind langwierige Prozesse. Aufgrund der langen Erneuerungszyklen bei Gebäudesanierung sowie bei Infrastrukturmaßnahmen, haben heute durchgeführte Sanierungsmaßnahmen bis nach 2050 Bestand. Nach dem heutigen Stand der Technik gibt es im Bereich der Gebäudehülle nur einen geringen Spielraum für nachträgliche Korrekturen.

In einem Sanierungsfahrplan sollen die in Frankfurt vorhandenen Gebäudeklassen sowie Quartierstypen in einer digitalen Karte (GIS-basiert) dargestellt werden. Diese Karte dient zur Identifikation von Quartieren für Energiekonzepte, für die Durchführung von Informations- und Beratungskampagnen sowie für die Beratung der Politik hinsichtlich des Aufsetzens spezifischer lokaler Fördermaßnahmen.

Zudem sollen, basierend auf den Ergebnissen des vom Energiereferat entwickelten Simulationstools, für die verschiedenen Quartiere die Sanierungsschritte hinsichtlich der Reduzierung des Energiebedarfs und dem Ausbau der erneuerbaren Energien erarbeitet und ebenfalls in dem Sanierungsfahrplan visualisiert werden. Der Ansatz ist ganzheitlich und soll alle in einem Quartier relevanten Gegebenheiten berücksichtigen, wie beispielsweise die Belange des Denkmalschutzes oder den Erhalt von städtebaulich prägenden Elementen wie die Fassaden der Gründerzeitgebäude. Der Sanierungsfahrplan soll als informelles Instrument einen Rahmen für eine energetische Sanierung des Frankfurter Gebäudebestandes in Hinblick auf die Klimaschutzziele für 2050 bieten.

### Wärmedämmung des Verteilsystems

Nach §10 (2) und §14 (5) der Energieeinsparverordnung 2014 sind die Wärmeverteil- und Warmwasserleitungen, Kälteverteil- und Kaltwasserleitungen sowie Armaturen in unbeheizten Kellerräumen von Neubauten und teils auch in Bestandsgebäuden zu dämmen. Dadurch können die Wärmeverteilverluste an den Verteilleitungen reduziert werden.

### **Wirtschaftlichkeit**

Für die Darstellung der Wirtschaftlichkeit wird von einem mit Erdgas beheizten Einfamilienhaus mit 125 m<sup>2</sup> Wohnfläche aus dem Jahr 1983 ausgegangen. Die Kosten der Wärmeverteilverluste belaufen sich jährlich auf rund sechs Euro (Gaspreis acht Cent/kWh). Durch die Isolierung der Rohrleitungen können die Kosten der Verluste auf unter ein Euro pro Jahr reduziert werden. In Summe liegen die jährlichen Einsparungen des isolierten Systems gegenüber des Urzustands bei rund fünf Euro pro Meter (Wolff, 2012). Bei Anschaffungskosten von eins bis vier Euro pro Meter Isoliermantel amortisiert sich die Maßnahme in kürzester Zeit.

### **Umweltverträglichkeit**

Die Verluste eines nicht isolierten Heizungsrohrs (DN 35; VL: 70/ RL: 55°C geregelt, mittlere Auslegungstemperatur: 62,5°C, mittlere Betriebstemperatur: 32,5 °C) beträgt 40 W/m. Bei 1.800 Heizungsvollaststunden erhöhen sich die Verluste auf 72 kWh/m und Jahr. Durch das Dämmen nach EnEV Standard (U-Wert: 0,035 W/(m\*K)) verringern sich die jährlichen Verteilverluste auf ca. zehn kWh pro Meter. Demnach können jährlich pro EFH rund 62 kWh Wärme pro Meter Verteilleitung eingespart werden (Wolff, 2012).

Auf Frankfurt am Main bezogen würden ausgehend von nicht gedämmten Verteilleitungen trotz der seit 1989 bestehenden Verpflichtung zur Dämmung, ein Einsparpotential von rund 300 GWh (acht Prozent vom Gesamtwärmebedarf der Wohngebäude) bei den Haushalten ergeben. Es könnten dadurch rund 66.000 Tonnen CO<sub>2</sub> eingespart werden.

### **Hemmnisse und Lösungsansätze (siehe energetische Sanierung)**

### Einsatz von dezentralen Umwälzpumpen

Zentrale Heizungsanlagen werden heute meist durch zentrale Umwälzpumpen versorgt. In den letzten Jahren wurden als Alternative zur zentralen Pumpe dezentrale Kleinst-Umwälzpumpen entwickelt. Hierdurch wird das Druckmanagement im Rohrleitungsnetz komplett umgestellt. Bisher müssen die zentralen Umwälzpumpen durchgängig einen Druck vorhalten, um eine Versorgung des strömungstechnisch am ungünstigsten gelegenen Heizkörper zu gewährleisten. Dezentrale Pumpen fördern lediglich die erforderliche Wassermenge für die jeweiligen Heizkörper. Weiter wird der manuelle hydraulische Abgleich durch die Installation der Miniaturpumpen überflüssig. Durch den Einsatz von Miniaturpumpen kann ein hydraulisch ideales System realisiert und der Energieaufwand deutlich gesenkt werden. Als Ansprechpartner müssen die Beratungsstellen der Stadt Frankfurt am Main wie beispielsweise der Energiepunkt ausgebaut werden. Des Weiteren ist die Weiterbildung und Schulung des örtlichen Handwerks Grundvoraussetzung für den nachhaltigen Erfolg dieser Maßnahme.

#### **Wirtschaftlichkeit**

Laut Herstellerangaben können bei den Heizkosten eines Einfamilienhauses jährlich rund 500 Euro eingespart werden. Bei angenommen sechs Heizkörpern entstehen Investitionskosten für Pumpen, Steuerung und Regelung etc. in Höhe von rund 3.360 Euro (Wilo, 2010). Demnach liegt die Amortisationszeit bei derzeitigen Stromgestehungskosten des Systems bei rund sieben Jahren (Wilo, 2011).

#### **Umweltverträglichkeit**

In einem Versuch des Fraunhofer IBP wurden durch den Vergleich von zentralen und dezentralen Umwälzpumpen in einem Testgebäude eine Einsparung von 19 Prozent des verwendeten Energieträgers Gas sowie eine Einsparung von rund 53 Prozent beim Strombedarf gegenüber einer konventionellen zentralen Umwälzpumpe ermittelt. In Summe konnte eine Primärenergieeinsparung von 22 Prozent gegenüber dem Referenzsystem gemessen werden (Sinnesbilcher H, 2010).

#### **Maßnahme**

##### Einsatz von Niedertemperaturheizungen

Im Zuge des Austauschs veralteter Bestandsheizungsanlagen (siehe Kapitel 4.2 „Status Quo“) führt eine Umrüstung des Heizungssystems auf Niedertemperaturniveau zu erheblichen Energieeinsparungen. Niedertemperaturheizungen arbeiten auf einem deutlich kälteren Temperaturniveau von ca. 35°C. Um trotzdem eine ausreichend hohe Raumtemperatur sicherzustellen, ist ein Einsatz von Fußbodenheizungen notwendig. Durch die Verringerung des Temperaturniveaus können die Wärmeverteilverluste reduziert und Wärmeerzeugungsanlagen, wie beispielsweise Wärmepumpen, für Heizzwecke eingesetzt werden. Weiter bietet sich die Chance erneuerbare Energien (solarthermische Kollektoren) stärker in die Wärmeversorgung mit einzubinden. Es ist zu be-

rücksichtigen, dass in manchen Bestandsgebäuden eine Umrüstung aufgrund bautechnischer Restriktionen schlecht bzw. unmöglich ist. Niedertemperaturheizsysteme nachträglich in Altbauten zu integrieren ist meist sehr aufwendig. Das Verlegen von Kapillarrohr-Dünnbettmatten auf dem Estrich bzw. das Einbringen in die Decke stellen Möglichkeiten dar, den Anteil an Flächenheizungen im Bestand zu erhöhen. Aufgrund des enorm hohen Wärmebedarfs bei Altbauten ist die Umstellung der Heizung mit zusätzlichen Dämmmaßnahmen an der Gebäudehülle verbunden.

### **Wirtschaftlichkeit**

Der Preis von Kapillarrohrmatten entspricht mit etwa 180 Euro pro m<sup>2</sup> den Preisen einer Fußbodenheizung. Durch die Umstellung lassen sich Energieeinsparungen von 30 bis 80 Prozent gegenüber konventionellen Heizsystemen realisieren (Voß, 2011). Eine Abschätzung der Amortisationszeit ist aufgrund der unterschiedlichen Rahmenbedingungen in Bestandsgebäuden und den damit verbundenen zusätzlichen Dämmarbeiten schwierig. Um die Wirtschaftlichkeit zu verbessern sollte die Umrüstung der Beheizung auf Niedertemperaturniveau immer im Zuge einer Komplettsanierung vorgenommen werden.

### **Umweltverträglichkeit**

Analog zur Abschätzung der Amortisationszeit lassen sich keine allgemeingültigen Einsparpotentiale durch die Umstellung ableiten. Die Höhe der Energie- und CO<sub>2</sub>-Einsparung ist objektspezifisch. Wie oben beschrieben liegen die Einsparpotentiale zwischen 30 und 80 Prozent gegenüber einer konventionellen Heizungsanlage, da Vor- und Rücklauftemperaturen wesentlich geringer sind. Niedertemperaturheizungen sind zudem Hauptbestandteil für eine Transformation zu geringen Netztemperaturen im Fernwärmenetz als auch beim Einsatz von Wärmepumpen oder Solarthermieanlagen.

## 5.5 Netzgebundene Lösungen

Für die Bereitstellung des Wärmebedarfs in Frankfurt kommen verschiedene Energieträger und Formen zum Einsatz. Die sogenannte netzgebundene Wärmeversorgung in Form von Fernwärme und Ferndampf hat einen Anteil von rund 47 Prozent.

Die Mainova AG als größter Anbieter von Fernwärme unterhält verschiedene Fernwärmenetze inkl. Hausanschlussleitungen (HAL). Die Gesamtnetzlänge Wärme inkl. HAL betrug zum Jahresende 2013 rund 260 km. Davon entfielen rund 186 km auf Fernwärmeversorgungsleitungen exklusive 4km HAL sowie 22 km Nahwärmeversorgungsleitungen exklusive 12 km HAL. Danut werden 4.896 Hausanschlüsse versorgt. Die Fernwärmenetze der Mainova AG befinden sich im Innenstadtkern (Heizwasser- und Dampfnetz) sowie in Niederrad und in der Nordweststadt. Die Nahwärmenetze liegen zwischen Innenstadt und Nordweststadt, im Nordosten vom Innenstadtkern sowie vereinzelt westlich von Niederrad.

Darüber hinaus gibt es Fernwärmerversorgungen in den Industrieparks von Frankfurt sowie kleinere Nahwärmeinseln die von Wohnungsbauunternehmen oder Energie-Service-Unternehmen betrieben werden.

Da im Innenstadtkern von Frankfurt aufgrund der sehr hohen Wärmebelegungsichte heizwasserbasierende Fernwärmeversorgung schwer möglich ist, bleiben die alten Dampfnetze bestehen und werden nur in Teilbereichen durch Heizwassersysteme ersetzt.

Die in Frankfurt produzierte Fernwärme geht zum größten Teil den GHD Sektor (54 Prozent) sowie Haushalte (31 Prozent). Die Industrie bezieht lediglich einen Anteil von 15 Prozent (Jahr 2010, Abbildung 105). Dieser Sachverhalt ist darauf zurückzuführen, dass Haushalte und GHD geringere Versorgungstemperaturen zur Bereitstellung von beispielsweise Raumwärme benötigen. Im Vergleich dazu wird der in Frankfurt produzierte Ferndampf (Jahr 2010, Abbildung 105) vorrangig in der Industrie (80 Prozent) aufgrund der hohen erforderlichen Prozesstemperaturen eingesetzt. Die restlichen 20 Prozent kommen im GHD Sektor in der hoch verdichteten Innenstadt zur Anwendung. Ferndampf wird dort auch für Klimatisierungszwecke eingesetzt. Die Leistung der Absorptionskältemaschinen beträgt etwa 50 MW. Diese sind in den Bürotürmen der Innenstadt installiert.

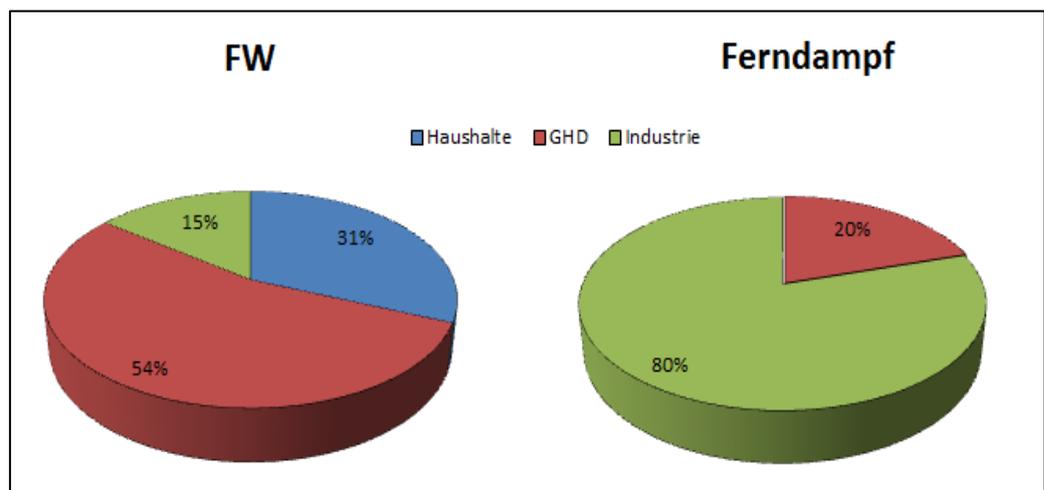


Abbildung 105: Aufteilung des (a) Fernwärme- und (b) Ferndampfbezugs nach Sektoren für die Jahre 1995, 2005, 2008, 2009 und 2010, eigene Darstellung (IBP) nach (ifeu 2011).

Durch eine Versorgung mittels Fernwärme/-dampf entstehen dem Nutzer folgende Vorteile:

- Eine komfortable, einfache, gleichbleibende und zuverlässige direkte Wärmeversorgung.
- Ein geringerer Platzbedarf und geringe Investitionskosten für die nutzereigene Heizungstechnik.
- Anfallende Kosten nur für den tatsächlichen Wärmeverbrauch und nicht für den Kauf eines überdimensionierten lokalen Kessels und dessen Verluste.
- Planungssicherheit für die Zukunft
- Entfall der Brennstoffbeschaffung

- Raumgewinn durch weniger Anlagentechnik
- Gegebene Versorgungssicherheit
- Niedriger Primärenergiefaktor
- Brand-/ Explosionsgefahr wird verringert
- Regionales Produkt und damit Förderung der regionalen Wertschöpfung
- Kein Schornsteinfeger
- neues Beratungsgeschäftsfeld für Heizungsbauer, Planer und Architekten

Praktizierter Umweltschutz durch die Nutzung der Abwärme des Müllheizkraftwerks in Frankfurt am Main und zum Teil Einspeisungen von Wärme aus erneuerbaren Energien ohne Investitionen seitens des Kunden.

Nachfolgend wird auf diverse Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung bei Fernwärmeversorgungssystemen eingegangen. Hierbei kann grob zwischen **Ausbau und Verdichtung**, der **Reduzierung der Netztemperaturen** sowie der **Integration von erneuerbaren Energien** unterschieden werden.

#### 5.5.1 Ausbau und Verdichtung der Fernwärmeversorgung

##### **Maßnahme**

Durch den Ausbau bzw. die Verdichtung einer bestehenden Fernwärmeversorgung können die Verluste eines Fernwärmenetzes reduziert und damit die Effizienz erhöht werden. Des Weiteren steigt mit sinkenden Verlusten die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems aufgrund eingesparter Brennstoffkosten. Die Umwelt profitiert durch die geringeren CO<sub>2</sub> Emissionen für die Wärmbereitstellung gegenüber konventionellen Systemen.

Der Ausbau und die Verdichtung bestehender Fernwärmesysteme sind von mehreren Faktoren abhängig:

- Wärmedichte
- Anzahl von Großabnehmern
- Verfügbarkeit von fossilen oder erneuerbaren Energieträgern.

Die Mainova AG verfügt über im gesamten Stadtgebiet verteilte Nah- und Fernwärmenetze. In Abbildung 106 wird eine Übersicht zu der geplanten FW-Ausbaustrategie sowie die Ausbaustandorte der NetzDienste RheinMain der Mainova AG gegeben.

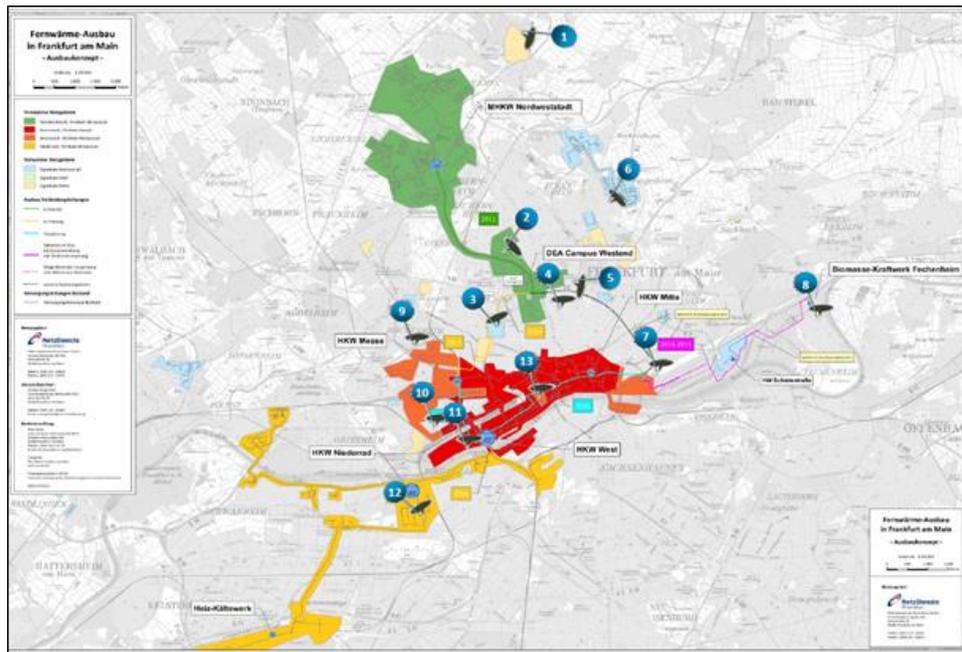


Abbildung 106: Übersicht Fernwärme-Ausbau in Frankfurt am Main, (Mainova AG 2014).

Nach Abbildung 106 ist ein Gesamtverbund der Mainova-Kraftwerke innerhalb der Stadt, der einen flexibleren und effizienteren Einsatz der Erzeugungsanlagen ermöglicht geplant. Ziel ist es durch den Ausbau jährlich 100.000 Tonnen CO<sub>2</sub> einzusparen. Das dafür benötigte Investitionsvolumen beträgt in den kommenden Jahren rund 90 Mio. € (EUWID, 2014).

Für den weiteren Ausbau und die Verdichtung der Fernwärme sind neue Erzeugungsanlagen im bestehenden Netz an neuen bzw. bestehenden Standorten zu errichten und in den Betrieb zu integrieren. Hierfür ist eine detaillierte Prüfung der Machbarkeit erforderlich (Institut für Energie- und Umweltforschung, 2014).

Neben den oben aufgeführten Fragestellungen ist die Entwicklung einer neuen Regelstrategie und eine Vielzahl weiterer Voraussetzungen wie z.B. Flächenbedarf, evtl. Anbindung ans Verkehrs-, Strom- oder Gasnetz, Immissions-situation etc. im Vorfeld abzuschätzen und in den Planungen zu berücksichtigen.

Da insbesondere Siedlungen mit einer sehr niedrigen Wärmedichte, wie z.B. großflächig bebaute Niedrigenergie-Einfamilienhaussiedlungen einen wirtschaftlichen Betrieb von konventionellen Fernwärmesystemen in Frage stellen, geht hier der Trend zu kleinen dezentralen Nahwärmelösungen mit niedrigen Temperaturniveau.

Der Anschluss von Mehrfamilienhäusern mit Passivhausstandard an Fernwärmenetze kann, wenn eine dichte Bebauung gegeben (z.B. große Mehrfamilienhaussiedlungen) ist, durchaus wirtschaftliche Versorgungsmöglichkeit darstellen (Bahnstadt Heidelberg, 2007).

In den vergangenen Jahren entstanden in Frankfurt diverse kleine Nahwärmenetze speziell in Neubaugebieten, wie z.B. Frankfurter Bogen, Edwards Garden und Lindenviertel. Häufig wurden dafür bestehende Heizzentralen erweitert und mit Kraft-Wärme-Kopplung nachgerüstet. Auch künftig werden weitere große Neubaugebiete, wie z.B. Alter Schlachthof, Rebstock, Westhafen und das Europaviertel dem Beispiel der Siedlung Am Riedberg folgen und an bestehende Fernwärmenetze der Innenstadt oder Nordweststadt angeschlossen werden (Energierreferat Frankfurt, 2014).

Als Maßnahme gilt es künftig das bestehende Netz weiter zu verdichten und neue Inselnetze zu entwickeln. Dadurch soll der Anteil der Fern-/Nahwärme von derzeit rund 24 Prozent am Wärmebedarf der Wohn- und Nichtwohngebäude (ohne Industrie) auf rund 50 Prozent erhöht werden. Der Grund für die Verdopplung der Anteile der Fernwärme ist nicht nur auf den Ausbau der Fern- und Nahwärmenetze zurückzuführen sondern auch auf die Wärmebedarfsreduktion durch energetische Sanierungen im Wohn- und Nichtwohngebäudebestand bei nicht Fernwärme versorgten Quartieren.

## **Hemmnisse**

...beim Auf-/Ausbau von Nah-/Fernwärmenetzen (Betreiber)

### Hohe Kosten

Die Neuerrichtung von Fernwärmesystem in bestehenden Quartieren ist mit hohen Anfangsinvestitionen verbunden. Während in Neubaugebieten die Verlegung im Zuge der Erschließung von Telefon- und Stromleitungen erfolgt, müssen bei der Verlegung im Bestand größere Aushubarbeiten vorgenommen werden.

### Plattform für geplante Erneuerungen von Leitungen → hohe Kosten

Als Maßnahme zur Senkung der hohen Kosten bei der Verlegung von Nah- bzw. Fernwärmerohre im Bestand erstellt die Stadt Frankfurt am Main zusammen mit den verantwortlichen Unternehmen eine Kartenübersicht zu Versorgungsleitungen in Frankfurt. In dieser werden neben der Versorgungsart (Telefon, Gas, Wasser etc.) auch das Alter und die qualitative Beschaffenheit der Leitung erfasst. Da die Stadt Unternehmen nicht zur Offenlegung verpflichten kann, ist die Umsetzung dieser Maßnahme als unwahrscheinlich einzustufen. Durch eine verbesserte Kommunikation zwischen den Akteuren könnten bei der Erneuerung von Leitungen auch im Bestand die Instandsetzungskosten der Nah- bzw. Fernwärme gesenkt werden.

### Unsicherheiten hinsichtlich der Entwicklung der Anschlussdichten

Neben den hohen Investitionskosten besteht für den Fall, dass kein Anschlusszwang vorliegt, für den Betreiber die Gefahr, dass sich nicht ausreichend Leu-

te für einen Anschluss entscheiden. Eine nicht ausreichende Wärmebelegungsichte<sup>21</sup> führt zu einem unwirtschaftlichen Netzbetrieb. Durch die Novellierung der Hessischen Bauordnung vom 3. Dezember 2010 und die damit einhergehende Streichung des im §81 angeführten Abs.2 der Hessischen Bauordnung aus dem Jahr 2002 besteht eine Rechtsunsicherheit hinsichtlich der Festsetzung des Anschluss- und Benutzungszwangs an Nah- und Fernwärmenetze. Während vor der Novellierung lediglich eine „Primärenergieeinsparung“ und eine „Verringerung des Schadstoffausstoßes“ Rechtsgrundlage für §19 Abs.2 Hessische Gemeindeordnung war, muss nun der Grundsatz des „öffentlichen Bedürfnis“ nachgewiesen werden. Die Fragestellung, ob Fernwärme ein öffentliches Bedürfnis ist, wird häufig kontrovers diskutiert (Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, 2011), (Land Hessen, 2005).

...beim Auf-/Ausbau von Nah-/Fernwärmenetzen (Nutzer)

#### schlechte Informationslage

Oft werden durch falsche Darstellungen seitens der Medien Bedenken gegenüber Nah- und Fernwärmeprojekten bei den potentiellen Nutzern hervorgerufen. Diese verbinden die Umstellung der Heizung mit Stress, Dreck und hohen Kosten. In vielen Fällen ist den potentiellen Anschlussnehmern meist gar nicht bewusst, dass sie durch einen Anschluss ihre Heizkosten reduzieren können und Kellerraum gewonnen wird.

#### **Maßnahmen zum Abbau von Hemmnissen**

##### Wiederaufnahme des gestrichenen §81 Ab.2 der HBO von 2002 → Unsicherheit hinsichtlich der Entwicklung der Anschlussdichten

Durch die Wiederaufnahme des gestrichenen §81 der Hessischen Bauordnung (HBO) von 2002 kann in Verbindung mit §19 Abs.2 der hessischen Gemeindeordnung (HGO) die Rechtsgrundlage für einen Anschluss- und Benutzungszwang von Fern- und Nahwärmeversorgungen wieder gefestigt werden.

##### Informationskampagnen → Abbau von Informationsdefiziten

Mit Hilfe von Informationskampagnen und Öffentlichkeitsarbeit können Bedenken und Zweifel bei zukünftigen Nahwärmenetzen reduziert werden. Durch das Ausräumen der Zweifel verschwindet der negative Beigeschmack eines Anschlusszwangs. Hierfür hat das Energiereferat zusammen mit der Mainova AG mit dem „Informationspaket-Fernwärme“ bereits ein großes Stück zur Sensibilisierung der Bürger mit dem Thema Fernwärme beigetragen. In Zukunft lautet das Ziel, die Angebote des Energiereferats noch deutlicher nach außen zu tragen.

---

<sup>21</sup> abgesetzte Wärme in MWh pro km

## 5.5.2 Senkung der Netztemperaturen

Das Fernwärmenetz der Mainova AG lässt sich in ein Heißwassernetz mit Vorlauftemperaturen zwischen 100–130°C und ein Dampfnetz mit Vorlauftemperaturen von >130°C untergliedern. Die Temperatur des in den Leitungsnetzen fließenden Heizwassers variiert mit den Jahreszeiten. Im Sommer beträgt sie 80°C, im Winter steigt sie auf 120 bis 130°C an<sup>22</sup> (Frankfurter Neue Presse, 2014). Die Nahwärmenetze hingegen werden mit einer gleitenden Vorlauf-temperatur bis 90°C betrieben (Mainova AG).

Die allgemeine Entwicklung der Fernwärme führte in den letzten Jahrzehnten weg von Hochtemperatur Dampfwärmenetzen (180°C) über Hochtemperatur- (>100°C) und Mitteltemperatur- (70-100°C) Heizwassernetze hin zu Niedertemperatur- (<60°C) und kalten Nahwärmenetzen (<35°C) der sogenannten 4. Generation.

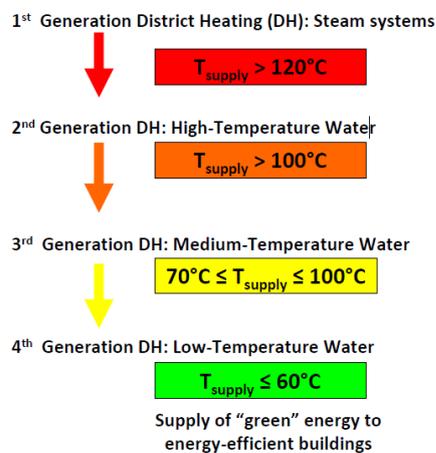


Abbildung 107: Definition der Fernwärme der 1. – 4. Generation hinsichtlich Ihrer Versorgungstemperaturen (Dalla Rosa, 2012).

Maßgebende Treiber für diese Entwicklung sind die (Frederiksen & Werner, 2013):

- Reduzierung der Investitionskosten,
- Zugewinn an Wohnraum,
- Verkürzung der Installationszeit,
- sowie die Reduzierung der Betriebskosten.

Auch ist die Absenkung der Netztemperatur für den Einsatz von erneuerbaren Energien (Solarenergie, Geothermie) und Sekundärenergie (Abwärme aus Industrieprozessen und Abwasser) erforderlich, da der Einsatz von Solarthermie oder Groß-Wärmepumpen erst ab Temperaturen kleiner 100°C möglich ist.

---

<sup>22</sup> Das Wärmenetz der Mainova AG wird nur wenige Stunden pro Jahr mit 130°C betrieben. Im Monatsmittel betragen selbst im Dezember bis Februar die Netztemperaturen knapp über 100°C.

Beim Aus- und Neubau neuer Nahwärmenetze mit geringeren Versorgungstemperaturen können hochgedämmte TwinPipes (Vorlauftemperatur <math><60^{\circ}\text{C}</math>), die den Vorlauf sowie Rücklauf in einem gemeinsamen Rohr führen, sowie nicht gedämmte Versorgungsleitungen (Vorlauftemperatur <math><20^{\circ}\text{C}</math>) zum Einsatz kommen, die die Wärmeverluste im Netz auf ein Minimum reduzieren. Für die Umsetzung der Nutzung von Niedertemperatur-Fernwärme und die Steigerung der Effizienz des Gesamtsystems werden im Folgenden mögliche Umsetzungsmaßnahmen beschrieben und bewertet.

Tabelle 4 zeigt verschiedene Maßnahmen zur Reduzierung der Vor- und Rücklauftemperatur in einem bestehenden Fernwärmesystem. Die Absenkung der Vorlauftemperatur ermöglicht den Einsatz von Niedertemperaturquellen, wie z.B. Abwärme aus Industrieprozessen und Geothermie, für die Wärmeversorgung von Gebäuden. Damit können gleichzeitig die Verluste im Netz auf ein Minimum reduziert werden (Wirths, 2008).

Tabelle 4: Priorisierung der Einzelschritte zur Netztransformation hin zu niedrigen Temperaturniveaus

<b>Maßnahmen</b>	<b>Aufwand</b>	<b>Schwierigkeiten</b>	<b>Potential</b>	<b>Priorität</b>	<b>Reihenfolge</b>
<b>T<sub>RL</sub>-Absenkung bei Großkunden</b>	xxx	xxx	xxx	xxxxx	1
<b>T<sub>RL</sub>-Absenkung bei einzelnen Kunden durch Änderung der TWW-Bereitstellung</b>	xxx	xxxx	xxx	xxx	2
<b>T<sub>RL</sub>-Absenkung bei einzelnen Kunden durch Änderung des Heizsystems</b>	xxxx	xxxx	xxx	xxxx	3
<b>T<sub>RL</sub>-Absenkung in Netzteilen</b>	xxx	xx	xx	xxx	4
<b>T<sub>VL</sub>-Absenkung bei Einzelkunden</b>	xxxxx	xxxxx	xxxx	xxxxx	5
<b>T<sub>VL</sub>-Absenkung in Netzteilen</b>	xxxx	xx	xxxxx	xxxxx	6

## **Hemmnisse**

### Temperaturniveau beim Endverbraucher

Eine unbegrenzte Reduzierung des Temperaturniveaus ist nicht möglich. Für die Bereitstellung von Raumwärme auf einem Temperaturniveau von 20°C ist eine minimale Versorgungstemperatur von 28°C für das Flächenheizsystem bereitzustellen. Im Großteil des Gebäudebestandes sind keine Flächenheizsysteme vorhanden. Für die Versorgung mit Trinkwarmwasser sind Temperaturen von mindestens 60°C erforderlich. Um diese Temperaturen zu erreichen, besteht die Möglichkeit die Vorlauftemperatur der Fernwärme auf 60°C zu erhöhen bzw. das Trinkwarmwasser dezentral mit Hilfe eines elektrischen Heizstabs, einer Brauchwarmwasserwärmepumpe bzw. eines Wärmetauschers nach zu erhitzen. Für die Brauchwarmwasserbereitung für Großanlagen/Mehrfamilienhäuser ist aufgrund der Legionellen-Problematik im Normalfall eine Mindesttemperatur von 60°C einzuhalten. Soll das Wasser für die Heizung und das Trinkwarmwasser mit einem einheitlichen System erhitzt werden, sind die Möglichkeiten zur Temperaturabsenkung in Fernwärmesystemen in Deutschland dadurch auf etwa 65°C bis 70°C begrenzt. Weiter bestehen vertragliche Hemmnisse die Netztemperatur zu senken. Vielen Bestandskunden wird eine gewisse Netztemperatur vertraglich zugesichert. Bei einer Umstellung müsste die Frage geklärt werden, wer die Kosten auf Seiten des Endenergieabnehmers trägt.

### Örtliche Konzentration der Wärmeabnahme

Aufgrund der örtlichen Konzentration der Wärmeabnahme ist gerade in der Frankfurter Innenstadt eine Reduktion der Netztemperaturen nicht möglich. Der dort eingesetzte Ferndampf ist für die Versorgung der Hochhäuser zwingend erforderlich (Mainova AG, 2010).

## **Maßnahmen zum Abbau von Hemmnissen**

Die Senkung des Temperaturniveaus beim Endverbraucher bzw. der Einbau von Flächenheizungen bedingt eine energetische Modernisierung im Gebäude. Maßnahmen die zu einer Steigerung der energetischen Modernisierungsrate führen finden sich in Kapitel 5.1.

### Rücklaufnutzung

Eine weitere Maßnahme zur Reduzierung der Netztemperatur stellt die Rücklaufnutzung dar. Die Rücklaufnutzung ist möglich in Siedlungen mit einem sehr geringen Wärmebedarf. Dabei wird der anstehende Rücklauf einer bestehenden Fernwärmeleitung zur Beheizung der anliegenden Siedlung verwendet.

Folgende Punkte sind vor einer Umsetzung zu beachten und zu untersuchen:

- Massenstrom und Rücklauftemperatur des bestehenden Netzes
- Häufung von Rücklaufanschlüssen in einem Gebiet und die damit verbundene Reduzierung der Rücklauftemperatur
- Bei Dreifachanschluss ist eine zusätzliche Hausanschlussleitung erforderlich

- Temperaturniveau der Anschlussnehmer muss niedrig genug liegen
- mehr Vorlaufwassereinspritzung bei nachgeschalteten Rücklaufanschlüssen
- Prüfung der Möglichkeit einer Gebietsbeimischstation<sup>23</sup> in Netzbereichen, die am Endstrahl liegen

### **Best Practice**

*„Umstellung der Fernwärme auf erneuerbare Energien, Reduzierung der Rücklauf-temperatur und Nutzung des Fernwärmerücklaufs“ - Ulm, Deutschland*

Die Fernwärme in Ulm deckt rund 50 Prozent gesamten Wärmebedarfs der Stadt Ulm. Das Netz ist aufgeteilt in ein altes Dampfnetz mit einer Vorlauf-temperatur von 180°C und ein Heizwassernetz mit einer Vorlauf-temperatur zwischen 90-110°C.

Die Stadt Ulm hat sich zum Ziel gesetzt eine Wärmeversorgung unabhängig von fossilen Energieträgern (Gas, Öl, Steinkohle) umzusetzen, die Vorlauf- und Rücklauf-temperaturen ohne Beeinträchtigung der Versorgungsqualität für die Kunden zu reduzieren sowie den Fernwärmerücklauf in Neubaugebie-ten oder sanierten Altbaugebieten zu nutzen.

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen konnten damit im gesamten Ulmer-Fernwärmenetz um 80 Prozent reduziert werden. Der Anteil an regenerativen Brennstoffen liegt bei mehr als 60 Prozent (Zepf, Ziegler, Zieher, & Floß, 2012).

### **Wirtschaftlichkeit / Kosten**

Wie aus dem Kostenvergleich aus Abbildung 108 hervorgeht stellt der Fern-wärmeanschluss von Neubauten die kostengünstige Variante dar. Neben den geringen Innovationskosten für Wärmeübertrager zur Heizung- und Wasser-erwärmung, eine Hochtemperatur Umwälzpumpe auf der Primärseite, weitere Armaturen auf der Primär- und Sekundärseite und Regelungstechnik fallen keine weiteren Kosten für den Gebäudeeigentümer an.

---

<sup>23</sup> Ankopplung eines kompletten Gebiets an den Rücklauf

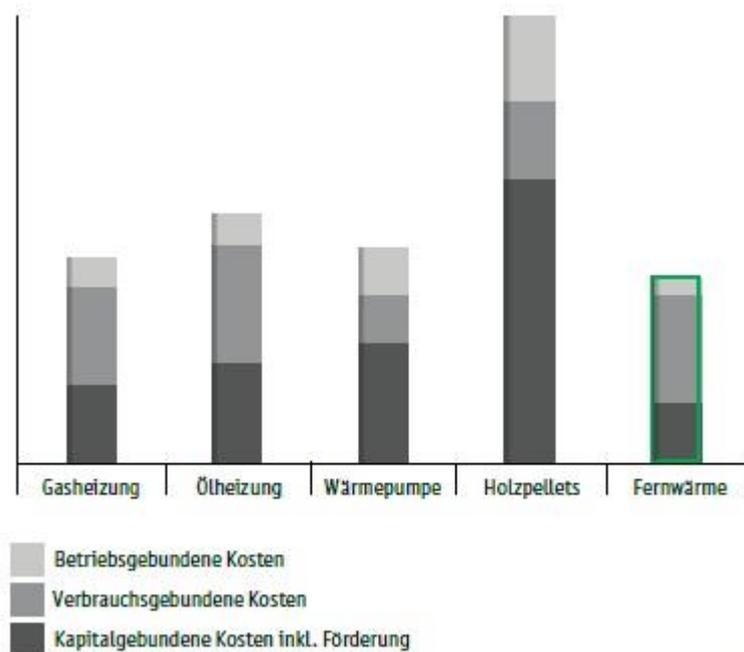


Abbildung 108: Vollkostenvergleich dezentraler Heizsysteme mit der Fernwärme im Neubau, (Stadtwerke Flensburg GmbH, 2012).

Für die Errichtung von Fernwärme im Bestand amortisieren sich die Mehrkosten der Fernwärme aufgrund der deutlich niedrigeren Betriebs- und Verbrauchsgebundenen Kosten deutlich innerhalb des Lebenszyklus. Neben den monetären Vorteilen profitiert der Anschlussnehmer von freiwerdenden Wohn- bzw. Kellerraum und einem rundum Sorglos-Paket. Zudem steigt der Komfort, da die Wärme mit Aufdrehen des Heizungsrohr sofort zu Verfügung steht.

### Umweltverträglichkeit

Ein genaues Einsparpotential einer netzgebundenen Lösung oder der Nutzung des Rücklaufs muss wie auch bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung für jedes Projekt genau quantifiziert werden. Der größte Vorteil der Fernwärme liegt in der relativ schnellen Erhöhung des regenerativen Anteils im Wärmesektor. Bestehende Netze, die heute noch mit Erdgas oder Kohle befeuert werden, können gegenüber der dezentralen Gebäudelösung einfacher auf Biomasse umgestellt werden. Bei einer Temperaturabsenkung des Rücklaufs von 15 K können nach dem beschriebenen Beispiel die Wärmeverluste um neun Prozent und der Pumpenstrom bis zu 53 Prozent reduziert werden. Im Zuge von Quartierskonzepten sollten somit die Möglichkeit des Anschlusses an die Fern- bzw. den Aufbau eines Nahwärmenetzes Berücksichtigung finden.

### Kaskadierung

Die Kaskadierung der Temperaturniveaus innerhalb eines Fernwärmenetzes erhöht den Nutzen des Energieflusses. Hierfür sind verschiedene Tempera-

turniveaus gemäß ihren Anforderungen im Gebäude zu kaskadieren. Ziel ist eine an den Bedarf angepasste Nutzung von Energiequellen. Dies wird durch Abbildung 109 verdeutlicht. Künftig sollen qualitativ hochwertige Energieträger wie Strom und fossile Energieträger nur noch zum Betrieb von Elektrogeräten oder zur Bereitstellung von Prozesswärme in der Industrie eingesetzt werden. Für die Bereitstellung von Raumwärme und TWW, ist es auch ausreichend diese Bedarfe mittels Niedertemperatur in Form von Abwärme aus der Industrie und Abwasser, sowie Geothermie und Solarthermie bereitzustellen.

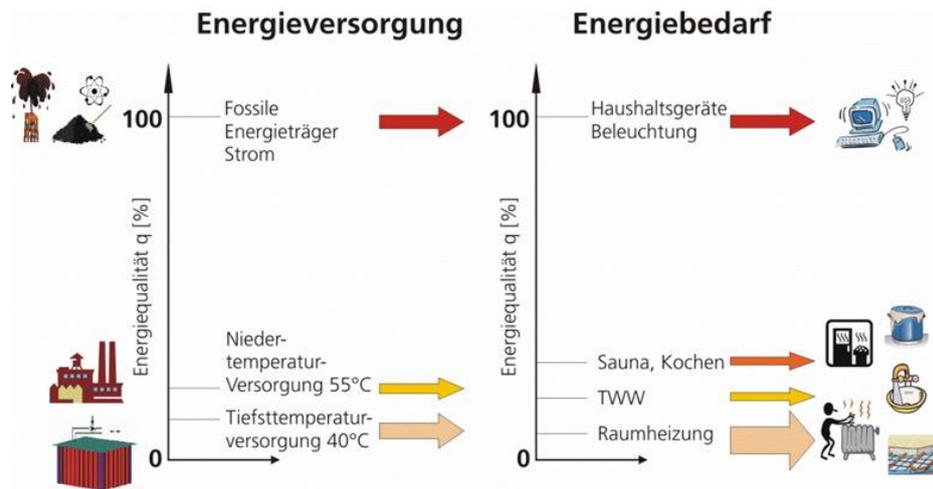


Abbildung 109: Angepasste Energieversorgung mit Quellen unterschiedlicher Qualitätsstufen für ein Gebäude mit Nutzungen in unterschiedlichen Qualitätsstufen, Quelle: (VTT Technical Research Centre of Finland).

Insbesondere Standorte mit einer hohen Mischung aus Hoch- und Niedertemperatur Abnehmern sowie die Nähe zu Industriestandorten mit hohen Abwärme-Temperaturen eignen sich ideal zur Kaskadierung. Dies erfordert eine intelligente Anordnung und Management der anstehenden Temperaturniveaus. Bi-direktionale Versorgungskonzepte, Kurzzeitspeicher und kaskadierte Versorgungsleitungen bieten dafür eine vielversprechende Möglichkeit, um die Gesamteffizienz der Energienutzung zu verbessern. Auch die Abwärme aus Industrieprozessen auf einem Temperaturniveau von ca. 80°C ist für die Beheizung von bestehenden Gebäuden mit einem hohen Wärmebedarf einsetzbar (s. Abbildung 110). Deren Rücklauf ist oftmals noch warm genug (ca. 40°C), um gut gedämmte Niedrigenergiehäuser ausreichend mit Wärme zu versorgen.

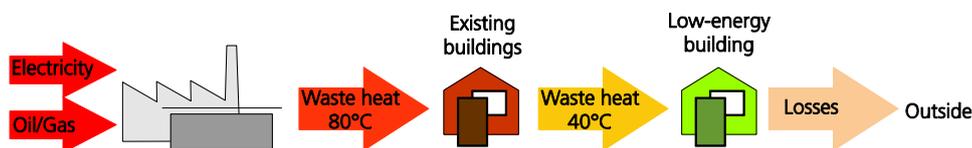


Abbildung 110: Kaskadierung eines Wärmestroms nach einem KWK-Prozess oder Industrieprozess, eigene Darstellung (IBP).

### 5.5.3 Inselnetze „kalte Fernwärme“

#### **Maßnahme**

##### Untersuchung des „kalten“ Fernwärmepotentials in Frankfurt am Main

Eine künftige **Alternative** zu konventionellen Nah- und Fernwärmesysteme stellen sogenannte „kalte“ Fernwärmenetze dar. Diese Netze nutzen Abwärme (Kaskadierung), erneuerbare Energien und Erdwärme, die Temperaturen nahe der Umgebungstemperatur „bereitstellen“. Insbesondere in Neubaugebietern mit sehr geringem Endenergiebedarf (Beispiel: Areal Henninger Turm) und vorrangigem Einsatz von Niedertemperatur-Flächenheizsystemen stellt die „kalte“ Fernwärme eine sehr gute Alternative zu konventionellen Fernwärmelösungen dar. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass im Fall der „kalten“ Fernwärme (<40°C) kein Brauchwarmwasser zentral bereitgestellt werden kann, es sei denn ein 4-Leiter System wird installiert und die " kalte Fernwärme " wird im Sommer zur Spitzenkühlung verwendet. In diesem Fall ist stets eine dezentrale Nachheizung mit Hilfe einer dezentralen Wärmepumpe oder thermischen Solaranlage und eines elektrischen Heizstabs erforderlich.

"Kalte" Fernwärmeleitungen haben jedoch viele Vorteile. Sie arbeiten mit Temperaturen die nur geringfügig wärmer als das umgebende Erdreich sind. Dadurch entstehen nahezu keine Wärmeverluste im Netz und die Dämmung der Rohre kann auf ein Minimum reduziert werden. Wegen der wesentlich höheren und konstanten Eingangstemperaturen haben die dezentralen Wärmepumpen an der „kalten“ Fernwärme eine bessere Leistungszahl als mit Erdkollektor oder Tiefenbohrung und damit einen geringeren Stromverbrauch. Jahresarbeitszahlen von fünf und mehr sind damit erreichbar. Die Pufferwirkung des Erdreichs verlangsamt gleichzeitig den Temperaturabfall im Netz. Ein Spitzenlastkessel, der in der Regel fossile Energie verheizt, ist nicht notwendig und auch bei Ausfall der Nachheizung für Stunden oder Tage treten bei den Kunden keine Probleme auf. Die Wärmepumpen brauchen nur kurzfristig etwas mehr Strom, weil ihre Eingangstemperatur langsam absinkt.

#### **Hemmnisse**

Die Hemmnisse beim Ausbau, Verdichtung sowie der Reduzierung der Netztemperaturen sind sehr unterschiedlich. Die hier dargestellten Hemmnisse sind somit nur als Haupthemmnisse zu sehen.

##### Differenzierte Betrachtung von Energieversorgung und Stadtentwicklung

Ein leicht abzuschaffendes Hemmnis aber dennoch großes Hemmnis bei der Planung des Nah- Fernwärmeausbaus ist oft die losgelöste Betrachtung der Energieversorgung von der zukünftigen Stadt- bzw. Quartiersentwicklung. Durch die Kopplung der Energieversorgung an die Stadtentwicklungspläne können derzeitige und zukünftige Abwärmepotentiale identifiziert und besser in der Planung der Energieversorgung berücksichtigt werden. Folglich sollte die Energieversorgung als fester Baustein bei der Quartiers- und Stadtplanung mit aufgenommen werden.

### bei der Anschlussdichte

Ein rechtliches Hemmnis für den Ausbau der Fernwärme im Bestand ist der fehlende Nutzungszwang bestehender Gebäude in einem Fernwärmeverranggebiet an die Fernwärme anzuschließen (siehe Hemmnis hinsichtlich des Ausbaus und der Verdichtung der Fernwärmeversorgung: Unsicherheit hinsichtlich der Anschlussdichte Seite 156). Aufgrund der Ungewissheit über die Entwicklung der Anschlüsse fehlt dem Projektierer die Kalkulationsbasis für den Aufbau bzw. die Verdichtung der Netze. Dies ist jedoch von Bundesland zu Bundesland zu betrachten.

### Begrenzter Einfluss auf die Netztemperaturen

Die Netztemperaturen werden maßgeblich von den benötigten Temperaturen beim Endverbraucher bestimmt. Eine Reduktion der benötigten Vorlauftemperatur in den Gebäuden muss flächendeckend geschehen, damit die Nah-Fernwärmenetztemperatur gesenkt werden kann. Wenn nur ein paar der angeschlossenen Verbraucher ihre Netztemperatur im Haus mittels energetischer Sanierung reduzieren kann eine Temperatursenkung im Wärmenetz aufgrund der restlichen „Normal-Temperatur“ Verbraucher nicht vorgenommen werden. Somit steht die Senkung der Netztemperatur in unmittelbarem Zusammenhang mit der energetischen Sanierung im Quartier.

### Zusammenfassung der Hemmnisse

Die Hemmnisse, die einem Ausbau der Fernwärme entgegenstehen, sind mehr soziologisch/ ökonomischer als technisch/struktureller Art. An dieser Stelle wäre das fehlende Wissen des Anschlussnehmers hinsichtlich der Vorteile von Fernwärme gegenüber konventionellen dezentralen Lösungen anzuführen. Weiter wird derzeit Fernwärme noch zu schlecht vermarktet, um Unentschiedene für den Anschluss zu gewinnen. Weiter kam es aufgrund von verspäteter Beteiligung von Betroffenen zu ablehnenden Haltungen gegenüber geplanter Projekte. Auch die, wie oben erwähnt, fehlende ganzheitliche Betrachtung von Energieversorgung in Zusammenhang mit Quartiersentwicklung ist ein Grund für das Scheitern.

## **Maßnahmen zum Abbau von Hemmnissen**

### Satzung zur Anschlusspflicht an die Fernwärmeversorgung

Eine Satzung für bestehende Fernwärmegebiete sowie durch den Netzausbau potenziell anschließbare Siedlungsgebiete sollte geprüft werden.

### Ausbau von Flächenheizungen (ganzheitlicher Ansatz)

Die Einflussnahme der Stadt hinsichtlich des in Wohngebäuden zu verbauenden Heiztemperaturniveaus (Fußbodenheizung, Radiatoren etc.) ist begrenzt. Durch das Auflegen eines speziellen Förderprogramms, das neben der energetischen Sanierung der Gebäudehülle den Einsatz von Flächenheizungen bezuschusst, kann der Anteil an Flächenheizungen im Bestand erhöht werden. Das alleinige Bereitstellen von Förderprogrammen wird nicht ausreichen, um die

Voraussetzungen für die Senkung der Netztemperatur zu schaffen. Aufgrund des direkten Zusammenhangs zwischen energetischer Sanierung und Senkung der Netztemperatur muss auf ein ganzheitlicher Ansatz, der sowohl Maßnahmen aus der Sanierung als auch zum Ausbau der Fernwärme vereint zurückgegriffen werden. Somit müssen Energieversorgung und Sanierungspläne mit in Quartierskonzepte integriert werden. Schon in der Konzeptionsphase ist auf die frühestmögliche Partizipation der Bürger zu achten. Unterstützt durch die von der Stadt eingesetzten Quartiersmanager (siehe Kfw Förderprogramm 432 – Sanierungsmanager) können das Energieversorgungskonzepte und die damit verbundenen Maßnahmen in die Breite getreten werden. Dabei übernimmt der Quartiersmanager neben dem Werben für Fernwärme die Aufgabe die Eigentümerstrukturen und den energetischen Standard im Quartier zu identifizieren. Weiter stehen diese den Bürgern in enger Kooperation mit dem Energiepunkt bei der Beratung von Förderprogrammen zur Seite. Durch eine breite Partizipation der Bürger, sowie eine detaillierte Analyse der Eigentümerstruktur und der Sanierungszyklen im Quartier kann die Umsetzung des Quartierskonzepts beginnen.

### **Best Practice**

*„Abwärmenutzung aus Abwasser einer Molkerei mittels externen Wärmeübertragern zur Beheizung einer Multifunktionshalle“ - Aurich, Deutschland*

Die aus 30°C warmen Abwässern der Molkerei Rücker basierende "kalte Fernwärme" gehört zum innovativen Energiekonzept der Stadt Aurich - die damit zum Preisträger im bundesweiten Innovationswettbewerb "365 Orte im Land der Ideen" wurde.

In dem Molkereibetrieb Rücker am Rande der Stadt Aurich fallen stündlich zwischen 30 und 90 m<sup>3</sup> vorgereinigtes Abwasser an, das in einer Druckleitung zur Kläranlage gepumpt wird. In einer externen Wärmeüberstation kann durch die Abkühlung des Abwassers bis zu 1,5MW Wärme mit einer Temperatur von 12 bis 25°C gewonnen werden. Auf diesem niedrigen Temperaturniveau gelangt Heizwasser als "kalte Fernwärme" über eine knapp 1,5 km lange Fernwärmeleitung zur Veranstaltungshalle der Sparkassen-Arena. Auf der Sekundärseite steht damit 14°C warmes Wasser für die Wärmepumpen zu Verfügung. Diese Wärmepumpe bringt mit 85kW Wärmeleistung das Wasser auf ein Temperaturniveau von rund 55°C. Verteilt auf das Heizungssystem und die Warmwasserversorgung der Mehrzweckhalle deckt sie somit die Grundlast des Wärmebedarfs. Bei ungleichmäßigem Verbrauch lässt sich die Wärme in Pufferspeichern zwischenspeichern. Das durch die Wärmepumpe abgekühlte Abwasser fließt weiter zur Kläranlage, wo die Restwärme zur Klärschlamm-trocknung eingesetzt werden soll. Mittels der sehr geringen Netztemperaturen von 15-25°C kann auf eine teure Wärmeisolierung der Rohrleitung verzichtet werden.

Um die gewonnene Energiemenge vom mit Molke- und Fettresten versetzten Abwasser für die Wärmepumpentechnik nutzbar zu machen, ist ein Wärme-

tauscher notwendig. Dieser ist ausgestattet mit einer automatisierten Abreinigung der Rohroberflächen und einem Sedimentaustrag. Dies garantiert dauerhaft einen maximalen Wärmeübertrag und maximale Leistungsfähigkeit. Die „kalte“ Fernwärme versorgt den Wärmeabnehmer mit „kaltem“, d.h. zunächst nur leicht erwärmten Wasser (15-25°C) aus dem Wärmetauscher, bevor dieses in der örtlichen Wärmepumpe zur Erzeugung der Versorgungstemperatur (45-55°C) genutzt wird. Das hat den Vorteil, dass die Wärmeverluste beim Transport minimiert werden können. Außerdem arbeitet die anschließende Wärmepumpe beim Wärmeabnehmer dann besonders effektiv. Für die Sparkassen-Arena bedeutet die Nutzung der "kalten Fernwärme" eine Reduktion der Energiekosten von mehr als 40 Prozent und eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emission von mehr als 40 Prozent. Das System ist empfindlich gegen Verunreinigungen und verlangt hohe Ansprüche an die Filtertechnik.

#### 5.5.4 Integration von erneuerbaren Energien in Wärmenetzen

##### **Maßnahme**

##### Festlegung eines Mindestanteils aus erneuerbaren Energien und Abfall

Die Integration von Erneuerbaren Energien (EE), wie Geothermie, Biomasse, Solarthermie und Abwärme, in ein bestehendes Fernwärmesystem ist sehr komplex und stellt eine große Herausforderung für die Fernwärmeversorgung dar. Zwei technische Randbedingungen sind dabei von großer Bedeutung:

- Erhaltung und Verbesserung der Gesamteffizienz des Versorgungssystems
- (Erzeugerstruktur, KWK-Stromerzeugung, Aufteilung in Grund- und Spitzenlastabdeckung, Pumpstromaufwand, Temperaturanforderungen)
- Gewährung der Versorgungssicherheit (Temperatur- und Druckanforderungen, Speicherkapazitäten).

Dafür sind folgende Voraussetzungen für die Integration von Erneuerbaren Energien in das bestehende Fernwärmesystem vorab zu analysieren:

- Produkt (Wärme/Strom; Grundlast/ Spitzenlast),
- verfügbares Temperaturniveau,
- Leistungsklasse,
- Logistik,
- Integrationsfähigkeit in das System.

Um einen möglichst hohen Anteil an Erneuerbaren Energien zu erreichen, ist ein Netz so zu gestalten, dass die Druck- und insbesondere Temperaturniveaus so gering wie möglich sind. Auch der Einsatz von Wärmespeichern unterstützt den Einsatz von nicht konstant verfügbaren Erneuerbaren Energien (insbesondere Solarthermie). Im Folgenden wird auf die unterschiedlichen regenerativen Energieträger im Fernwärmenetz eingegangen.

Als Maßnahme wird vorgeschlagen einen Mindestanteil aus folgenden erneuerbaren Energien im Fernwärmenetz festzulegen. Die Entscheidung welcher regenerativen Energieträger sowie Abfall genutzt wird, bleibt dem Energiever-

sorger überlassen. In 5 Jahresschritten sollte das EE-Ziel neu festgelegt werden.

## **Biomasse**

Für die Nutzung von Biomasse können verschiedene Typen von Heizkraftwerken auf Basis von Biomasse unterschieden werden. Biomassekraftwerke (BMKW) erzeugen Strom und/oder Fernwärme bzw. Nahwärme durch die Verbrennung von Biomasse. Wird hingegen nur Wärme erzeugt, so spricht man von einem Biomasseheizwerk (BMHW). Wird neben Wärme auch Strom abgegeben, so spricht man von einem Biomasseheizkraftwerk (BMHKW). Häufig besteht die Biomasse aus Holz, dann spricht man von Holz(heiz)-kraftwerk (HHKW bzw. HKW).

Biomasseanlagen speisen in der Regel von zentralen Erzeugungsstandorten aus in Fernwärmenetze ein, so dass keine gravierende Änderung in der Regelstrategie des Netzes notwendig ist. Der Standort ist abhängig vom Standort der zur Verfügung stehenden Biomasse. Hierbei sind die Transportwege zur Anlieferung der Biomasse auf ein Minimum zu reduzieren. Daher werden Biomasseanlagen auch vorrangig am Stadtrand angeordnet.

Die Einbindung von holzartiger Biomasse in Fernwärmenetze ist grundsätzlich in Kessel- und KWK-Anlagen unterschiedlicher thermischer Leistungsklassen möglich. Holzartige Biomasse eignet sich zur Bereitstellung von Grund- und eingeschränkt auch von Spitzenlast. Aufgrund der Charakteristik des Verbrennungsprozesses mit dem resultierenden hohen Temperaturniveau ist eine sehr gute Einbindung in bestehende Hochtemperatur-Fernwärmenetze und in Dampfnetze möglich. KWK-Anlagen, die nach dem ORC-Prozess mit deutlich niedrigerem Temperaturniveau betrieben werden, eignen sich für Niedertemperaturnetze und weniger für bestehende konventionelle Fernwärmenetze. Diese Anlagen werden aufgrund der Vergütungsregelungen für den elektrischen Strom nach dem EEG überwiegend in der Grundlast betrieben.

Für das Generalkonzept wurde das bestehende technische Potential an Biomasse in Frankfurt und in den Kreisen des Regionalverbandes untersucht. Danach wären rund 168,5 GWh thermisches Biomassepotential innerstädtisch und 1.225 GWh in der Region vorhanden. Das ungenutzte innerstädtische Potential wird auf rund 8.000 Tonnen Grünabfall geschätzt. Dies entspräche einer Wärmemenge von rund 20 GWh. Somit sind rund 12 Prozent der Grünabfälle noch ungenutzt bzw. 88 Prozent des Potentials ausgeschöpft. Eine Abschätzung hinsichtlich des ungenutzten Biomassepotentials im Regionalverband ist nicht möglich, da keine detaillierte Aufschlüsselung der Biomasseverbräuche der Kommunen des Regionalverbandes vorliegt.

Es wird in der Vision 100% Klimaschutz für Frankfurt unter Berücksichtigung der Möglichkeiten zur Reduzierung der Netztemperaturen darauf geachtet, dass die Biomasse im Ferndampfnetz für den GHD Sektor sowie in der Industrie größtenteils Verwendung findet. Welchen Anteil Biomasse an der Wärmeversorgung im Jahr 2050 übernimmt ist dem Kapitel „Energieszenarien für ei-

ne 100% erneuerbare Energieversorgung der Stadt Frankfurt am Main (KomMod4FFM) (Fraunhofer ISE)“ zu entnehmen.

## **Hemmnisse**

### Begrenztheit der Biomasse

Biomasse ist ein vielseitig einsetzbarer Energieträger. Aufgrund der vielseitigen Einsatzmöglichkeiten von Biomasse ist eine Nutzungskonkurrenz zwischen dem Wärme- und Verkehrssektor gegeben. Auch innerhalb des Wärmesektors ist die Biomasse aufgrund der guten Speichermöglichkeit und dem hohen Temperaturniveau nach der Verbrennung beliebt. Das Biomassepotential in Frankfurt ist derzeit schon nahezu ausgeschöpft.

### Energiepreise von Gas und Kohle

Derzeitig sind die Energiepreise von Gas und Kohle noch zu günstig, so dass viele Nahwärme- und Fernwärmenetzbetreiber eine Umstellung auf Biomasse noch nicht in Betracht ziehen.

### Geeignete Standortwahl der Energiezentrale

Der Standort einer mit Biomasse befeuerten Energiezentrale muss mehrere Kriterien erfüllen. Zum einem sollte diese in Nähe der zu versorgenden Gebäude errichtet werden, zum anderen sollten aufgrund der nötigen Biomasseanlieferungen mit dem Lkw (Holzhackschnitzel- oder Pellet-Anlagen) auf eine gute Zufahrt ohne Beeinträchtigung der Einwohner geachtet werden. Gerade in dicht bebauten Städten wie Frankfurt ist eine nachträgliche Errichtung der Biomassezentrale für Nahwärmelösungen schwierig.

## **Maßnahmen zu Abbau von Hemmnissen**

### Entwicklung einer möglichen Standortkarte für Heizkraftanlagen

Die Stadt Frankfurt weißt potentielle Flächen für die Errichtung von Energiezentralen unter Berücksichtigung der in den Hemmnissen genannten Standortfaktoren aus.

### Import von Biomasse aus dem Regionalverband

Durch den Import von Biomasse aus dem Regionalverband kann der Anteil an Biomasse in der Wärmeversorgung weiter ausgebaut werden. Wie oben beschrieben sollte jedoch nur dort auf den Einsatz von Biomasse zurückgegriffen werden, wo eine Erzeugung durch andere erneuerbare Energieträger aufgrund des Temperaturniveaus nicht möglich ist. Weiter ist darauf zu achten, dass den Kommunen aus dem Regionalverband genügend Biomasse zu Verfügung steht. Somit bleibt das Hemmnis der Begrenzten Biomasse weiterbestehen, kann aber durch die Berücksichtigung des Regionalverbandes ausgeweitet werden.

## **Solarenergie**

Für Überlegungen, solarthermische Anlagen in ein Fernwärmenetz einzubinden, sind die Bedingungen im Sommer ausschlaggebend. Grundsätzlich er-

möglichen niedrige Vorlauftemperaturen im Fernwärmenetz während des Sommerbetriebes längere Einspeiseperioden der Solaranlage und niedrigere thermische Verluste – beides verbessert den Solarertrag. Eine niedrige Rücklauftemperatur vergrößert die Aufheizspanne und erhöht den Solarertrag damit ebenfalls. Jedoch kann die Solarstrahlung während der Sommermonate nur vorrangig zur Trinkwarmwasserversorgung eingesetzt werden, da der Heizwärmebedarf in den Sommermonaten gleich Null ist.

Für Flachkollektoren ist eine Fernwärmeverlaufstemperatur im Sommer von 70-80°C und eine Fernwärmerrücklaufstemperatur <60°C optimal. Vakuumröhrenkollektoren hingegen arbeiten auch bei 100°C Vorlaufstemperatur und 80°C Rücklaufstemperatur noch verhältnismäßig effizient. In einem Niedertemperaturnetz mit 70°C Vorlaufstemperatur und 30°C Rücklaufstemperatur erzielen Flach- und Vakuumröhren-Kollektoren ihren höchsten Jahresertrag. Bei Flachkollektoren sinkt der Ertrag um fast 40 Prozent, wenn eine hohe Vorlaufstemperatur von 88°C bei einer gleichzeitig niedrigen Spreizung zur Rücklaufstemperatur von 75°C benötigt wird (Kaltschmitt, Wiese, & Streicher, 2006).

In den Wintermonaten ist die Einbindung von Solarthermie in Fernwärmenetze nur bedingt möglich, da das Angebot an Solarstrahlung in diesem Zeitraum sehr gering ist. Gleichzeitig werden die Fernwärmenetze mit ihren höchsten Temperaturen gefahren (90 – 140°C im Vorlauf), die von Kollektoren nicht oder nur für sehr kurze Zeiträume erreicht werden. Dazu kommt, dass der Kollektoreffizienzgrad bei großer Temperaturdifferenz zwischen Absorber und Umgebung sinkt.

Bei der Standortsuche für Solarthermie-Anlagen ist bei verteilter Einbindung auf folgende Kriterien zu achten (Institut für Energie- und Umweltforschung, 2014):

- Keine Verschattung und Südausrichtung der zu nutzenden Flächen für die Kollektoren
- Fläche für Systemtechnik, je nach Konzept auch Aufstellungsort für Speicher
- Nutzung möglicher Freiflächen: Dachflächen, Dachintegration, Fassadenintegration, etc.
- Räumliche Nähe zum Fernwärmenetz
- Anpassung Nennweite des für die Einbindung vorgesehenen Fernwärmestranges an die Leistung der Solarthermie-Anlage
- Fernwärmeführungsstrang mit Verbrauchern mit niedriger Temperaturanforderung → Einspeise-Heizkurve mit niedrigen Temperaturen für die Kollektoreinbindung
- Fernwärmeführungsstrang mit niedriger Rücklaufstemperatur an der Einspeisestelle → Steigerung des Kollektorertrags
- Niedriger Differenzdruck zwischen Vor- und Rücklauf an der Einspeisestelle → Begrenzung des Pumpstromaufwands für die Einbindung
- Akzeptanz für die Technik bei allen Beteiligten.

### **Hemmnisse**

### Flächenkonkurrenz & Begrenztheit der Fläche

Die Dachausrichtung und der Denkmalschutz älterer Gebäude begrenzen die Flächen für solarthermische Kollektoren. Weiter stehen die verfügbaren, geeigneten Dachflächen in direkter Konkurrenz zur Flächennutzung mit der Photovoltaik.

### Erhöhte Kosten durch Kran bzw. Gerüst

Die Installation einer großen solarthermischen Anlage auf Dächern oder in der Fassade erfordert den Einsatz eines Kranes oder Gerüsts, der eine deutliche Erhöhung der Installationskosten und folglich eine Verlängerung der Amortisation bedeutet.

## **Maßnahmen zum Abbau der Hemmnisse**

### Nutzung alternativer Flächen für Solarthermie

Da in Frankfurt nicht einhundert Prozent der Dachflächen (Denkmalgeschützte Gebäude) für Solarthermie genutzt werden können oder teilweise durch PV-Module belegt sind, sind zentrale Flächen von z.B. Einkaufsmärkten, Bürogebäuden, überdachten Parkhäusern und Krankenhäusern eine mögliche Alternative auch innerstädtisch Solarfelder zu errichten. Im Bereich der Hochbauten im Bankenviertel besteht auch die Möglichkeit der Integration von Fassadenelementen in die Fassade.

Weiterhin eignen sich große ungenutzte Freiflächen in den Stadtrandgebieten sowie die Dachflächen von Mehrfamilienhäusern und Plattenbauten (wie z.B. die Wohngebiete Zillestraße oder Freseniusstraße). Kleinere solare Insellösungen können bei der Eigenversorgung von Industrieunternehmen (z.B. Industriepark Höchst), Universitäten (z.B. Campus Westend) oder auch Krankenhauskomplexen eine Rolle spielen.

## **Best Practice**

*„Saisonaler Erdsonden-Wärmespeicher kombiniert mit Solarthermie-System“ - Brædstrup, Ring Søpark 1, Dänemark*

Das solare Fernheizwerk von Brædstrup Fernwärme versorgt rund 1.400 Häuser mit 40 GWh/a Wärme. Derzeit werden ca. zehn Prozent des gesamten Wärmebedarfs der Gebäude durch Solarenergie bereitgestellt.

In der ersten Phase des Projekts wurden 50 vertikale Sonden über eine Fläche von ca. 225m<sup>2</sup>, in einer Tiefe von 47-50m installiert, um die von einem 18.000m<sup>2</sup> Solarenergiekollektors erzeugte Wärme zu speichern. Durch die Installation des Speichers, kann in der ersten Phase der solare Deckungsanteil von zehn Prozent auf 20 Prozent erhöht werden.

In den Sommermonaten zirkuliert das heiße Wasser mit einer Temperatur von 85°C in den Sonden und erwärmt damit das umgebene Erdreich auf bis zu 70°C. In den Wintermonaten, wenn Wärme für das städtische Fernwärmesystem erforderlich ist, wird die gespeicherte Wärme wieder an das zirkulierende Wasser übertragen und über eine Wärmepumpe gefördert. Durch die Ver-

wendung eines kompakten Bohrfeldes wird der Boden aktiviert, um die Wärme während der Sommermonate zu speichern. Damit arbeitet der Speicher effektiver als ein normaler isolierter Wasser-Speichertank, der zuvor in ähnlichen Projekten zum Einsatz kam. Geplant ist, in der Endausbaustufe des Projekts, insgesamt 60.000m<sup>2</sup> an Solarkollektoren sowie 300 bis 400 Sonden zur Speicherung der Wärme zu installieren. Damit soll ein solarer Deckungsanteil von voraussichtlich 60 Prozent des gesamten Jahresenergiebedarfs erreicht werden.

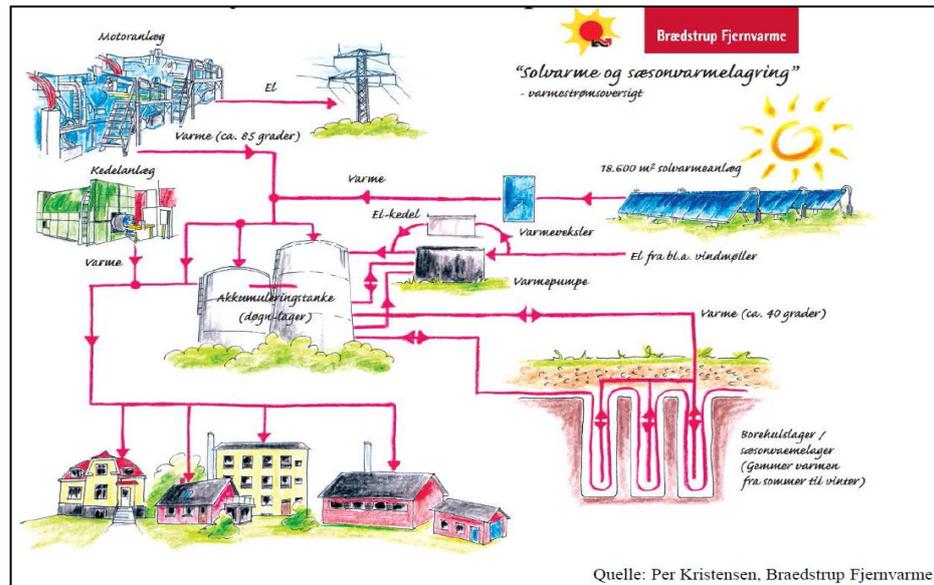


Abbildung 111: Schematische Darstellung des Kombikraftwerks in Brædstrup, Dänemark, Quelle: (IEA SHC).

Für die Begrenzung der Netzverluste kommen hochgedämmte TwinPipes zum Einsatz. Da jedoch die Leitungslängen sehr lang sind, betragen die Netzverluste in Brædstrup im Jahresmittel rund 20 Prozent. Um die Netzverluste zu senken wird angestrebt die Vorlauftemperaturen auf 70°C im Sommer und 75°C im Winter zu reduzieren sowie die Wärmeübertragerfläche in den Gebäuden zu erhöhen, um die Rücklauftemperatur weiter zu senken (Augsten, 2013).

Eine Hürde sind die langen Leitungslängen und die damit verbundenen Netzverluste. Auch der nicht unbegrenzte Platzbedarf für die Erweiterung der Anlage stellt einen begrenzenden Faktor hinsichtlich der Steigerung des solaren Deckungsanteils dar. Für Frankfurt könnte ein ähnliches System in einem Neubaugebiet in peripherer Lage errichtet werden. Hierzu sollten möglichen Flächen für die Heizzentrale, Speicher und Solarthermieflächen geprüft werden.

## Geothermie

In diesem Abschnitt werden die Einsatzmöglichkeiten von hydrothermalen und oberflächennaher Geothermie vorgestellt.

### Hydrothermale Geothermie

Die Nutzung von Geothermie in Fernwärmenetzen ist sowohl auf hohem wie auch auf niedrigem Temperaturniveau möglich. Für die Anforderung an hohe Vorlauftemperaturen  $>80^{\circ}\text{C}$  können hydrothermale Geothermieranlagen zum Einsatz kommen. Für die Anforderung an niedrige Vorlauftemperaturen  $<40^{\circ}\text{C}$  sind auch kleine Insellösungen in Kombination mit Nahwärmenetzen möglich. Dafür eignen sich insbesondere oberflächennahe Geothermieranlagen.

Die Nutzung der Geothermie in bestehenden Hochtemperatur-Fernwärmenetzen beschränkt sich heute im Wesentlichen auf hydrothermale Geothermieranlagen mit einer Förderbohrung (400-6000m Tiefe) und einer Reinjektionsbohrung. Geothermieheizwerke können je nach Temperaturniveau des Thermalwassers und der Vor- und Rücklauftemperaturen des Fernwärmenetzes auf unterschiedliche Weise in ein Fernwärmenetz integriert werden. Liegt die Temperatur des Thermalwassers unter dem für Vorlauftemperaturen üblichen Niveau von  $90-160^{\circ}\text{C}$ , ist eine Nachheizung beispielsweise mittels erdgasbetriebenen Heizkessels erforderlich. Der Einsatz von Wärmepumpen zur Nachheizung wird erst mit der Netztransformation hin zu niedrigeren Netztemperaturen interessant. Durch die Nähe von Frankfurt zum Oberrheingraben wird vermutet, dass eine Verbindung durch die Erdschicht des „Rotliegenden“ zwischen deren Lage in 3.000m Tiefe im Oberrheingraben mit deren höherer Lage von einigen 100 m Tiefe unterhalb Frankfurt-Offenbach-Bad Vilbel besteht. Zum Nachweis dieser geothermischen Anomalie hat die Mainova einen Antrag für ein Aufsuchungsfeld innerhalb des Frankfurter Stadtgebietes gestellt. Sollte dieser Antrag positiv bescheinigt werden, strebt die Mainova AG eine Tiefenbohrung zur Erkundung dieser Anomalie an.

## **Hemmnisse**

### Hohe Bebauungsdichte im Stadtkern

Für das Abteufen der Bohrungen sind Bohrplätze, auf denen auch die Baustelleneinrichtung untergebracht ist notwendig. Für die Förderbohrung und die Reinjektionsbohrung sind Bohrplätze in der Größenordnung von jeweils  $10.000\text{ m}^2$  erforderlich. Dies ist insbesondere in den Stadtzentren schwierig zu bewerkstelligen und stellt somit eines der großen Hemmnisse für die Geothermienutzung dar. Im Zusammenhang mit Neuerschließungen von Baugebieten, in denen temporär die Fläche für eine Bohrung vorhanden ist, könnte der Einsatz von Geothermie in Kombination mit einem ambitionierten Gebäudestandrad durchaus eine interessante Option darstellen. Nach den Tiefbauarbeiten bleiben in der Regel nur die oberirdischen Gebäude der Brunnenköpfe sowie versiegelte Flächen in geringem Umfang vorhanden. Der Flächenbedarf für ein Geothermieheizwerk ist nach der Bohrung insgesamt als gering einzuschätzen.

## **Umweltverträglichkeit**

Der Betrieb von Geothermieranlagen ist frei von Treibhausgasemissionen vor Ort. Indirekte Treibhausgasemissionen entstehen durch den Stromverbrauch

der Förderpumpen. Durch die Nutzung der Erdwärme entstehen keine weiteren Abgase bzw. Feinstaub. Die Heizzentrale sowie die Einrichtungen der Förder- und Injektionsbohrung arbeiten geräuscharm und können ohne Probleme in Wohngebieten errichtet werden.

### Oberflächennahe Geothermie

Oberflächennahe Geothermie bezeichnet die Nutzung der Erdwärme bis ca. 400m Tiefe. Es gibt verschiedene Systeme, mit deren Hilfe dem Untergrund Wärme entzogen werden kann. Welche Wärmequelle und welches technische System zum Einsatz kommen, hängt von den Bedingungen am Standort ab: Beispielsweise den hydrogeologischen Verhältnissen, den wasserwirtschaftlichen Vorgaben, dem oberirdischen Platzangebot und den Bedürfnissen der Anwender. Die Förderung der Erdwärme kann mittels Erdwärmesonden, Flächenkollektoren, GRD-Verfahren, Energiepfählen und Grundwasserwärmepumpen erfolgen. Der Vorteil der oberflächennahen Geothermie ist eine kostengünstige Erschließung und ein vergleichend geringer Platzbedarf zur Tiefengeothermie.

In Abhängigkeit von der Bohrtiefe und der Jahreszeit sind Temperaturen von durchschnittlich fünf bis zehn Grad Celsius möglich. Grundsätzlich gilt, dass die Temperaturen im Untergrund pro 100 Metern Tiefe um rund drei °C ansteigen. Oberflächennahe Systeme hingegen, wie z.B. Flächenkollektoren sind jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen.

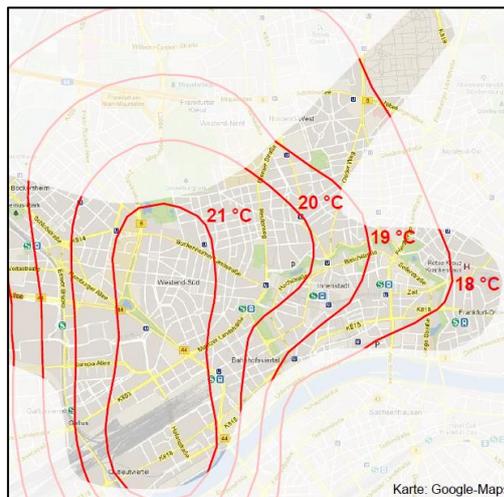


Abbildung 112: Temperaturprofil Frankfurt Innenstadt, Quelle: (Rumohr, 2013).

Abbildung 112 zeigt ein Temperaturprofil der Innenstadt von Frankfurt am Main. Erste Untersuchungen haben gezeigt, dass innerhalb des Stadtkerns in 100 – 140 m Tiefe Temperaturen von 18-22°C anzutreffen sind und somit überdurchschnittlich hoch sind.

Mit Hilfe einer zentralen Wärmepumpe kann ein sich anschließendes „kaltes“ Nahwärmenetz (vgl. Maßnahme: „Senkung der Netztemperatur“, S.162) mit einer Vorlauftemperatur von 18-22°C betrieben und damit das anliegende Wohngebiet versorgt werden. Die sehr geringen Vorlauftemperaturen, nahe

der Erdreichtemperatur reduzieren die Netzverluste auf ein Minimum. Dezentrale Wärmepumpen im Gebäude heben die Temperatur auf die für die Heizung erforderliche Temperatur von ca. 35..55 °C und für das Trinkwarmwasser erforderliche Temperatur von ca. 60 °C. Damit kann die Jahresarbeitszahl der dezentralen Wärmepumpe in Folge des geringen erforderlichen Temperaturhubs erhöht und damit deren Effizienz maßgeblich gesteigert werden.

Auch eine direkte Versorgung von Niedrigenergiehaussiedlungen mit Wärme für die Raumheizung ist auf diese Weise möglich. Da Flächenheizsysteme nur sehr geringe Vorlauftemperaturen von maximal 35°C benötigen ist auch hier ein effizienter Betrieb der zentralen Wärmepumpe mit einer hohen Jahresarbeitszahl möglich. Weiterhin besteht die Möglichkeit Gebäude mit „kalter“ Fernwärme über deren Flächenheizsysteme im Sommer indirekt zu kühlen.

Die oberflächennahe Geothermienutzung steht noch ganz am Anfang in Frankfurt. Dennoch wird davon ausgegangen, dass für die Vision 100% Klimaschutz, Frankfurt dieses vorhandene Potential genutzt werden kann. Für 2050 wird angenommen, dass rund 15 Prozent des Bedarfs für Fernwärme und Ferndampf aus Geothermieanlagen bereitgestellt wird. Somit würden rund 280 GWh aus Geothermie erzeugt werden.

## **Maßnahmen zur Lösung von Hemmnissen**

### Nutzung von Sportanlagen, Parkplätzen etc.

Die Nutzung von öffentlichen Parkplätzen bzw. Parkplätze von Einkaufszentren können eine gute Alternative darstellen. Der Grundstückseigentümer, der stellt dem Betreiber das Grundstück gegen die Zahlung einer Pacht zu Verfügung. Weiter stellt die Verlegung unter Bürgersteigen eine Möglichkeit oberflächennahe Geothermie in Frankfurt auszubauen dar. In Frankfurt könnten öffentliche Parks (z.B. der Ostpark) oder Fußballfelder (z.B. SC Frankfurt 1880, VfR Bockenheim 1955 e. V.) für Agrothermie genutzt werden. Agrothermie bietet einen geringen Eingriff als die Tiefengeothermie und die Flächen können anschließend weiter uneingeschränkt genutzt werden.

## **Case Study Beispiel**

*„Nutzung oberflächennaher Geothermie durch Agrothermie, Gemeinde Wüstenrot, Deutschland“*

In der schwäbischen Gemeinde Wüstenrot entsteht seit 2012 eine Plusenergiesiedlung mit hocheffizienten Wohngebäuden (KfW 55). Diese Gebäude werden über Photovoltaik-Anlagen in der Jahresbilanz mehr Energie erzeugen als sie verbrauchen. Die Wärme- und Brauchwarmwasserbereitstellung erfolgt innerhalb der Gebäude mit dezentralen Wärmepumpen. Zentrale Agrothermiekollektoren stellen die notwendige Niedertemperaturwärme (acht bis zehn Grad Celsius) für den effizienten Wärmepumpenbetrieb über ein sogenanntes Kaltwärmenetz bereit. Die Agrothermiekollektoren liefern 288 MWh/a Wärme bei einer angenommenen Wärmeentnahmeleistung des Erdreichs von 25-

30W/m<sup>2</sup>. Der Vorteile der Agrothermie sind die geringen Erschließungstiefen von 1,5 m sowie die Weiternutzung der Flächen durch Bepflanzung.

## **Maßnahme**

### Potentialstudie Nutzung von Industrieller Abwärme

Die anfallende Abwärme aus Industrieprozessen sowie die Abwärme des Abwassers stellen ein großes Potential zur Nutzung als Fernwärme dar. Diese Energiequellen, auch Sekundärenergiequellen genannt, sind „Abfallprodukte“, die Temperaturen zwischen 10-140°C bereitstellen können.

Als Maßnahme gilt es in einem ersten Schritt eine Potentialstudie der nutzbaren Abwärme in Abhängigkeit des Temperaturniveaus zu erstellen.

## **Industrielle Abwärme**

Bei vielen Prozessen in der Industrie entsteht Abwärme mit einem Temperaturniveau zwischen 30-140°C. Abwärmequellen können Produktionsmaschinen oder -Anlagen sein, die Verlustwärme an die Umgebung abstrahlen. Aber auch Öfen, Abwässer aus Wasch-, Färbe- oder Kühlungsprozessen sowie Kühlanlagen, Motoren oder die in Produktionshallen erzeugen nutzbare Abluft.

Neben passiven Wärmenutzungen von Niedertemperaturanwendungen, wie z.B. die Heizung von Gebäuden, gibt es weitere Nutzungsstrategien. Eine Möglichkeit stellt die Umwandlung von Abwärme in Strom über ORC-Turbinen dar. Weiterhin besteht die Möglichkeit hochwertige Energie (beispielsweise in Form von Strom) zuzuführen, um mittels einer Wärmepumpe die Temperatur auf ein nutzbares Niveau zu heben. Auch eine Bereitstellung von Kälte mittels einer Absorptionskälteanlage ist möglich.

Der Vorteil der industriellen Abwärme im Vergleich zu Erneuerbaren Energien ist die saisonale und wetterbedingte Unabhängigkeit. Daher eignet sie sich vorrangig als Grundlastwärme.

Die Bereitstellung von Abwärme kann dabei verschiedene Formen annehmen. Industrieunternehmen, die eine große Menge an Wärme mit einem hohen Temperaturniveau abgeben, können Straßenzüge oder Stadtviertel mit Wärme versorgen. Auch kleine Insellösungen in Kombination mit Abwärme aus Bäckereien, Wäschereien und Rechenzentren sind denkbar. Für Frankfurt sind besonders die Rechenzentren als mögliche Abwärmequelle interessant.

## **Wirtschaftlichkeit**

Die Nutzung von Abwärme stellt in den meisten Fällen, in denen Abwärmeebenutzer und -anbieter dieselbe juristische Person sind, eine wirtschaftlich interessante Lösung dar. Liegen die Abwärmequelle und die möglich -senke bei zwei unterschiedlichen Betrieben, kommt es aufgrund des Verkaufs von

Wärme zu einer Verschlechterung der Wirtschaftlichkeit. Inwieweit diese für den Abwärmenehmer akzeptabel ist, muss im Einzelfall geprüft werden.

### **Umweltverträglichkeit**

Aus ökologischer Sicht, stellt die Nutzung von Abwärme eine hervorragende Lösung der CO<sub>2</sub>-Einsparung dar. Durch die Nutzung von „Restwärme“ wird die Erzeugung von Wärme aus anderen Energieträgern substituiert. Damit trägt die Abwärmennutzung zur Einsparung an CO<sub>2</sub>-Emissionen bei.

**Hemmnisse** nach (Institut für Energie- und Umweltforschung, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien, 2010)

#### Strukturelle Hemmnisse

Ein Ausschlusskriterium für die Nutzung von Abwärme ist die räumliche und zeitliche Diskrepanz zwischen Wärmeangebot und Wärmenachfrage. Auch wenn die Nutzung von Abwärme zeitlich und räumlich möglich ist, stellt die Unsicherheit hinsichtlich der möglichen Nutzungsdauer (Verzug der Quelle) ein starkes Hemmnis auf Seiten der Abwärmennutzer dar. Im Gegenzug ist der Abwärmeanbieter verpflichtet, die vertraglich zugesicherte Wärmemenge bereitzustellen.

#### Finanzielle Hemmnisse

Als finanzielles Hemmnis ist insbesondere bei GHD Betrieben die Erwartungshaltung hinsichtlich der Amortisationszeit zu nennen. Amortisationszeiten größer drei Jahre stellen insbesondere für größere Betriebe eine wirtschaftlich uninteressante Option dar.

#### Informatorische Hemmnisse

Die Informationslage zu Wärmenutzungstechnologien und -quellen in den Quartieren sind den meisten Anwohnern und ansässigen Betrieben nicht bekannt. Häufig fehlt die Verknüpfung bzw. die Verbindung zwischen den jeweiligen Akteuren. Aus Datenschutz technischen Gründen dürfen die Netzdienste keine Daten mit der Stadt und den Energieversorger teilen.

### **Maßnahmen zur Lösung von Hemmnissen**

#### Finanzielle Anreize zur Nutzung von Abwärmepotentiale

Durch das Aufsetzen und die Erweiterung eines umfangreichen Förderprogramm in Form von zinsgünstigen Krediten seitens der KfW und finanziellen Anschubförderungen der Stadt, das die Nutzung von Abwärme begünstigt kann die Amortisationszeit der Abwärmennutzung verkürzt werden. Neben neu aufgesetzten Förderprogrammen macht der Anstieg der konventionellen Energieträgerpreise eine Nutzung der Abwärme wirtschaftlicher interessanter.

#### Abwärmequellen- und Senken-Karte für einzelne Quartiere

Die Erstellung einer Abwärmequellen- und -senkenkarte seitens der Stadt gibt KMU und Gebäudeeigentümer eine Übersicht zu möglichen Abwärmepotentialen im Quartier. Änderungen der Abwärmequellen bzw. -senken müssen jährlich überprüft und ggf. neu angepasst werden. Da aus Datenschutz technischen Gründen die Erstellung einer solchen Karte durch den Netzbetreiber nicht möglich ist, könnten durch Umfragebögen, Begehungen eine Datengrundlage geschaffen werden. Anders ist über eine Gesetzesänderung auf Bundesebene nachzudenken, die den Netzbetreiber und Energieversorger ermächtigt Daten zumindest mit der Stadt zu teilen. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Konformität mit dem im Energiewirtschaftsgesetz vorgeschriebenen „Unbundling“ eingehalten wird.

#### Sonderfond Energieeffizienz im KMU

Durch die Ergänzung der Initiative „Energieberatung im Mittelstand“ durch einen „Sonderfond für Energieeffizienz in KMUs“ in Zusammenarbeit mit der KfW können bei erhöhter Nachfrage Initiativ- und Detailberatungen durch zertifizierte Energieberater angeschoben werden. Alternativ könnte das Förderprogramm „Frankfurt spart Strom“ weiter ausgebaut werden.

#### Ausarbeitung von Musterverträgen für die Nutzung von Abwärme

Um die Unsicherheiten für Abwärmennutzer und Abwärmeanbieter im Falle einer möglichen Insolvenz einer Seite zu minimieren, ist eine praktikable vertragliche Lösung inklusive eine Lösung über Versicherungen nötig. Die IHK erarbeitet zusammen mit Vertretern von Industrie und Gewerbe mögliche Musterverträge aus.

#### **Best Practice**

*„Abwärme aus der Produktion der Deutschen Gelatinefabrik Stoess (DGF)“ – Göppingen, Deutschland*

In Göppingen wird seit 1983 die 30°C Abwärme aus der Produktion der Deutschen Gelatinefabrik Stoess (DGF) genutzt, um eine Schule, Schwimmbad, Verwaltungsgebäude und Mehrfamilienhäuser mittels einer Gaswärmepumpe mit Wärme zu versorgen.

Mit Hilfe der Gaswärmepumpe wird das 30°C warme Kühlturmwater für Heizzwecke nutzbar gemacht. Über ein Nahwärmenetz mit 62°C warmen Vorlauf und 40°C Rücklauf werden die einzelnen Gebäude versorgt. Durch den Einsatz eines 20m<sup>3</sup> großen Heizwasserspeichers kann der Gasmotor ständig im optimalen Betriebspunkt gefahren werden. Der damit erreichte COP der Anlage beträgt drei und die Jahresarbeitszahl rund zwei. Die Abwärme stellt die Grundlast für die zu versorgenden Gebäude dar. Dies hat den Vorteil, dass die Wärmepumpe rund 5000h/Jahr im Grundlastbetrieb läuft. An sehr kalten Wintertagen muss mit einem Gaskessel zu geheizt (Dr. Brandstätter Sachverständigenbüro, 2008).



Abbildung 113: Links: Gelita AG in Göppingen, Deutschland (Gelita AG); Rechts: Gasmotor-Wärmepumpe, Quelle: (ASUE).

Unterschiede zwischen Wärmeerzeugung und Wärmenachfrage werden über den 20m<sup>3</sup> großen Heizwasserspeicher ausgeglichen. Mit einer stetigen motor-schonenden Fahrweise im Bestpunkt werden somit die Wartungskosten minimiert. Die Brennstoffeinsparungen betragen ca. 1.750 MWh. Die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen beträgt rund 350 t/Jahr.

### 5.5.5 Abwärme aus Abwasser

#### **Maßnahme**

##### Schaffung von Anreizen zur Nutzung von Energie aus Abwasser

Als eine weitere sekundäre Quelle ist die Abwärme aus Abwasser zu nennen. Die Vorteile dieser Wärmequelle sind, dass Abwasser das ganze Jahr über in nahezu gleicher Menge anfällt und die Quelltemperatur im Sommer sich nur geringfügig von der Quelltemperatur im Winter unterscheidet. Über das Jahr betrachtet schwankt die Temperatur des Abwassers zwischen 10°C und 20°C (Bundesverband WärmePumpen e.V., 2005).

Die Abwärme wird mittels Wärmetauscher, der in der Sohle des Kanals installiert ist, dem Abwasser entzogen. Bei bestehenden Kanälen muss der Wärmetauscher nachträglich in das Kanalsystem integriert werden (siehe Abbildung 114). Hierfür sind Kanaldurchmesser von mindestens 80 cm erforderlich.



Abbildung 114: Nachträgliche Installation von Wärmetauschern in bestehende Kanalsysteme, Quelle (Bundesverband WärmePumpen e.V., 2005).

Erfolgt eine Kanalerneuerung bzw. ein Neubau, können durch einen hohen Vorfertigungsgrad (Wärmetauscher ist in Kanalring integriert, siehe Abbildung 115) die Kosten minimiert werden. Der für die Einbringung des Wärmetauschers erforderliche Mindestdurchmesser des Kanals reduziert sich auf 50 cm.



Abbildung 115: Integration von Wärmetauschern im Kanal (Neubauten, Erneuerungen), Quelle (Bundesverband WärmePumpen e.V., 2005).

Weiter muss eine Fließrate von 15 l/s als Tagesmittelwert bei trockenem Wetter gegeben sein, damit sich der Kanalabschnitt für Abwasserwärmenutzung eignet. Dies ist meist bei Abwassersammlern mit mehr als 10.000 angeschlossenen Einwohnern der Fall (Bundesverband WärmePumpen e.V., 2005).

Um die Abwärme des Abwassers für die Raumwärmenutzung im Gebäude nutzbar zu machen, ist eine Kombination mit Großwärmepumpen erforderlich. Dabei sind Vorlauftemperaturen von größer 100°C, wie in Bestandfernwärmenetzen üblich, nicht erzielbar. Daher kommen diese Systeme vorrangig in Sekundärnetzen oder kleineren Nahwärmenetzen mit geringeren Netztemperaturen zum Einsatz. Temperaturen bis zu 80°C sind jedoch technisch möglich.

Als Faustregel kann näherungsweise aus 1 m<sup>3</sup> Abwasser bei Abkühlung um nur ein Grad Celsius und bei Einsatz einer elektrischen Wärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl von rund vier eine Wärmemenge von 1,56 kWh gewonnen werden.

### **Potentialabschätzung**

Bei Trockenwetter laufen durchschnittlich rund 300.000 m<sup>3</sup> pro Tag Abwasser aus Frankfurt am Main und den angrenzenden Kommunen in die Kläranlagen zu den Kläranlagen Niederrad und Sindlingen (SEF Stadtentwässerung Frankfurt am Main, 2015). Auf das Jahr hochgerechnet summiert sich die Abwassermenge auf rund 109,5 Millionen m<sup>3</sup>. Da für die Wärmeengewinnung lediglich Abwasserkanäle mit einer minimalen Durchflussgeschwindigkeit von rund 15 l/s in Frage kommen, reduziert sich das nutzbare Abwasser auf rund 76,6 Millionen m<sup>3</sup> (in etwa 70%). Durch die Annahme einer Wärmepumpe

mit einem COP von rund 4 können rund 1,56 kWh Wärme aus einem m<sup>3</sup> Abwasser gewonnen werden. Insgesamt wird das Potential an Wärme aus Abwasser auf rund 119 GWh im Jahr geschätzt.

### **Hemmnisse**

#### Stark verunreinigtes Abwasser & einzuhaltende Mindesttemperatur im Winter

Die technische Herausforderung der Abwasserwärmenutzung liegt in der Verwendung von ungereinigtem Rohabwasser. Da das Abwasser sehr reich an Nährstoffen ist, ist auch die Bildung eines Biofilms am Verdampfer möglich. Dieser reduziert den Wärmeübergang auf den Wärmepumpenkreislauf und damit die Effizienz der gesamten Wärmepumpenanlage. Eine Reinigung des Verdampfers von Biofilmen ist einmal im Jahr erforderlich. Weiter sollte der Wärmeentzug die Reinigungsleistung der Mikroorganismen in der Kläranlage nicht beeinträchtigen, da sonst der biologische Abbau von Stickstoff nicht mehr gewährleistet ist. Die kritisch geltende Wassertemperaturgrenze liegt somit bei 8°C und lässt somit an manchen Wintertagen nur eine geringe Wärmeentnahme zu.

### **Best Practice**

*„Häusliche und industrielle Abwasserwärmenutzung mit Großwärmepumpe“ - Viken Fjernvarme AS, Oslo, Norwegen*

Die Viken Fjernvarme AS in Oslo betreibt ein Fernwärmenetz mit einer Gesamtlänge von ca. 193km und versorgt damit rund 830 kommerzielle und rund 2.350 private Kunden. Untersuchungen des häuslichen und industriellen Abwassers in Oslo ergaben, dass eine tägliche Abwassermenge von 207.360 m<sup>3</sup> mit einem Temperaturniveau von 9,6 °C in die Abwasserreinigungsanlage VEAS eingeleitet wird. Dies entspricht einer jährlichen Wärmemenge von rund 118 GWh. Um dieses Potential der Abwasserwärme nutzen zu können, wurde 2005 eine elektrische Großwärmepumpe mit einer Leistung von 18,4 MW<sub>th</sub> und einer Jahresarbeitszahl von 4,0 installiert. Nach dem positiven Betrieb der ersten Jahre wurde 2006 eine weitere elektrische Großwärmepumpe mit einer Leistung von 9,2MW<sub>th</sub> installiert. Damit steht nun gesamt eine installierte Leistung von 27,6 MW<sub>th</sub> zur Verfügung mit der unter Einbeziehung von 4.800 Vollbenutzungsstunden pro Jahr, 132 GWh/a Wärme bereitgestellt werden können. Der Anteil der Abwasserwärme an der Fernwärme in Oslo beträgt damit rund 15 Prozent.

### **Wirtschaftlichkeit/Kosten**

Die Wirtschaftlichkeit muss für jedes Projekt einzeln geprüft werden. Im Beispiel Oslo kostete die erste elektrische Wärmepumpe rund 90 Mio. norwegische Kronen (ca. 10 Mio. €) und leistet 18 MW<sub>th</sub>. Umgerechnet, bedeutet dies spezifischen Investitionskosten von rund 555 € pro kW<sub>th</sub>. Das Gesamtsystem versorgt 9.000 WE mit einer Vorlauftemperatur von 80°C und erreicht damit eine Einsparung von 6.000 Tonnen Heizöl/ Jahr.

### **Umweltverträglichkeit**

Es wird davon ausgegangen, dass 2050 ein großer Teil der noch nicht genutzten Abwärme auf niedrigeren Temperaturen genutzt wird. Abwärme aus Abwasser, Abwärme aus Rechenzentren sowie Abwärme aus Industriebetrieben würde in der Vision 100% Klimaschutz 25 Prozent des Fernwärme- und Fernampfes der Haushalte und GHD Betriebe nutzen. Dies würde eine Wärmeerzeugung von rund 460 GWh im Jahr 2050 bedeuten. Aufgrund der wesentlich besseren/höheren Wärmequelltemperaturen kann von einer durchschnittlichen Jahresarbeitszahl von 3,5 ausgegangen werden. Demnach würden die prozentualen CO<sub>2</sub>-Einsparungen gegenüber einer Ölheizung bei rund 40 Prozent liegen. Das Beispiel in Oslo zeigt, dass unter den dortigen Marktbedingungen (geringer Strompreis), durch die Nutzung von Wärme aus Abwasser ein erheblicher Beitrag zur Wärmeversorgung geleistet werden kann.

#### 5.5.6 Power to Gas

##### **Maßnahme**

Unter Power-to-Gas wird die Aufspaltung von Wasser in Sauer- und Wasserstoff mittels Elektrolyse verstanden. Wird dabei Strom aus erneuerbaren Energien verwendet, ist der Umwandlungsprozess als klimaneutral einzustufen. Die Einleitung von Wasserstoff in die Erdgasinfrastruktur ist bis zu einer zulässigen Konzentration von fünf Volumenprozent zulässig. Selbst eine avisierte H<sub>2</sub>-Konzentration von 10 Volumen Prozent wäre nach dem derzeitigen Kenntnisstand (Februar 2014) ohne weiteren Handlungsbedarf möglich (Gert Müller-Syring, 2014). Damit kann der erzeugte Wasserstoff im Netz gespeichert und zu den Verbrauchern wie beispielsweise Lastkraftwagen und Industrie durchgeleitet werden. Weiter besteht die Möglichkeit aus Wasserstoff unter Zuführung von Kohlendioxid Methan (SNG) zu erzeugen. Die Durchleitung von synthetischem Gas im Erdgasnetz zum nächsten Verbrauch ist grundsätzlich möglich. Neben dem klassischen Einsatz für Heizzwecke ist eine spätere Rückverstromung des SNGs beispielsweise in dezentralen Blockheizkraftwerken eine weitere Option, den Einsatz von erneuerbaren Strom variabler zu gestalten. Damit liegen die wesentlichen Vorteile in der Nutzung von Power to Gas in der Speicherfähigkeit von Überschussstrom, die Nutzung einer bestehenden Infrastruktur (Gasnetz und Speicher) und den vielschichtigen Anwendungsmöglichkeiten. Im Mai 2014 wurde eine erste Power-to-Gas Anlage durch die Mainova und ihre Projektpartner im Frankfurter Ostend in Betrieb genommen worden. Die Anlage produziert ca. 60 m<sup>3</sup> Wasserstoff pro Stunde, das ab 2016 methanisiert in das Erdgasnetz eingespeist wird (Mainova AG, 2013).

In Abbildung 116 wird das Funktionsprinzip und die Nutzungsmöglichkeiten von Power to Gas nochmals dargestellt.

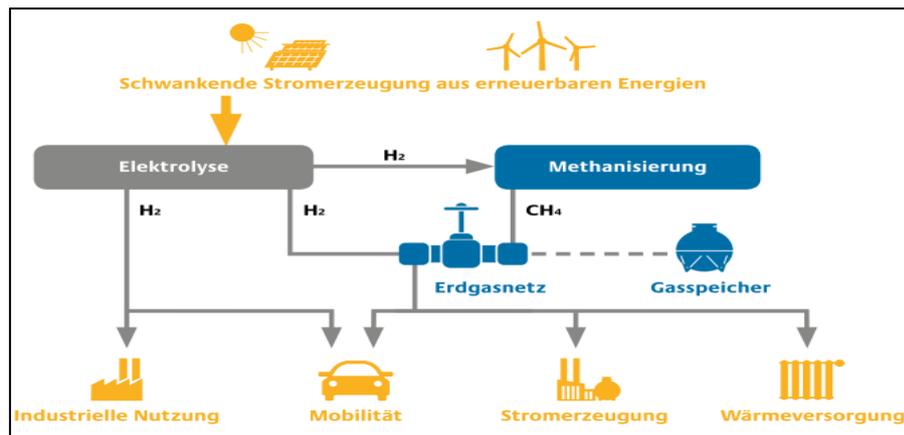


Abbildung 116: Funktionsprinzip von Power to Gas und Nutzungsmöglichkeiten, Quelle (Deutsche Energie Agentur, 2013).

## Hemmnisse

### Gestehungskosten von EE-Methan

Derzeit sind die Gestehungskosten von EE-Methan mit rund 21 Ct/kWh<sub>Methan</sub> gegenüber Erdgas und Biogas deutlich höher. Für den Zeitraum 2017 bis 2020 könnten mit steigender Serienreife die Gestehungskosten auf rund 9-10 Cent fallen (Leipziger Institut für Energie GmbH, 2013).

## Maßnahmen zum Abbau von Hemmnissen

### Power-to-Gas und Ausbau von erneuerbaren Energieanlagen

Mit dem Ausbau und den damit verbundenen steigenden Anteil erneuerbaren Stroms aus dem Regionalverband FrankfurtRheinMain wird bis 2050 Power to Gas neben vielen anderen Technologien Bestandteil einer nachhaltigen Energieversorgung sein.

### **Wirtschaftlichkeit**

Die Wirtschaftlichkeit von Power-to-Gas Anlagen ist derzeit noch nicht gegeben. Jedoch mittel- bis langfristig können Power-to-Gas Anlagen auch wirtschaftlich attraktiv sein. Weitere Effizienzsteigerungen und Kostensenkungen sind durch weitere Forschungs- und Demonstrationsprojekte zu erwarten.

## 5.6 Effizienzmaßnahmen im Industriesektor

Der Status Quo des Industriesektors wurde in Stromsektor ausgiebig beschrieben. Neben der verarbeitenden Industrie wird auch der Frankfurter Flughafen nach der ifeu Bilanz (Institut für Energie- und Umweltforschung (Ifeu), 2011) im Industriesektor aufgenommen. Da das Betreiben eines Flughafens jedoch größtenteils aus Dienstleistungen und somit eher dem GHD-Sektor zugeordnet werden kann und keine direkte Prozesse und Produkte verarbeitet wer-

den, sind im Folgenden nur Maßnahmen beschrieben, die dem produzierenden Gewerbe und besonders der chemischen Industrie zuzuordnen sind.

### Maßnahmen im Prozesswärmebereich und der chemische Industrie

Durch den hohen Anteil des Wärmeverbrauchs im Prozesswärmebereich, liegt der Schwerpunkt der folgenden Maßnahmen in diesem Sektor und speziell für den Chemiapark Frankfurt Höchst auf der chemischen Industrie und deren Prozesse. Der Studie „Industrieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen industrieller Prozesstechnologien vom Fraunhofer ISI, der IREES GmbH und der TU Berlin“ sind einige sinnvolle Maßnahmen an energierelevanten Anlagenkomponenten der chemischen Industrie zu entnehmen (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, IREES GmbH, TU Berlin, 2013).

### Effiziente Reaktoren

Das wichtigste Element eines chemischen Prozesses ist der Reaktor. Dort liegt auch das größte Energiesparpotential. Der Reaktortyp (z. B. Wirbelstrom- oder Flugstromreaktor) und dessen konstruktive Gestaltung haben Einfluss auf die Energieeffizienz. Des Weiteren beeinflussen Katalysatoren maßgeblich die Performance des Prozesses im Reaktor.

### Stofftrennung

Weiter geht hervor, dass Apparate zur Stofftrennung nach den Reaktoren die zweitwichtigsten Komponenten für Effizienzmaßnahmen sind. Die stoffliche Trennung von Gemischen wird heute meist in energieintensiven Rektifikationskolonnen durchgeführt. Hierbei ist das Gemisch zunächst auf den jeweiligen Siedepunkt der Bestandteile zu erhitzen um anschließend den Dampf wieder zu kondensieren. Durch Umstellung der Anlagen hin zu schonenderen Stofftrennverfahren mit niedrigeren Temperaturen wie beispielsweise bei der Extraktion, Reaktivdestillation, in Trennwandkolonnen oder Membrantechnologie kann die Energieeffizienz gesteigert werden. Letztere eignet sich zum Beispiel in der Grundstoffchemie zur Chlorproduktion anstatt der energieintensiven Rektifikation. Nicht für jeden Prozess ist ein alternatives Verfahren vorteilhaft. Es muss für jeden Einzelfall eine energetische Optimierung betrachtet werden. Nach Anmerkungen des Industriepark Höchst können durch diese Maßnahme kaum mehr Einsparungen erzielt werden.

### Moderne Prozessleittechnik

Die moderne Prozessleittechnik ermöglicht es Anlagen leichter im optimalen Betriebspunkt zu fahren und ein Monitoring der Energieströme durchzuführen. Für den Betreiber werden dadurch Energieverbräuche visuell sichtbar und sensibilisieren den Nutzer zum Energiesparen. Bei modernen Anlagen zählt das Vorgehen bereits zum Stand der Technik, so auch im Industriepark Höchst.

### Wärmerückgewinnung

Eine weitere notwendige Modernisierungsmaßnahme ist die Optimierung der Abwärmenutzung. Die Wärmerückgewinnung mit der Bildung von Wärme-

tauscher-Netzwerken zählt seit den Erdölkrisen in den 80er-Jahren zum Stand der Technik. Die Beachtung der folgenden Grundsätze bei der Wärmeintegration tragen erheblich zur Steigerung der Energieeffizienz bei:

- Vorwärmen von Rohstoffströmen und Luft, wenn hohe Temperaturen gefordert werden
- Vermeiden von Druckreduktionen, ohne die Dampfentspannung zu nutzen
- Verwendung überschüssiger Wärme am Standort
- Stromerzeugung aus Dampf nur, wenn keine thermische Verwendung für Dampf am Standort vorhanden ist.

Steigende Energiepreise führen dazu, dass eine verbesserte Wärmeintegration wirtschaftlich wird und kontinuierliche Überprüfungen folgerichtig sind. Gleiches trifft für die Wärmedämmung in Prozessen zu. Ein wichtiger Aspekt zur Verminderung der Wärmeverluste ist die Verbesserung der Wärmedämmung in den allermeisten Prozessen der Chemiebranche. Bereits bei geringen Temperaturdifferenzen zur Umgebungstemperatur ist eine gute Isolation der Behälter und Rohrleitungen eine sinnvolle Investition.

Die Temperaturdifferenz ist für die Bestimmung der Abwärmemenge entscheidend, weil hierbei die Differenz von der Abwärme-Temperatur zur Umgebungstemperatur nötig ist. Ein weiteres wichtiges Entscheidungskriterium für die Nutzbarkeit von Abwärme ist die zeitliche Verteilung über den Tag, die Woche und das Jahr. Je kontinuierlicher die Abwärme anfällt, desto besser kann diese wieder an anderer Stelle verwendet werden.

Es ist jedoch davon auszugehen, dass bei der Wärmerückgewinnung nur mehr geringes Potential mit Temperaturen größer 100°C im Industriepark Höchst vorhanden ist, da in den letzten Jahren schon Einiges in diesem Bereich umgesetzt worden ist und schon rund 620 GWh<sub>th</sub> an Abwärme im Industriepark genutzt wird (Infraserv Höchst, 2012). Dennoch ist Abwärme auch im bisher nicht genutzten Niveau von rund 20 bis 40°C nur durch den Einsatz einer Wärmepumpe und dessen Temperaturhub auf einem höheren Temperaturniveau effizient nutzbar.

Laut der Studie „Industrielle Großwärmepumpen - Potenziale, Hemmnisse und Best-Practice Beispiele“ des Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart werden ca. neun Prozent des Energiebedarfs in der Ernährungs- und chemischen Industrie bei einer Wärme von 70 °C benötigt (J. Lambauer, 2008).

### **Wirtschaftlichkeit**

Die Wirtschaftlichkeit von einzelnen Maßnahmen ist stets abhängig von den einzelnen Industriezweigen und deren Prozessschritten. Die hier größtenteils benannten Maßnahmen sind jedoch nach (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, IREES GmbH, TU Berlin, 2013) bis 2035 ein wirtschaftlich umsetzbares Potential.

### **Umweltverträglichkeit**

Die Einsparung durch Effizienzmaßnahmen in der chemischen Industrie liegen nach der zitierten Studie des Fraunhofer ISI, IREES und der TU Berlin bei rund 13 Prozent bis 2035. Es wird angenommen, dass im Prozesswärmebereich bis 2050 weitere sieben Prozent Einsparung vorhanden sind. Für das Jahr 2050 wird somit eine gesamte Einsparung von 20 Prozent angenommen.

### **Hemmnisse**

Wie in vielen anderen Industriezweigen finden sich speziell in der chemischen Industrie Hemmnisse. Zu nennen wären nach (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, IREES GmbH, TU Berlin, 2013):

- Kostendruck und internationaler Wettbewerb und die damit verbundene geringen Margen führen zu Unsicherheiten bei neuen Investitionen;
- Investitionen in Effizienzmaßnahmen stehen in Konkurrenz mit anderen Investitionen für den laufenden Betrieb;
- Hohe Renditeerwartungen bei den Investitionen;
- Eine Optimierung der Prozesse hinsichtlich des Ressourceneinsatzes, ist nicht gleichbedeutend mit der Effizienzoptimierung;
- Erhöhte Risiken bei neuen Technologien werden wegen Lieferverpflichtungen eher ungern angewendet;
- Hohe Planungsunsicherheit durch eine starke Fluktuation der Energiepreise;
- Fehlende Planungssicherheit aufgrund von stetig wechselnder Förderausrichtungen der Politik.

### Integration von erneuerbaren Wärmequellen

Auch in der Industrie gibt es chemische Prozesse, die ein Temperaturniveau nicht höher 70 °C erfordern. Für diese ist (wenn möglich) über die Nutzung von Abwärme aus anderen Prozessen oder die Integration von erneuerbaren Energien nachzudenken. Dabei ist der Einsatz von Solarthermie, Großwärmepumpen oder auch Power-to-Heat möglich.

Im Folgenden werden Einsatzmöglichkeiten für solare Prozesswärme und Power-to-Heat vorgestellt. Die Möglichkeit der Substitution fossiler Brennstoffen durch erneuerbare Energien in der Industrie bildet den Abschluss des Kapitels.

### **Solare Prozesswärme**

Solare Prozesswärme kommt derzeit kaum in der Pharma- und Chemieindustrie zur Anwendung, stellt jedoch ein enormes Potential dar. Die Veröffentlichung (C. Lauterbach, 2011) der Universität Kassel zum Potential der solaren Prozesswärme in Deutschland zeigt, dass Temperaturen unter 100 °C für thermische Solaranlagen sehr günstig und bis 250 °C technisch möglich sind.

Bei Temperaturen ab 100 °C ist zu beachten, dass diese Temperaturen nur mit weiterentwickelten Komponenten solarthermisch bereitgestellt werden können bzw. konzentrierende Kollektoren bei höheren Temperaturen nötig sind.

In (C. Lauterbach, 2011) sind die einzelnen technischen Potentiale solarer Prozesswärme verschiedener geeigneter Wirtschaftszweige dargestellt. In den Zweigen Kraftwagen, Metallerzeugnisse und Maschinenbau ist zu erkennen, dass der Hauptteil der Energie unter 100°C (auch für Warmwasser und Raumheizung) benötigt wird. Die chemische Industrie weist anhand der nachfolgenden Grafik das größte Potential aller Branchen zur Nutzung von Solarthermie auf. Wegen der Komplexität der Produktionsanlagen ist allerdings nur diese pauschale Aussage zu treffen und es muss im Einzelfall eine weitere Analyse stattfinden.

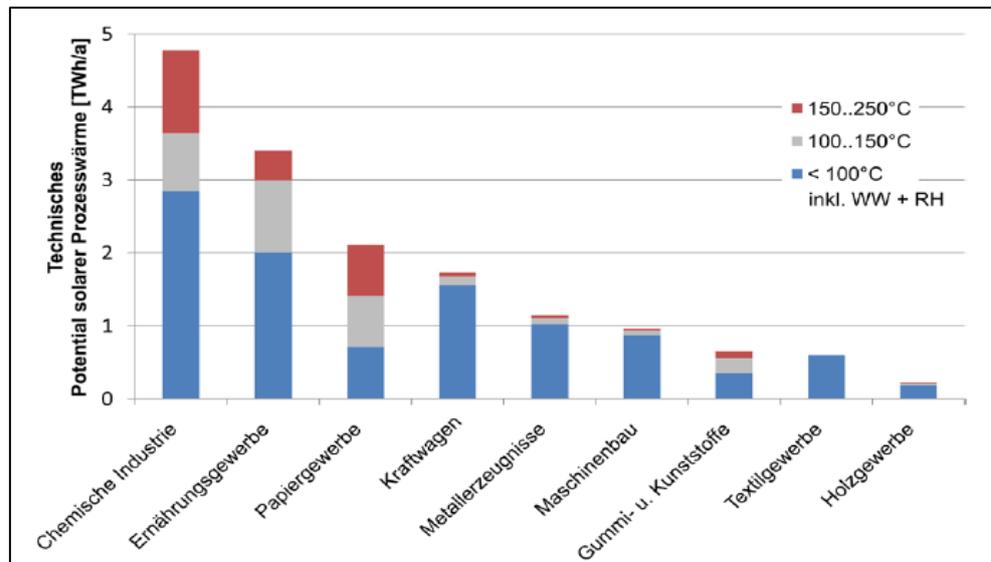


Abbildung 117: Potential zur Nutzung solarer Prozesswärme verschiedener Wirtschaftszweige, Quelle: (C. Lauterbach, 2011)

Weiter ist von Vorteil, dass Solaranlagen im industriellen Bereich wegen des hohen Grundlastbedarfs und der Möglichkeit prozessinterne Speicher einzubinden deutlich wirtschaftlicher zu betreiben sind als in Wohngebäuden. Im abschließenden Best-Practice-Beispiel wird der Einsatz von solarer Prozesswärme in der Hütt-Brauerei (Kassel/Baunatal) dargestellt.

### Best Practice

Im Rahmen des Förderprojektes „Thermische Solaranlage zur Prozesswärmebereitstellung in Verbindung mit der Implementierung eines neuen, energieeffizienten Kochverfahrens“ des Institutes für thermische Energietechnik der Universität Kassel wurde ein Energiekonzept für die Hütt-Brauerei aus Kassel/Baunatal entwickelt. Die Brauerei produziert jährlich 68.500 hl Bier und verbraucht dazu 4.000 MWh Erdgas.

Neben Effizienzmaßnahmen und der Verbesserung der Wärmerückgewinnung wurde eine thermische Solaranlage integriert. Die Kollektorfläche der Solaranlage beträgt rund 155 m<sup>2</sup>. In Kombination dazu wurde ein Pufferspeicher (Wasser) mit einem Volumen von zehn m<sup>3</sup> installiert. Durch die Maßnahmen konnte der gesamte Energieverbrauch um rund 400 MWh/a (zehn

Prozent) reduziert werden. Die Investitionskosten beliefen sich auf knapp 100.000 Euro.

### **EE-Stromnutzung für Prozesswärme (Power-to-Heat)**

Im Jahr 2010 betragen die ungenutzten regenerativen Stromüberschüsse ca. 127 GWh (kleiner 0,1 Prozent des Stromverbrauchs Deutschlands. Dies entsprach einer Leistung von 3,4 GW. Eine Abregelung der Energie war notwendig, um das Verbundnetz vor Überfrequenzen zu schützen. Circa 98 Prozent dieser Ausfallmengen sind auf den Einsatz des Einspeisemanagements im Bereich der Windenergie zurückzuführen (Zentrum für Innovative Energiesysteme (ZIES), 2012).

Das angestrebte Ziel des Power-to-Heat Konzepts ist es regelbare elektrische Lasten im Stromnetz so einzusetzen, dass das Stromnetz gestützt wird und zeitgleich die annähernd kostenlose Energie aus erneuerbaren Energiequellen nicht unnötig abgeregelt werden müssen. Elektrische Heizquellen sollten hierzu bevorzugt in bivalenten Heizsystemen eingesetzt werden, um eine Erhöhung der elektrischen Höchstlast zu vermeiden. In der Industrie können Hochspannungselektrodenkessel oder Tauchsieder für die Erzeugung von elektrischem Prozessdampf eingesetzt werden und somit fossil befeuerte Kraftwerke ergänzen. Insbesondere in der Papierherstellung und Grundstoffchemie kann eine derartige Auslegung von Dampferzeugern einen Beitrag für die Einbindung erneuerbarer Energien leisten.

Der Wirkungsgrad von Power-to-Heat liegt bei und 99 Prozent und ist effizienter als Power-to-Gas. Mit Großwärmepumpen (bei Prozesstemperaturen bis 120°C) sind Wirkungsgrade von 200 bis 400 Prozent (JAZ zwei bis vier), verglichen zum eingesetzten Strom, möglich.

Elektrische Heizkessel (EHK) sind grundsätzlich für eine Teilnahme am Regelenergiemarkt als Sekundenreserve oder Minutenreserve geeignet. Hierbei ist zwischen der Reaktionszeit des EHK und der technischen Bereitstellungszeit der Dampfleistung zu unterscheiden. EHK können innerhalb von drei bis zehn Minuten die Dampfleistung von zwei auf 100 Prozent erhöhen, beanspruchen jedoch unmittelbar die elektrische Leistung.

Die Nutzung von Stromüberschüssen im industriellen Sektor bietet sich aufgrund des kontinuierlichen, ganzjährigen Wärmebedarfs an.

### **Wirtschaftlichkeit**

Power-to-Heat mit elektrischen Heizkesseln hat – im Vergleich zu Wärmepumpen - sehr niedrige Investitionskosten (100 bis 150 €/kW) und kann schon bei sehr geringen Volllaststunden wirtschaftlich sein. Die Wirtschaftlichkeit ist allerdings erst bei einem Strompreis von zweieinhalb bis fünf Ct/kWh (ähnlich dem industriellen Gaspreis) gegeben.

### **Hemmnisse**

Als Hemmnisse sind derzeit erhöhte Strompreise gegenüber dem Gaspreis zu nennen, dennoch werden vermehrt Power-to-Heat Systeme in der Industrie als auch in der Fernwärme eingesetzt. Die noch relativ geringen Stromüberschüsse aus erneuerbaren Energien stellen aktuell ein Hemmnis für die weitere Nutzung dieser Maßnahme dar. Künftig kann jedoch davon ausgegangen werden, dass im Stromsektor der erneuerbare Energieanteil aus Wind- und Solarenergie weiter zunehmen und somit auch regenerativer Strom vermehrt im Wärmesektor eingesetzt wird.

#### Substitution von fossilen Brennstoffen

Bei der Stromerzeugung zum Betrieb von Antriebsmaschinen und in gasbetriebenen Prozesswärmeverfahren wird Erdgas in großen Mengen im Industriepark Frankfurt-Höchst benötigt.

Wird das Methan aus Biomasse CO<sub>2</sub>-neutral gewonnen, ist die Rede von Synthetic Natural Gas (SNG) bzw. Biomethan. In der Wachstumsphase der Pflanze wird Kohlenstoffdioxid als Edukt bei der Photosynthese-Reaktion benötigt. Diese wird von der Pflanze der Umwelt entzogen. Bei einer bilanziellen Betrachtung des Kreislaufes wurde das bei der Verbrennung freigesetzte Kohlenstoffdioxid bereits vorher absorbiert. Demnach ist die Verbrennung von Biomethan bzw. SNG klimaneutral. Neben einem ökologischen Effekt bietet die Substitution auch ökonomische Vorteile. Durch die CO<sub>2</sub>-Einsparungen können CO<sub>2</sub>-Zertifikate eingespart bzw. verkauft werden.

Ein weiterer Nebenaspekt ist, dass durch die Substitution die Wertschöpfung in der Region um Frankfurt/Main bleibt und nicht wie sonst ins Ausland abwandert. Gerade die begrenzt verfügbare Biomasse sollte eher in Prozessen genutzt werden bei denen Power-to-Heat und Groß-Wärmepumpen keinen Einsatz finden. Dies ist insbesondere bei sehr hohen Temperaturniveaus der Fall. Derzeit werden in der Rhein-Main-Biokompost GmbH und dem Industriepark Höchst insgesamt rund 10 Million m<sup>3</sup> Biogas bereitgestellt. Damit ist das innerstädtische Biogaspotential der Stadt Frankfurt nahezu aufgebraucht.

#### Verfügbarkeit und möglicher Einsatz von Wasserstoff

Wie im Status Quo beschrieben fallen im Industriepark Frankfurt-Höchst jährlich 30 Millionen Kubikmeter Wasserstoff als Nebenprodukt der Chlorproduktion an. Weiterhin ist zukünftig denkbar Wasserstoff aus erneuerbaren Energien mittels Wasserelektrolyse zu produzieren, indem beispielsweise die Überschüsse von Wind- und Photovoltaikstrom genutzt werden. Der hierbei produzierte Wasserstoff wäre somit klimaneutral. Bei der Rückwandlung in einer Brennstoffzelle wird wieder aus Wasserstoff und Sauerstoff elektrische Energie gewonnen und es entsteht reiner Wasserdampf als Abgas.

Die Wasserstoffnutzung ist vielseitig und kann in Zukunft eine entscheidende Rolle einnehmen. Aufgrund der Möglichkeit der Speicherung kann sie als Ausgleichsenergie aber auch im Verkehrssektor eingesetzt werden. Es ist denkbar Wasserstoff nicht nur im Personen-Individualverkehr für die Langstrecke einzusetzen, sondern vornehmlich im Schwerlastverkehr. Bereits vor eini-

gen Jahren wurde der Wasserstoff an die hessenweit erste Wasserstofftankstelle durchgeleitet. Die jährlich produzierte Wasserstoff Menge im Industriepark reichte aus um ca. 400 Busse oder rund 10.000 Autos zu betreiben.

#### Zusammenfassung der Einsparungen und der erneuerbaren Energien im Industriesektor

Analog zum Stromsektor werden auch die Zahlen der Studie von (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, IREES GmbH, TU Berlin, 2013) zu Grunde gelegt. Dabei wird durch die vorgestellten Maßnahmen eine Einsparung der Brennstoff in Höhe von 12,7 Prozent bis 2035 dargestellt. Bis zum Jahr 2050 wird davon ausgegangen, dass insgesamt 15 Prozent der Brennstoffe und somit Wärme eingespart werden kann.

### 5.7 Visionären Maßnahmen im Wärmesektor

Im Kapitel „Visionäre Maßnahmen“ werden zukünftig zu Verfügung stehende Technologie, die derzeit jedoch noch über keine Marktreife verfügen, vorgestellt. Ziel des Kapitels ist es einen kurzen Ausblick über mögliche zukünftige Technologien zu geben und den Leser in seiner Vorstellungskraft zu inspirieren. Die nachfolgend dargestellten visionären Maßnahmen im Wärmesektor werden nicht bei der Erstellung der Szenarien berücksichtigt.

#### Recycelte Wasserdusche

Das Unternehmen Orbital Systems entwickelt derzeit eine Dusche welche das gebrauchte Wasser innerhalb eines Kreislaufes reinigt und aufbereitet. Nach Angaben des Herstellers kann dadurch der Energieverbrauch um rund 80 Prozent gesenkt und 90 Prozent des Warmwasserverbrauchs eingespart werden. Dabei wurde zusammen mit der NASA (ähnliche Duschen sind auf ISS schon vorhanden) das System so weiterentwickelt, dass es für den Haushaltsgebrauch genutzt werden kann. Erste Tests in einem Freibad im schwedischen Malmö haben gezeigt, dass ein Einsatz durchaus vielversprechend ist. Zwei dort installierte Duschen sparten im Sommer 2013 mehr als 100.000 Liter Wasser (Menn A. , 2013). Die Frage, ob sich solche Duschen durchsetzen ist aufgrund der derzeitigen Nutzungsanwendungen von Abwasser fraglich. Zum einen wird eine bestimmte Menge an Abwasser für die Spülung der Kanalisation benötigt, zum anderen wird darüber nachgedacht, zukünftig die Abwasserwärme mittels Wärmetauscher in Passivhäusern oder der Kanalisation zu entziehen.

#### Smarte Fenster

Derzeit finden sich mehrere sogenannte smarte Fenster in der Entwicklung. Das „Smart Fenster“ passt seine Lichtdurchlässigkeit an die Witterung und persönliche Bedürfnisse an. Mittels Anlegen einer elektrischen Spannung wird bei „elektrochromem“ Glas die Lichtdurchlässigkeit verändert. Dabei wird eine mikroskopisch dünne Beschichtung aktiviert, die sich bläulich verfärbt jedoch transparent bleibt. Dieser Vorgang wird vollautomatisch oder nach Wunsch manuell auf Knopfdruck aktiviert.

Weiter hat das Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung (IAP) in Kooperation mit der auf Yachtverglasung spezialisierten Tilse GmbH 2011 eine weitere innovative Lösung gefunden. Das sogenannte „thermotrope“ Glas ist mit Harz beschichtet. Es reagiert automatisch auf Temperatur und passt seine Lichtdurchlässigkeit an. Wird die Harzschicht auf etwa 40°C erwärmt verändert sich die Struktur, sodass das eintreffende Licht gestreut und das Glas getrübt wird (Diethelm, 2013). Dadurch kann die passive Solareinstrahlung und somit das nicht gewollte Aufheizen der Gebäude reduziert werden.

#### Ökologische Dämmung aus Meergras

Filzartige braune Seegraskugeln, die aus den abgestorbenen Blattrippen der *Posidonia oceanica* bestehen werden schon als Dämmstoff für Außenwände und Dachstühle. Ihre Dämmeigenschaft ist rund 20 Prozent effektiver als die von Holzfasern, den lange Zeit beliebtesten natürlichen Dämmstoff. Weiter ist die Energiebilanz trotz Transport aus Albanien, Spanien und Marokko rund 30-mal besser als bei herkömmlichen Dämmstoffen (Marquardt, 2013).



Abbildung 118: Dämmmaterial aus Meeresgras, Quelle (NeptunTherm 2014).

## 6 Maßnahmen – Steigerung der Effizienz und einer nachhaltigen Mobilität im Sektor Verkehr

### 6.1 Einführung in die nachhaltige Mobilität

Die nachhaltige Entwicklung der Mobilität steht in direktem Zusammenhang mit einer sozialen, ökologischen und ökonomischen Verträglichkeit. Eine nachhaltige Mobilität hat somit den Anspruch umweltfreundlich, für jedermann bezahlbar, diskriminierungsfrei zugänglich und volkswirtschaftlich effizient organisiert zu sein. Beim Vergleich des derzeitigen Verkehrssystems mit dem Anforderungsprofil einer nachhaltigen Mobilität werden erhebliche Missstände deutlich. Entgegen des Verursacherprinzips finden tägliche ökologische Zumutungen durch den Pendlerverkehr statt, da die mit dem Auto zur Arbeit in die Stadt einpendelnden Menschen die ohnehin schon höhere Luft- und Lärmbelastung in der Stadt weiter ansteigen lassen. Steigende Kraftstoff-, Ressourcen-, Fahrticketpreise im individuellen und öffentlichen Verkehr sowie infrastrukturelle Missstände schränken viele Menschen in ihren Mobilitätsbedürfnissen ein. Durch Staus auf überfüllten Straßen und die Suche nach einer Parkmöglichkeit entwickelt sich ein Dauerstress bei den Verkehrsteilnehmern. Starke Autoverkehrsbelastung und auch eine Übernutzung öffentlicher Räume durch den ruhenden Kfz-Verkehr sind klare Negativfaktoren für urbane Lebensqualität.

Das folgende Kapitel setzt sich mit der Verkehrssituation in Frankfurt auseinander. Neben der Beschreibung der Ist-Situation (CO<sub>2</sub>-Bilanz, Bestandsaufnahme an Verkehrsobjekten) wird die Übertragbarkeit und Wirkung von Best Practice Beispielen aus internationalen und nationalen Beispielen und Maßnahmen auf den Verkehr in Frankfurt überprüft. Unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Maßnahmen wird eine fortschreitende CO<sub>2</sub>-Bilanz des Verkehrssektors erstellt und ein Bild von einem möglichen künftigen nachhaltigen Mobilitätskonzept der Stadt Frankfurt am Main skizziert.

Weiter werden zwei unterschiedliche Szenarien für die Entwicklung des Mobilitätssektor bis 2050 aufgezeigt. Dabei wird zwischen einem Referenz- und Maßnahmenzenario unterschieden. Im Referenzzenario auch „Business as Usual“ genannt, erfolgt die Entwicklung des Mobilitätssektors ohne nennenswerte Eingriffe und Steuerung seitens der lokalen Politik. Demgegenüber steht das Maßnahmenzenario. In diesem werden die im Maßnahmenenteil vorgestellten Best-Practice Beispiele aus anderen Städten umgesetzt.

### 6.2 Verkehrsvermeidung – Nahmobilität

*„Das Auto ist jene technische Erfindung, welche die Anforderungen an die Reaktionsgeschwindigkeit der Fußgänger beträchtlich gesteigert hat.“*

*Prof. Dr. Lothar Schmidt (1922 - heute), deutscher Politologe, Jurist und Hochschullehrer*

In der Vergangenheit wurden in Frankfurt verschiedene Aktionen gestartet, um der Öffentlichkeit ein umfassendes Angebot an Informationen über die

Luft, Schadstoffe, Stadtklima, Klimaschutz und Energiesparmaßnahmen zu offerieren. Um zukünftig in Frankfurt die Lebensqualität weiter nachhaltig zu verbessern, muss in den kommenden Jahren ein Umdenken hinsichtlich des Mobilitätsverhaltens bei den Bürgern stattfinden. Im folgenden Abschnitt werden die einzelnen Maßnahmen zur Förderung einer nachhaltigen Nahmobilität für die Fortbewegungsmittel Fußgänger, motorisierter Individualverkehr, Fahrrad, leichte Nutzfahrzeuge (LNF), Lastkraftwagen und öffentlicher Personennahverkehr für Frankfurt am Main beschrieben.

### 6.2.1 Fußgänger

Fußgänger sind ein wichtiger Bestandteil eines funktionalen sozioökonomischen Stadtklimas. Zum einen fördern Begegnungen von Fußgängern die Kommunikation, führen zu direkten Kontakten und tragen somit wesentlich zum Leben in einem Bezirk bei. Zum anderen ist das zu „Fuß-Gehen“ ein wichtiges Bindeglied zwischen verschiedenen Verkehrsmitteln. Damit bildet der Fußgängerverkehr die zentrale Säule im Gesamtsystem „Mobilität“.

#### **Status Quo**

In Frankfurt wird seit Jahren eine verkehrsvermeidende Siedlungsentwicklung vorangetrieben. Dabei wird verstärkt auf die Ausweisung gemischter Siedlungsgebiete mit einem Vorrang für die Binnenentwicklung vor der Außenentwicklung gesetzt. Insbesondere die Wohnfunktion in sonst monofunktionalen Siedlungsbereichen (Gewerbegebiet, Innenstadt) trägt zu einer verkehrssparsamen Verhaltensweise bei (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2011). Dieser Sachverhalt findet sich auch im erhöhten Anteil an zurückgelegten Fußwegen am Modal Split von Frankfurt wieder. Im Vergleich zu anderen deutschen Großstädten belegt Frankfurt einen Platz im oberen Viertel (DVB, VVO, TU Dresden, Stadt Dresden, 2008). Der überdurchschnittlich hohe Anteil am Modal Split ist Folge einer jahrelang konsequenten städtischen Planung der Stadt Frankfurt. Diese berücksichtigt das Konzept der „kurzen Wege“. Demnach können viele Frankfurter /innen beispielsweise ihre Einkäufe zu Fuß erledigen. Neben der Infrastruktur („kurze Wege“ etc.) hat die Sicherheit der Fußgänger im Straßenverkehr großen Einfluss auf die Anzahl zurückgelegter Fußwege. Eine erhöhte Sicherheit im nichtmotorisierten Verkehr führt zu einer Erhöhung des Anteils an Fußgängern und Fahrradfahrern im Straßenverkehr.

#### **Maßnahmen**

Ausgehend von den mit dem Pilotprojekt „Nahmobilität im Nordend“ gewonnenen Erkenntnissen und gemachten Erfahrungen wurde Repertoire stadtweit übertragbarer Maßnahmen und Handlungsansätze zur Förderung des Zu-Fuß-Gehens erarbeitet. So wurden z.B. ein städtischer Arbeitsplan Barrierefreiheit entwickelt und seither bei Straßensanierungen und grundhaften Erneuerungen durch den Bau von vorgezogenen Kreuzungsbereichen sogenannte Gehwegnasen realisiert, die die Sicherheit für Fußgänger erhöhen.

Zudem werden durch den deutlich gesteigerten Ausbau der Radverkehrsinfrastruktur Konflikte zwischen Fußgängern und Radfahrern stetig verringert.

## **Maßnahme**

### Einrichtung von Tempo 30-Limits auf Hauptverkehrsstraßen in Frankfurt

Eine weitere Möglichkeit den Verkehr sicherer und verträglicher zu gestalten ist die Einrichtung von Tempo 30-Limits auf Hauptverkehrsstraßen in Frankfurt. Studien bestätigten, dass durch Tempo 30-Zonen etwa 40 Prozent weniger Unfälle als in vergleichbaren Tempo 50-Bereichen vorkommen. Als Beispiel ist die Stadt München zu nennen. Dort konnte die Anzahl der Unfälle mit Personenschäden um ca. 62 Prozent und die Anzahl mit Schwerverletzten um ca. 72 Prozent gesenkt werden (Limbourg, 2012). Die Verringerung des Tempos führt dazu, dass Flächenreserven für den nichtmotorisierten Verkehr durch geringere Fahrbahnbreiten erschlossen werden können. Die heute in manchen Quartieren vorzufindende Unterschreitung der Mindestbreite von Gehwegen (1,50 m) kann damit zum Teil kompensiert werden. Die Stadt Frankfurt am Main hat schon lange in faktisch allen Wohngebieten Tempo 30 Zonen eingerichtet. Die Einrichtung von Tempo 30-Limits auf Hauptverkehrsstraßen wäre ein nächster wichtiger Schritt.

Bei der Umsetzung der Verkehrsberuhigung können unterschiedliche bauliche Maßnahmen ergriffen werden. Als einfache bauliche Maßnahmen sind z.B. die Verengung des Straßenraums durch Kübel und Poller zu nennen. Zu den eher langfristigen und aufwendigeren Maßnahmen zählen die Umgestaltung des Straßenraums, die Veränderung an Kreuzungs- und Knotenpunkten sowie Grüninseln und Ausbau von Fahrradwegen mit Schwellen und Mittelinseln (Limbourg, 2012). Eine differenzierte Analyse des Fußgängerverkehrnetzes erfolgt nicht im Rahmen des Generalkonzeptes zum Verkehrsentwicklungsplan; diese ist Detailuntersuchungen von Verkehrsplanern vorbehalten.

## **Wirtschaftlichkeit**

Eine wirtschaftliche Bewertung der Maßnahmen im Mobilitätsbereich der Fußgänger erweist sich als schwierig. Es ist zu erwarten, dass die Investitionskosten der Maßnahmen nur einen Bruchteil der Investitionssumme anderer Bereiche ausmachen.

## **Umweltauswirkung**

Die mit der Maßnahme verbundene CO<sub>2</sub>-Reduzierung ist ebenfalls schwer zu bewerten. Wie oben beschrieben soll der Anteil der Fußwege am Modal Split konstant gehalten werden. Bei gleichbleibenden Wegen pro Tag resultiert vorerst keine Veränderung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes. Jedoch kann sich der Anteil an ÖPNV-Nutzern aufgrund verbesserter Fußwege zwischen den einzelnen Verkehrsmitteln erhöhen. Der Umstieg von MIV auf ÖPNV kann zu einer verbesserten CO<sub>2</sub>-Bilanz führen. Des Weiteren führt ein vermindertes Tempo zu einer geringeren Lärmbelastung, weniger Abgasen, niedrigeren Schadstoffwer-

ten von Kohlenmonoxid, Stickoxide und Kohlewasserstoffen und somit zu einer höheren Qualität im Wohnumfeld.

## 6.2.2 Fahrrad

*“Zeigen Sie mir ein Problem dieser Welt und ich gebe Ihnen das Fahrrad als Teil der Lösung.“*

*Mike Sinyard (1950 - heute) Gründer und Vorsitzender von Specialized Bicycle Component*

### **Status Quo**

Wie eingangs erwähnt liegt der Anteil an Fahrradfahrten am Modalsplit derzeit bei rund 13 Prozent. Im Vergleich zu anderen europäischen Städten ist dieser Wert weiter ausbaubar. Primär soll durch die Radverkehrsförderung die Pkw-Nutzung insbesondere auf Strecken bis 5 Kilometern substituiert werden. Die dabei eingesparten Emissionen (CO<sub>2</sub>, Feinstaub, Lärm) führen zu einer Verbesserung des Stadtklimas und Erhöhen die Lebensqualität in Frankfurt. Damit ist der Ausbau des Radverkehrs eine weitere zentrale Säule zum Erreichen der gesetzten Klimaziele und einer nachhaltigen Mobilität in Frankfurt.

Trotz des dominanten Anteils an Pkw, verfügt das Fahrrad über eine durchaus beachtliche Ausgangssituation in Deutschland. Rund 82 Prozent der deutschen Haushalte verfügen über ein Fahrrad. Zwar werden ca. 49 Prozent der Fahrräder selten bzw. nie genutzt; dagegen machen rund 19 Prozent von ihrem Fahrrad täglich gebrauch (Büttner, 2011). Die Stadt Frankfurt ist schon seit geraumer Zeit um die Verbesserung der Bedingungen für Fahrradfahrer bemüht. Im Jahr 1992 wurde eine umfassende Radverkehrsstrategie beschlossen. Demnach sind Fahrräder ein selbstverständlicher Bestandteil des Straßenverkehrs und müssen bei der Verkehrsplanung angemessen berücksichtigt werden. Im Zuge einer Erweiterung der Radverkehrsstrategie durch den 2005 beschlossenen Gesamtverkehrsplan wurde 2009 das Radfahrbüro gegründet, das die Umsetzung von Infrastruktur- und Öffentlichkeitsmaßnahmen gebündelt und effizient abwickeln soll. Weiter wurde die Infrastruktur im Straßenverkehr durch Maßnahmen wie Aufstellstreifen, erlaubtes Fahrradfahren gegen die Einbahnstraße, großflächige Aufstockung der Fahrradabstellmöglichkeiten im öffentlichen Raum Radfahrschleusen für Linksabbieger, separat geschaltete Fahrradampeln, Bordsteinabsenkungen und die Anpassung der Ampelregelung deutlich verbessert (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2011). Der Anteil an Fahrradfahrten im Modal Split in Frankfurt ist im Vergleich zu anderen Städten wie Kopenhagen und Amsterdam noch gering. In Kopenhagen liegt dieser bei rund 31 Prozent (Stand: 2010) in Amsterdam bei ca. 22 Prozent (Stand: 2010). Neben einer fahrradfahrerfreundlichen Infrastruktur hat sich in diesen Städten über Jahrzehnte hinweg eine Art Fahrradkultur entwickelt. „Radfahren ist dort traditionell Teil des Alltags, oftmals auch der lokalen Identität und des damit verbundenen Lebensgefühl (Deutsches Institut für Urbanistik, 2011).“

In Frankfurt am Main sollte nach Ansicht der Verfasser bis 2050 durch Investitionen in die Fahrradinfrastruktur und Marketingkampagnen versucht werden

einen mit Kopenhagen und Amsterdam vergleichbar hohen Anteil an Fahrradfahrten am Modal Split zu erreichen. Im Jahr 2012 wurde eine erste Potentialstudie zur Erschließung von Fahrradschnellwegen rund um Frankfurt durchgeführt. Dabei haben sich in Abhängigkeit des Pendleraufkommens und der Bevölkerungsdichte sechs Hauptkorridore rund um Frankfurt heraus kristallisiert (siehe Abbildung 119).

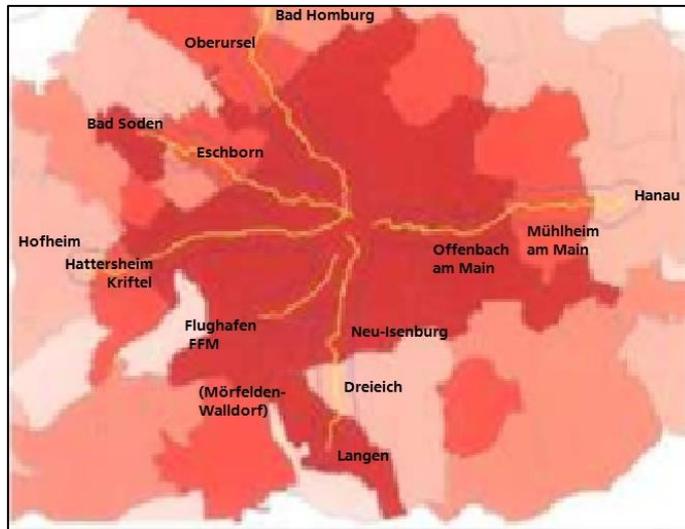


Abbildung 119: mögliche Korridore für Radschnellwege nach Frankfurt am Main (Pretsch, 2013).

Durch den Ausbau der Fahrradschnellwege kann die Fahrtzeit auf jeder Strecke (Anfang - Ende) um rund ein Drittel reduziert werden (Pretsch, 2013). In Kombination mit Zubringern an Haltestellen des ÖPNV oder P+R Parkplätzen, kann ein nennenswerter Teil des Verkehrsaufkommens des MIV in Frankfurt reduziert werden.

### 6.2.3 Pedelecs und E-Bikes

#### Status Quo

Bei den Verkaufszahlen von Pedelecs ist seit Jahren ein starker Anstieg zu beobachten. Wurden 2007 deutschlandweit rund 70.000 Pedelecs verkauft, so waren es im Jahr 2012 rund 380.000. Auch wenn derzeit der Marktanteil bei rund ein Prozent liegt, gehen Prognosen des Allgemeinen Deutschen Fahrrad Clubs (ADFC) und Zweirad-Industrie-Verband (ZIV) davon aus, dass bis spätestens 2020 elektrische Fahrräder einen Anteil am Fahrradbestand von zehn Prozent erreichen (Abbildung 120).

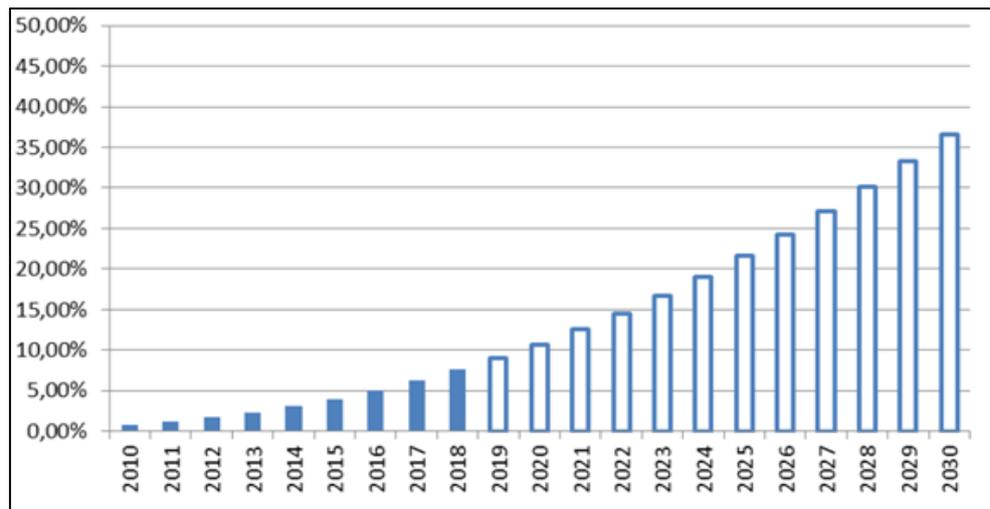


Abbildung 120: Entwicklung der Marktanteile elektrischer Fahrräder, (Clausnitzer B. G., 2012).

Insbesondere in Städten wie Frankfurt wird schon heute für eine stärkere Nutzung der Pedelecs geworben. Mit der Initiative „bike+buisness“ vom Regionalverband Frankfurt Rhein-Main soll insbesondere der Einsatz für Pedelecs auf Pendlerdistanzen zwischen fünf und 15 Kilometer erhöht werden. Bei Reichweiten von 20 bis 60 km (abhängig von Akkuleistung und Belastung) eignen sich E-Bikes und Pedelecs für diese Zwecke sehr gut. Im Maßnahmen-szenario „Vision nachhaltiges Mobilitätskonzept bis 2050“ beträgt der Anteil an zurückgelegten Strecken mit Fahrrädern am Modal Split im Jahr 2050 rund 30 Prozent. Die erneuerbaren Energien decken zu diesem Zeitpunkt rund 80 Prozent des nationalen und des städtischen Strombedarfs (Nitsch, 2012). Somit fahren die Pedelecs nahezu CO<sub>2</sub> neutral.

## Maßnahmen

### Aufbau / Ausbau von Fahrradschnellwegen

Die sukzessive Erhöhung des Anteils an Fahrrädern bzw. Pedelecs in Frankfurt geht mit den Auf- und Ausbau von Schnellfahrradwegen einher. Diese ermöglichen Radfahrern schnellere Verbindungsstrecken und steigern somit die Attraktivität der Elektrofahrräder im Straßenverkehr. Insbesondere für Pendler im Einzugsgebiet von rund fünf bis 15 km von der Stadtgrenze bieten Fahrradschnellwege die Möglichkeit, die Distanz zu Hauptverkehrszeiten schneller zurückzulegen als mit dem privaten Pkw. Abbildung 121 zeigt das Einzugsgebiet für potentielle Fahrradpendler. Demnach erstreckt sich das Einzugsgebiet im Norden von Bad Vilbel bis Langen im Süden. Im Westen von Hochheim am Taunus bis in den Osten nach Hanau. Nach Angaben des Regionalverbandes **FrankfurtRheinMain** stammen rund 130.000 – 140.000 Pendler aus dem potentiellen Einzugsgebiet. Dies entspricht rund 33 Prozent der gesamten Ein- und Auspendler Frankfurts. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es sich lediglich um ein theoretisches Potential handelt.

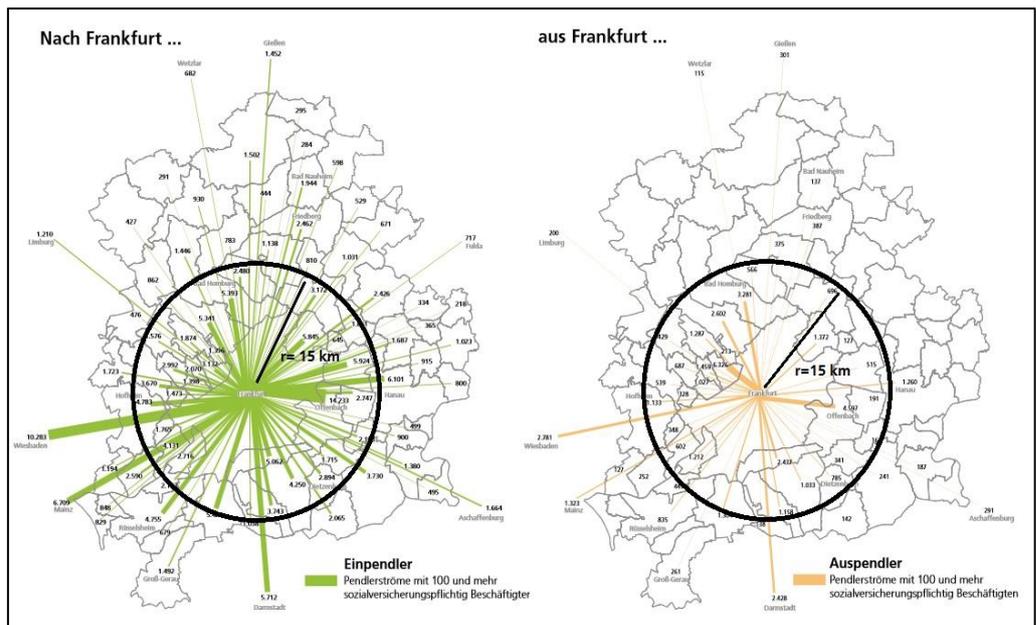


Abbildung 121: Potentielles Einzugsgebiet für den Einsatz von Pedelecs und E-Bikes auf Schnellfahrradwegen in Frankfurt, eigene Darstellung (IBP) auf Datenbasis (Regionalverband FrankfurtRheinMain, 2011).

Ein möglicher Anstieg der Fahrradfahrer hat zur Folge, dass die Unternehmen ihre Infrastruktur an den Radfahrer anpassen müssen. Somit müssen ausreichend Fahrradstellplätze, Umkleidekabinen und Duschen in den Unternehmen zu Verfügung gestellt werden. Seitens der in und um Frankfurt ansässigen Unternehmen können weitere Anreize geschaffen werden, um Fahrten zur Arbeit aufs Rad zu verlagern. Die Einführung von Diensträdern anstelle von Dienstwägen führt in vielen Fällen zu einer Win-Win Situation. Einige hunderte Unternehmen u.a. Bayer, Bionade, DHL, Deutsche Telekom, Unicredit oder die Allianz haben bundesweit die Einführung von Dienstfahrrädern beschlossen. Mit der Übertragung der Dienstwagenprivilegien auf Diensträder Ende 2012 dürfen nun auch Diensträder dem Arbeitnehmer dauerhaft überlassen werden. Dank der Zuschüsse vom Arbeitgeber und den Steuererleichterungen des Staates können neuste Fahrräder wie E-Mountainbikes oder Rennräder einfach finanziert werden.

## Maßnahme

### Ausrichtung der Ampelschaltungen an den Fahrradverkehr

Neben den Fahrradschnellwegen und einem guten, erkennbaren Radverkehrsnetz führt eine am Radverkehr ausgerichtete Ampelschaltung zu einer effizienten Steuerung des Radverkehrs. Mindestens muss der Radverkehr bei den Ampelsteuerungen klar und eindeutig berücksichtigt sein, wo möglich sollte versucht werden, über längere Abschnitte Grünzeiten für den Radverkehr zu koordinieren. Eine gezielte Berücksichtigung des Radverkehrs bei Ampelanlagen ist ferner geeignet, die Zahl der Rotlichtverstöße zu minimieren

und leistet so auch einen Beitrag zur Verkehrssicherheit. Die Zeitersparnis durch staufreie Infrastruktur und geringe Verlustzeiten an Ampeln initiiert bei Autofahrern einen weiteren Anreiz auf das Fahrrad umzusteigen.

#### Einsatz sicherer Fahrrad- und Pedelecstellplätze

Neben einem verbesserten Verkehrsfluss ist die Unterbringung und Verfügbarkeit von Leih- und Privatfahrrädern von zentraler Bedeutung. Parallel zur Umfunktionierung von zukünftig überdimensionierten Parkhäusern (aufgrund des Rückgangs des motorisierten Individualverkehrs) sind zukünftig in Frankfurt gesicherte Abstellanlagen, z.B. in Form des „Bike-Tower“ (Abbildung 122) an zentralen öffentlichen Plätzen und Firmenstandorten denkbar. Diese stellen eine Komfort-Alternative zu dem bereits heute in der Stadt dezentral verteilten Anlehnbügel dar.



Abbildung 122: Modell für die Umsetzung eines Bike-towers, (Menn, Kamp, & Busch, 2011).

### **Wirtschaftlichkeit**

Eine gewollte Erhöhung des innerstädtischen Radverkehrs erfordert bauliche Änderungen im Straßennetz. Diese sind monetär schwer zu bemessen. Deshalb wurde im Rahmen des Generalkonzepts keine ganzheitliche Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für den Ausbau des Fahrradverkehrs durchgeführt.

Die Wirtschaftlichkeit von E-Bikes und Pedelecs lässt sich hingegen gut abbilden. Die durchschnittlichen Anschaffungskosten liegen derzeit bei rund 1.700 Euro. Optional können Ersatz-Akkus, die zwischen 400 – 1.000 Euro kosten erworben werden. Die Unterhaltungskosten des Pedelecs sind mit rund 12 Cent pro gefahrenen Kilometer im Vergleich zum Pkw (50 Cent/km) deutlich geringer (Verkehrsclub Deutschland, 2010). Bei einer täglichen Fahrleistung von rund sechs Kilometern am Tag hat sich die Investition „Pedelec“ gegenüber den reinen Betriebskosten eines Autos schon nach gut zwei Jahren amortisiert. Es ist jedoch zu betonen, dass ein Pedelec nicht in jeder Situation ein Auto ersetzen kann.

### **Umweltauswirkung**

Der Energieverbrauch von Pedelecs liegt bei rund einer kWh pro 100 km. Dieser kann aber in Abhängigkeit der Topographie, des Fahrergewichts und der gewählten Unterstützung variieren. Beim derzeitigen Strommix mit 456 grCO<sub>2</sub>/kWh liegt der CO<sub>2</sub>-Ausstoß bei vier bis fünf Gramm pro gefahrenen Kilometer. Wird der Akku mit Strom aus erneuerbaren Energien geladen, fährt das Pedelec CO<sub>2</sub> neutral (Verkehrsclub Deutschland, 2010). Der Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Pkw (> 120 gCO<sub>2</sub> /km) mit einem Pedelec zeigt, dass rund 95 Prozent der Emissionen durch den Umstieg von einem Pkw mit Verbrennungsmotor auf ein Pedelec eingespart werden können.

### **Best Practice**

#### *Fahrrad-Marketing, Bozen*

Im „Plan zur Radmobilität in Bozen“ wird versucht ein zusammenhängendes Fahrradnetz mit einem farbigen Leitsystem zu schaffen. Weiter wird der Auf- und Ausbau von Fahrradverleihsystemen und Fahrradstellplätzen forciert. Mit Informations- und emotional angelegten Marketingkampagnen mit Megaprints auf Hauswänden, Postkartenaktionen, Kinospots und Fahrradfestivals wird versucht, die Aufmerksamkeit der Einwohner zu wecken. Weiter steht die Entwicklung einer cooperate identity auf dem Plan, um ein Bewusstsein bei den Einwohnern zu verankern. Durch den Plan zu Radmobilität in Bozen konnte der Anteil der mit dem Fahrrad zurückgelegten Strecken am Modalsplit von 17,5 Prozent (2002) auf 25 Prozent (2009) gesteigert werden (Bozen, 2010).

### **Best Practice**

#### *Radschnellwege, London*

In diversen europäischen Städten wurden Radschnellwege umgesetzt bzw. befinden sich im Bau oder Planung. In London sollen bis 2015 zwölf sogenannte „Cycle Highways“ in der Innenstadt errichtet werden. Die Stadtverwaltung verspricht sich dadurch eine Steigerung des Anteil von Fahrradfahrten am Modal Split um 400 Prozent (Transit of London, 2010).



Abbildung 123: Fahrradschnellweg in Zwolle, (Falkowski, 2014).

### **Best Practice**

### *am Radverkehr ausgerichtete Ampelschaltung, (Kopenhagen)*

In Kopenhagen wurde 2006 die „Grüne Welle“ für Radfahrer getestet. Grüne Wellen sollen den Verkehr in einer Straße flüssig halten. Hierfür wurden die aufeinander folgenden Ampelanlagen in einer Straße so eingestellt, dass sie bei einer bestimmten konstanten Fahrtgeschwindigkeit allesamt in einer Grünphase erreicht werden können. Ergebnis des Projekts war eine erhöhte Nutzung durch Radfahrer mit einem steigenden Durchschnittstempo (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2013).



Abbildung 124: Straßenschild für „Grüne Welle,“ (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2013).

## 6.2.4 Fahrradverleihsysteme

### **Status Quo**

In Frankfurt gibt es derzeit zwei Anbieter von Fahrradverleihsystemen. Das von der Deutschen Bahn angebotene „Call a Bike“ hält an 60 Stationen verteilt insgesamt 1.000 Räder zur Ausleihe bereit. Neben dem Fahrradverleihsystem der Deutschen Bahn gibt es in Frankfurt das Fahrradverleihsystem „Nextbike“. Diese verfügt über 32 Stationen mit insgesamt 200 Fahrrädern. In den Stadtteilen südlich des Mains wurden ebenfalls fünf „Nextbike“ Stationen errichtet. Nach der Zusammenlegung des Offenbacher und Frankfurter Fuhrparks konnte die Nachfrage an „Nextbike“ Ausleihen deutlich gesteigert werden.

### **Maßnahme**

#### Ausbau eines eng flächendeckenden Fahrradverleihsystems

Parallel zu den oben genannten Maßnahmen ist der Ausbau der bestehenden Fahrradverleihsysteme hinzu einem eng vermaschten, flächendeckenden Fahrradverleihsystem unverzichtbar für die Steigerung der Fahrradfahrten im Modal Split. Insbesondere Geschäftsleute und Touristen profitieren von der schnellen und kostengünstigen Alternative zum Pkw.

#### Städte und Kommunen übergreifende Fahrradverleihsysteme

Es hat sich gezeigt, dass durch ein städteübergreifendes Fahrradverleihsystem insgesamt die Bereitschaft zur Nutzung von Leihfahrrädern insbesondere bei Pendlern steigt.

In der Region Frankfurt, wo Distanzen kleiner 15 km zwischen stadtnahen Gegenden und der Stadt vorhanden sind (Abbildung 121), sollte über das Angebot von Pedelecs und E-Bikes in Städte übergreifenden Verleihsystemen nachgedacht werden. Dadurch könnten Fahrradverleihsysteme einen Beitrag zur Erhöhung des Anteils an Radfahrten am Modal Split leisten. Zum Beispiel könnte in diesem Zusammenhang in Kommunen wie Raunheim und Kelsterbach Fahrradstationen ausgebaut werden.

### **Wirtschaftlichkeit**

Verschiedene etablierte Fahrradverleihsystemanbieter zeigen, dass ein wirtschaftlicher Betrieb möglich ist. Die Umgestaltung hin zu einer fahrradfreundlicheren Verkehrsinfrastruktur in Frankfurt wird Fahrradverleihsysteme noch wirtschaftlich attraktiver für Unternehmen machen. Es bleibt zu berücksichtigen, dass mit dem Ausbau von Fahrradverleihstationen der Redistributionsbedarf und somit der Bedarf an LNF innerstädtisch steigt.

### **Umweltauswirkung**

Eine quantitative Aussage, inwieweit der Ausbau von Fahrradverleihstationen Einfluss auf die Erhöhung des Anteils im Modal Split und den damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen hat, ist schwer zu quantifizieren. Es besteht die Gefahr, dass der Anstieg der Radfahrten auf Kosten der Fußwege und ÖPNV geschieht. Damit hätte ein erhöhter Fahrradanteil am Modal Split keinen bzw. nur einen geringen Einfluss auf die aktuelle CO<sub>2</sub>-Bilanz in Frankfurt. Eine gezielte Substitution der Pkw-Fahrten durch Fahrräder muss deshalb durch die oben vorgestellten Maßnahmen besonders in den städtischen Randbezirken erfolgen.

### **Best Practice**

#### *Fahrradverleihsystem Vélib in Paris*

Seit 2007 hat sich in Paris das Fahrradverleihsystem „Vélib“ erfolgreich am Markt etabliert. „Vélib“ startete mit 800 Ausleihstationen und 10.000 Leihfahrrädern. Aktuell werden an 1.202 Stationen rund 200.000 Fahrräder für Kunden bereitgestellt (Schneider B. , 2007). Durch die Einführung von Vélib hat sich Zahl an Radfahrer in Paris verdoppelt. (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2013).

### **Maßnahme**

#### Entwicklung eines Strategiekonzeptes ÖPNV & Fahrrad

Ein hoher Anteil des innerstädtischen Pkw-Aufkommens in Frankfurt ist den Pendlern geschuldet, wie der Modalsplit in Kapitel 3 darstellt. Rund 82 Prozent des Quell-Ziel-Verkehrs kommen täglich mit dem Auto. Es wird angestrebt,

die Nutzung von Autos im Berufsverkehr um rund 50 Prozent zu reduzieren, daher zielen die folgend beschriebenen Maßnahmen insbesondere auf den Pendlerverkehr ab. Das Strategiekonzept sollte folgende Maßnahmen berücksichtigen:

1. Förderung von Fahrradstationen an ÖPNV Haltestellen in Stadt und umgebender Region;
2. Verbesserte Kopplung der öffentlichen Fahrradverleihsysteme (ÖFVS);

#### Förderung von Fahrradstationen an ÖPNV Haltestellen

Unter dieser Maßnahme gilt es, Fahrradstationen gezielt an ÖPNV-Stationen zu platzieren. Dabei kann das Programm „100 Fahrradstationen in NRW“ als beispielhaft genannt werden. Es gilt insbesondere Synergien zwischen dem Umsteigen von ÖPNV-Haltestellen zu Fahrradstationen zu schaffen. Das Abstellen der Fahrräder sowie auch die Bezahlung für sicheres Abstellen sollte schnell und einfach erfolgen können. Der Service für Fahrradfahrer an Bahnhöfen sollte hoch und umfangreich sein, da schließlich die Nutzer der Fahrradstationen potentielle Bahn- und ÖPNV-Kunden sind (Ahrens, Aurich, Thomas Böhmer, & Pitrone, 2010). Weiter gilt es automatische Zahlungssysteme an Bahnhöfen zu installieren, welche auch 24 h geöffnet sind.

#### **Wirtschaftlichkeit & Finanzierung**

Nach (Ahrens, Aurich, Thomas Böhmer, & Pitrone, 2010) liegen die Preise zum Abstellen an Fahrradstationen in und an Bahnhofsstationen bei rund 0,70 € pro Tag oder 70 € pro Jahr. Diese Preise decken die Kosten in der Regel nicht, deshalb sollte weiter geprüft werden, ob Kooperationen zwischen Fahrradstationsbetrieben und Cafés, Kiosken oder anderen Betrieben möglich ist. Außerdem sollte geprüft werden, ob in Hessen Fahrradstationen an Bahnhöfen förderungsfähig sind.

#### **Umweltauswirkung**

Um den Fahrrad- als auch ÖPNV-Anteil weiter zu erhöhen, ist die Kopplung beider Verkehrsformen zu verbessern. Inwieweit die CO<sub>2</sub>-Emissionen durch einzelne Stationen reduziert werden können, ist nicht quantifizierbar. Ebenso sollte jedoch auch der zusätzliche Platzbedarf an Bahnhöfen und ÖPNV-Haltestellen betrachtet werden.

#### **Hemmnis**

Als Hemmnis kann zum einen der mangelnde verkehrspolitische Wille und zum anderen die politische Zustimmung von Gemeinderat, Verwaltung und Parteien genannt werden. Eine Unterstützung von allen Seiten als auch einzelner Treiber (wie z.B. Einzelpersonen, Verbände, etc.) ist von besonderer Bedeutung.

#### Verbesserte Kopplung der öffentlichen Fahrradverleihsysteme (ÖFVS) und des ÖPNV der 4. Generation

Das öffentliche Fahrradverleihsystem (ÖFVS) sollte Teil des ÖPNV sein, das heißt die Kooperation zwischen ÖPNV und ÖFVS-Anbietern sollte gestärkt werden. Folgende Kooperationsmaßnahmen auf diesen Gebieten sind nach der Studie der TU Dresden durch (Ahrens, Aurich, Thomas Böhmer, & Pitrone, 2010) zu empfehlen:

- Tarifliche Integration in den ÖPNV. Das ÖFVS ist Teil bestehender Produkte im öffentlichen Verkehr;
- Verbesserte Angebote, wie Kombiprodukte und Angebotsbündelung;
- Gemeinsame Plattform mit den ÖPNV Diensten, Carsharing Anbietern, der DB und anderen Anbietern;
- Dichtes Netz von Fahrradverleihstationen alle 300m;
- Einheitliches Design der Stationen und Fahrräder für einen hohen Wiedererkennungswert;
- Nutzervorteile für den ÖPNV;
- Einfache Handhabung und Bezahlung auch für Nichtanwohner (Beispiel Anmeldung per Kreditkarte);

### **Wirtschaftlichkeit & Finanzierung**

Öffentliche Fahrradverleihsysteme sind oft nicht kostendeckend und müssen in der Regel zusätzlich finanziert werden. Oft werden jedoch externe Kosten wie CO<sub>2</sub>-Emissionen, Ruß oder Platzbedarf fossiler Verkehrsteilnehmer nicht quantifiziert, so dass ein Kostenvergleich nur schwer darstellbar ist. Dennoch sollte ein ÖFVS auf kurze Strecken ausgelegt werden. Ein dichtes Netz an Stationen führt dazu, dass die Verlegungskosten reduziert werden können, da Nutzer die nächstliegende Station schneller erreichen und nutzen können. Eine Finanzierung kann über Werbeeinnahmen an den Fahrrädern oder Stationen erfolgen, könnte jedoch auch als Hemmnis gesehen werden. Zudem sollte der ÖFVS als Teil des ÖPNV gesehen werden und deren Kostenbestandteile im ÖPNV integriert werden. Gekoppelte Jahreskarten könnten so die Finanzierung abdecken.

### **Umweltauswirkung**

Die Kopplung von ÖFVS und ÖPNV führt zu einer erhöhten Nutzerzahl beider Mobilitätsformen und reduziert den MIV in der Stadt und somit die CO<sub>2</sub>-Emissionen.

### **Hemmnis**

Die oft nicht gedeckten Kosten zum Aufbau und der Wartung können als Hemmnis für den weiteren flächendeckenden ÖFVS Ausbau wirken. Zudem fehlt es an Fahrradwegen, die die Fahrradnutzung insgesamt hemmt. Weiter

fehlt die politische Unterstützung, bestehende Parkplätze in ÖFVS-Stationen umzugestalten.

### 6.3 Motorisierter Individualverkehr (MIV)

*"Das Auto ist erfunden worden, um den Freiheitsspielraum des Menschen zu vergrößern, aber nicht, um den Menschen zum Wahnsinn zu treiben."*

*Enzo Ferrari (1898 – 1988), Gründer des Sport- und Rennwagenhersteller Ferrari*

#### Status Quo

Im Vergleich zu anderen europäischen Städten belegt der MIV-Anteil am Modal Split in Frankfurt einen Mittelfeldplatz. Unter Mitberücksichtigung des Pendlerverkehrs (1 Mio. Fahrten am Tag) erhöht sich der Anteil des MIV auf rund 50 Prozent (Abbildung 125).

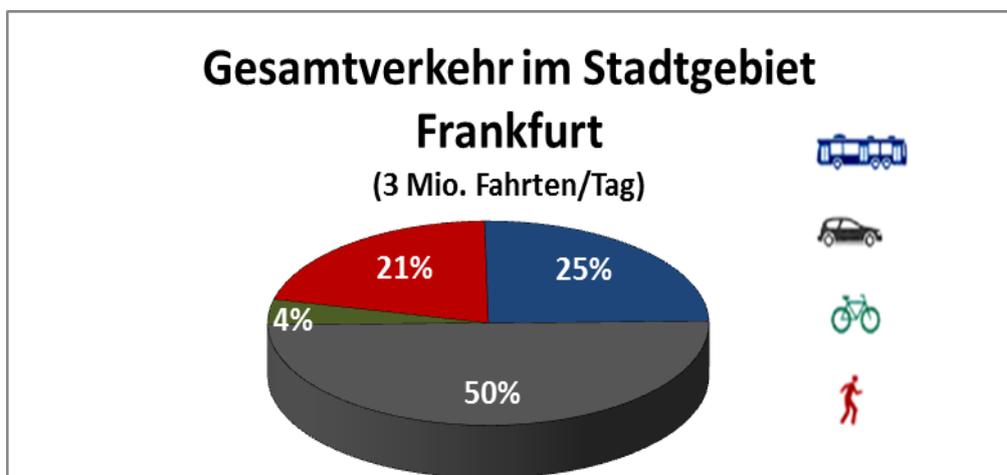


Abbildung 125: Modal Split Lokal-, Quell und Zielverkehr in Frankfurt, eigene Darstellung (IBP) nach (Institut für Energie und Umweltforschung, 2010).

Aus diesem Grund müssen neben Maßnahmen, die das Mobilitätsverhalten der Städter beeinflussen, insbesondere Lösungskonzepte für den Pendlerverkehr in Frankfurt gefunden werden. Im Folgenden werden auf unterschiedliche technische Möglichkeiten zur Reduzierung des innerstädtischen Verkehrs und des Pendlerverkehrs eingegangen.

#### 6.3.1 Vermehrter Einsatz von Elektro-Pkw

#### Status Quo

Von 2009 bis 2011 förderte das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) unter anderem das Rhein-Main-Gebiet im Förderschwerpunkt „Elektromobilität in Modellregionen“ mit 115 Mio. Euro. Dadurch wurde im Rahmen des Projektes ZEBRA (Zero Emission Best Practice Rhein Main Area) Frankfurt, Mühlheim und Offenbach mittels der ECOStyle-Linie 103 verbunden. Entlang der Buslinie wurde aufgezeigt, inwiefern erneuerbare Energien auch im Bereich Verkehr genutzt werden können. Weiter

wurde am Frankfurter Flughafen und im städtischen Lieferverkehr der Einsatz batteriebetriebener Fahrzeuge hinsichtlich ihrer Alltagstauglichkeit getestet.

In den westlichen Stadtteilen gibt es das Projekt "Leben im Westen" zur Förderung der Elektromobilität. Im Oktober 2013 starteten dort die ersten E-Mobility-Stationen mit dem Verleih von Elektro-Fahrzeugen (Auto und e-Transportfahrräder) an MieterInnen der Konversions-Grundstücksentwicklungsgesellschaft mbH (KEG), der Wohnbaugenossenschaft Frankfurt am Main (WBG) sowie alle Interessenten.

Darüber hinaus wurde schrittweise eine Ladeinfrastruktur für Elektromobilität unter anderem durch die ABGnova aufgebaut.

Mittels durchgeführter Mobilitätsanalysen wurden Maßnahmen für den zielgerichteten Ausbau für Elektromobilität in Frankfurt abgeleitet (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2011). Ferner wurden im Elektromobilitätskonzept „Elektromobilität im Jahr 2025 in Frankfurt am Main – Vision und Strategie“ verschiedene Förderschwerpunkte aufgezeigt. Seit 2011 sind durch den ADAC zertifizierte Umwelt-Taxis in Frankfurt im Einsatz. Damit nimmt Frankfurt neben München und Hamburg eine Vorreiterrolle in der elektrischen Personenbeförderung in Deutschland ein (Köller, 2011).

Schon vor drei Jahren galten erste Elektrofahrzeuge als marktreif. Verschiedene Autohersteller wie z.B.: Nissan (Leaf), BMW (BMW-i3) und VW (eUP) haben den Markt der Elektromobilität erkannt und bringen vermehrt E-Pkw auf den Markt. Die Argumente der nicht ausreichenden Reichweite und oft zu lang andauernden Aufladezeiten von Elektroautos sind in vielen Fällen kein K.O.-Kriterium mehr. Statistisch gesehen stehen Autos rund 23 von 24 Stunden und die durchschnittliche Fahrleistung beim Pendlerverkehr im Rhein-Main-Gebiet beträgt rund 42 km am Tag (Zumkeller, 2009). Vielmehr sind es die derzeit hohen Kosten der Batterie, die den Verkauf von Elektrofahrzeugen unter heutigen Bedingungen hemmen.

Die nachfolgende Berechnung soll aufzeigen, für welche Entfernungen ein Elektroauto zu derzeitigen Preisen rentabel ist. Die durchschnittliche Fahrtlänge von Pendlern liegt in der Region Frankfurt Rhein-Main-Gebiet bei rund 42 km pro Tag und Person. Bei rund 220 Arbeitstagen werden jährlich rund 9.460 Kilometer zurückgelegt. Aus heutiger Sicht würde sich ein rein für Pendelzwecke angeschafftes Elektroauto erst nach knapp 19 Jahre gegenüber einem Benziner bzw. 29 Jahren gegenüber einem Diesel-Pkw amortisieren. Legt man die durchschnittliche Jahresfahrleistung im Jahr 2000 von 13.000 km zu Grunde, verkürzt sich die Amortisationszeit um acht Jahre. Unterstellt man der Elektromobilität einen Lernkurvenverlauf annähernd der Photovoltaikbranche wird sich die Grenzfahrleistung gegenüber Benzin- und Diesel-Pkw deutlich sinken. Laut einer Studie der Unternehmensberatung McKinsey werden im Zeitraum von 2022 bis 2030 die Kosten für Elektromobilität den Break-Even-Point (BEP) gegenüber Pkw mit Verbrennungsmotoren erreichen (Bäker, 2010).

Für Frankfurt ist lediglich der Ersatz von Otto- durch Elektromotoren nicht zielführend. Das vom Fraunhofer IBP verfolgte nachhaltige Mobilitätskonzept im Maßnahmenzenario sieht eine Gesamtreduzierung der Fahrzeuge in Frankfurt vor. Damit sollen Staus zur Rush-Hour entgegengewirkt und gleichzeitig die Sicherheit anderer Verkehrsteilnehmer wie Fahrradfahrer und Fußgänger erhöht werden.

## **Maßnahmen**

### Ladestationen in innerstädtischen Bereichen für Anwohner errichten

Nach der Erstellung der Kurzstudie „Elektromobilität im Jahr 2025 in Frankfurt am Main – Vision und Strategie“ des Kompetenzzentrums Wirtschaftsförderung Frankfurt GmbH und den durchgeführten Workshops mit Vertretern aus Wirtschaft und der Stadt, wurden erste Maßnahmen aufgegriffen und als Ziel bis zum 2025 festgehalten. Eine Maßnahme zur Verbreitung der E-Fahrzeuge ist die Förderung von Abstellplätzen zur Aufladung der Elektrofahrzeuge. Quartiersgaragen und Parkhäuser bieten hierfür eine sichere und in der Regel kostengünstige Möglichkeit E-Fahrzeuge aufzuladen.

Eine bevorzugte Vergabe dieser Abstellplätze an Besitzer von E-Fahrzeugen könnte zu einem gesteigerten Interesse der Anwohner an E-Fahrzeugen in den betroffenen Bereichen führen. Mit Unterstützung der Stadt könnten Parkhausbetriebe das Angebot des E-Fahrzeugstellplatzes mit integrierter Ladetechnik erhöhen. Weiter können im Rahmen des „Subventionierten Anwohnerparkens“ in der Altstadt und im erweiterten Innenstadtbereich Besitzer von E-Fahrzeugen bei der Vergabe entsprechender Abstellplätze bevorzugt werden (Wirtschaftsförderung Frankfurt GmbH - Kompetenzzentrum Logistik & Mobilität, 2013). Insbesondere Betreiber von Parkhäusern könnten den eigenproduzierten Strom aus der PV-Anlage an der Fassade oder dem Dach zum Aufladen der Fahrzeuge nutzen.

## **Wirtschaftlichkeit & Finanzierung**

Die Kosten für eine Schnellladestation am Straßenrand belaufen sich auf mehrere Zehntausend Euro. Einfache Wandgeräte sind wesentlich kostengünstiger und in Parkhäusern sicher und einfach zu installieren. Nach (Clausnitzer, Gabriel, & Buchmann, 2012) liegen die Kosten für Wandgeräte (Wallboxen) im Bereich 1.000 bis 2.500 €. Die Kosten der Stationen könnten Parkhausbetreiber tragen, da sie den eigenerzeugten Strom mit rund 10 bis 15 ct/kWh direkt verkaufen könnten. Lokale Energieversorger und Parkhausbetreiber könnten die Finanzierung der Aufladestationen übernehmen und zusätzliche Einnahmen generieren. Dies könnte auch das Image einzelner Parkhäuser verbessern, da sie mit dem Slogan: „100% Solarenergie für ihr E-Fahrzeug“ werben könnten.

## **Umweltauswirkung**

Die Umweltauswirkung ist abhängig vom nationalen und lokalen Strommix in Frankfurt und/oder vom Betreiber der Anlagen. Bei eigenstromerzeugenden

Anlagen auf den Dächern der Parkhäuser würden E-Fahrzeuge in der Jahresbilanz größtenteils mit Solarenergie fahren können.

### **Hemmnis**

Derzeit ist der Markt für E-Fahrzeuge noch sehr gering. Nach Einschätzung unterschiedlicher Studien (Bäker, 2010) kann davon ausgegangen werden, dass Elektrofahrzeuge zwischen 2020 und 2025 günstiger sein werden, als Fahrzeuge mit fossilen Verbrennern. Das Haupthemmnis ist die Ungewissheit, wie und wann sich ein Markt entwickelt. Fehlende Informationen bezüglich Kosten und möglicher Nutzen stellen für viele potentielle Betreiber ein weiteres Hemmnis dar, hier sind besonders die Kosten für die Installation zu nennen. Hier kann die Stadt mit einem Pilotprojekt „Solares Parkhaus“ helfen, erste Hemmnisse zu überwinden. Solar-Parkhäuser für Pendler an aufkommensstarken ÖPNV-Stationen im Umland würden sich hier besonders anbieten und auch Anreize für manche Pendler schaffen, sich ein E-Fahrzeug zuzulegen. Auch Solar-Carports an weniger aufkommensstarken ÖPNV Stationen bieten sich als Bindeglied zwischen E-Fahrzeug als MIV und ÖPNV an.

### Vergünstigungen für E-Pkws im öffentlichen Verkehr

Eine weitere Möglichkeit der Förderung ist das Angebot von vergünstigten Parkplätzen für Carsharing und Elektrofahrzeuge. Denkbar sind Parkplatzausweisungen ähnlich wie bei den Frauen- und Behindertenparkplätzen. Neben Instrumenten des Ordnungsrechts könnten speziell zugeschnittene Tarife für die Nutzung von E-Mobilität vom regionalen Energieversorger angeboten werden. Durch deutlich günstigere Strombezugspreise [€/kWh] wird die Nutzung von Elektro-Pkw für Pendler interessant. Die Kostensenkung in der Herstellung und Produktion sowie niedrigen Wartungskosten werden in den nächsten Jahren zu einer Reduzierung der minimal erforderlichen Kilometerleistung von Elektrofahrzeugen führen.

### **Best Practice**

#### *Kostenfreies Parken für Elektro-, Hybrid-Autos in Arnsberg*

In Arnsberg wurden im März 2013 kostenlose Parkplätze für Fahrzeuge mit einem CO<sub>2</sub>-Ausstoß unter 100 Gramm pro Kilometer zur Verfügung gestellt. Fahrzeughalter, deren Autos den Richtwert erreichen, können sich bei der Verkehrsbehörde der Stadt Arnsberg einen Parkausweis ausstellen lassen (Stadt Arnsberg, 2013).

#### *Elektromobilität in Norwegen*

In Norwegen war im Jahr 2012 der „Tesla Model S“ das Auto mit den meisten Neuzulassungen im Zeitraum von Anfang August bis Mitte September. Damit verdrängte es den „VW Golf“ von Volkswagen auf Platz zwei. Auf den dritten Platz der meist verkauften Autos landete das Elektroauto Nissan Leaf. Der Erfolg und die Akzeptanz der Elektromobilität in Norwegen sind auf ein umfangreiches Förderprogramm zum Ausbau von elektrischen Fahrzeugen zurückzuführen. Neben Maßnahmen wie kostenloses Parken, die Nutzung

von Busspuren und kostenloses Aufladen werden konventionelle Pkw beim Kauf mit einer „Supertax“ bedacht. Dadurch werden die Mehrkosten eines elektrischen Fahrzeuges gegenüber vergleichbarer konventioneller Pkw reduziert (Reutes, 2013).

#### Anpassung der Pendlerpauschale auf Bundesebene

Ein weiterer Ansatzpunkt ist die Anpassung der Pendlerpauschale auf Bundesebene. Diese ist so zu konzipieren, dass in erster Linie öffentliche Verkehrsmittel genutzt werden und zweitens Nutzern von Elektro-Pkw und Elektrorollern ein monetärer Vorteil gegenüber konventionellen Fahrzeugen entsteht. Dabei bleibt zu berücksichtigen, dass eine Pendlerpauschale nicht in der Höhe liegen darf, dass Anreize zur Umsiedlung auf Randbezirke bzw. ländliche Gebiete entstehen. Im Vordergrund steht die Reduzierung der parkenden und fahrenden Fahrzeuge in der Stadt. Nationale Maßnahmen wie die direkte bzw. indirekte Subvention (vgl. Supertax Norwegen) von Elektrofahrzeugen sind nicht Gegenstand des Generalkonzepts, sondern müssen auf nationaler Ebene diskutiert werden.

#### Marketingkonzept „FrankfurtEmobil“ erstellen

Als weitere Maßnahme der Studie: „Elektromobilität im Jahr 2025 in Frankfurt am Main – Vision und Strategie“ wurde angeregt, die bisherigen und künftigen Aktivitäten zur Elektromobilität in Frankfurt in einem entsprechenden Marketingkonzept zu vermarkten (Wirtschaftsförderung Frankfurt GmbH - Kompetenzzentrum Logistik & Mobilität , 2013).

Neue Projekte sollten mit den bisherigen und künftigen Partnern in einem Konzept „FrankfurtEmobil“ gemeinsam dargestellt werden. Angestrebt werden sollte ein jährlich erscheinendes Marketingkonzept mit den schon laufenden und künftigen Aktivitäten zur Elektromobilität als auch zur nachhaltigen Mobilität. Dieses Konzept könnte somit organisch wachsen und in einem Zeitstrahl die erreichten Ziele festhalten. Weiter könnten in diesem Konzept interessante und hilfreiche Hintergrundinformationen festgehalten werden. Beispielsweise wären die Stillstandzeiten der Pkw-Nutzung als auch die durchschnittliche Weglänge interessante Informationen. Diese wiederum beeinflussen auch positiv die Kaufbereitschaft und helfen die Vorbehalte gegenüber E-Fahrzeugen zu reduzieren. Neben einer Internetseite rund um das Thema wären Broschüren in den einzelnen Autohäusern auszulegen. Auch eine mobile APP für Smartphones sollte einfach darstellen, wo frei zugängliche Elektrostationen im Stadtgebiet zu finden sind. Weiter können auch über diese APP die neuesten Projekte und Informationen zum Verkehr in Frankfurt dargestellt werden.

#### **Wirtschaftlichkeit & Finanzierung**

Die Wirtschaftlichkeit eines Marketingkonzepts ist schwer zu bemessen, jedoch von großem Nutzen, um die Frankfurter Bevölkerung zum Thema Elektromobilität zu informieren und zu sensibilisieren. Die Finanzierung könnte durch die unterschiedlichen Partner teilfinanziert werden. Lokale Energieversorger, Carsharinganbieter, E-Fahrzeughersteller, Logistikunternehmen etc.

sollten eine gemeinsame Plattform finden. Die Kosten einer gemeinsamen Webseite und Marketingkampagne können dadurch wesentlich reduziert werden. Außerdem werden Informationen weniger gestreut und Nutzer fühlen sich durch die Vielzahl unterschiedlicher Kampagnen und Webseiten weniger überfordert.

### **Umweltauswirkung**

Schwierig zu bemessen. Es gilt jedoch die Elektromobilität als auch eine nachhaltige Mobilität zu fördern.

### **Hemmnis**

In der Regel startet jedes Unternehmen seine eigene Marketingkampagne. Das Ziel ist es, alle Akteure an einem Tisch zu bekommen und eine gemeinsame, über die Jahre hinweg laufende, Kampagne zu starten und die Bevölkerung zu informieren. Die Kommunikation zwischen den einzelnen Partnern gilt es zu fördern und regelmäßige Treffen, wie beispielsweise die des Klimaschutzbeirats des Energiereferates, zu etablieren. Ein weiterer Beirat: „Nachhaltige Elektromobilität Frankfurt“ könnte federführend alle Partner zusammenbringen und das Marketingkonzept „FrankfurtEmobil“ koordinieren.

### Städtische Vorgaben für Investoren im Bereich Einfamilienhaus / Mehrfamilienhaus

Nach (Wirtschaftsförderung Frankfurt GmbH - Kompetenzzentrum Logistik & Mobilität, 2013) sollten auch bei künftigen Neubau- oder Sanierungsvorhaben von Einfamilien-/Mehrfamilienhäusern Aufladestationen von E-Fahrzeugen und Pedelecs Berücksichtigung finden. Daher wird die Stadt Frankfurt von ihren künftigen Investoren verstärkt die Berücksichtigung von Pedelec-Ladepunkten und Parkplätzen mit Ladeinfrastruktur für E-Fahrzeuge einfordern, um die Nutzung von E-Fahrzeugen durch Privatpersonen zu fördern. In diesem Zusammenhang muss geprüft werden, inwieweit Investoren verstärkt dazu verpflichtet werden können, entsprechende Ladeinfrastruktur oder Carsharingparkplätze von Anfang an in ihren Planungen zu berücksichtigen. Zudem könnte die Stadt als Vorbild voran gehen und ihre eigenen Fuhrpark auf elektrisch angetriebene Fahrzeuge umstellen.

### **Wirtschaftlichkeit & Finanzierung**

Die Kosten einer Wandstation liegen im Bereich von 1.000 bis 2.500 € (Clausnitzer, Gabriel, & Buchmann, 2012) und führen somit im Neubausektor zu keinen wesentlichen Mehrkosten. Die Finanzierung liegt bei den Wohnungsgesellschaften bzw. beim Hauseigentümer. Dieser zusätzliche Service ist in jeglicher Hinsicht ein Mehrwert der Immobilie.

### **Umweltauswirkung**

Die Installation von Ladestationen hat keine direkte Emissionsminderung zur Folge. Es fördert jedoch die Nutzung von emissionsärmeren Elektrofahrzeugen.

## Hemmnis

Bisher gibt es keine Verpflichtung von Ladestationen oder Carsharing-Parkplätzen für Neubauten. Eine Vorgabe ähnlich des Passivhausstandards in Frankfurt muss erst formuliert und geregelt werden. Sollten diese Prüfungen ein positives Ergebnis hervorbringen, gilt es entsprechende Regelungen als Vorgaben in einer Satzung zu verankern.

### 6.3.2 Carsharing (CS)

Ein Trend „weg vom Besitzen hin zum Nutzen“ konnte in den letzten Jahren besonders beim Carsharing beobachtet werden. Neben finanziellen Gründen wird besonders bei jüngeren Generationen das Auto nicht mehr so stark als Statussymbol angesehen. Nach einer Studie des Center Automotive Research (CAR) lag das durchschnittliche Alter von Neuwagenkäufer bei 52,5 Jahren (Dudenhöffer, 2013). Meist greifen Gruppen mit mittleren bis hohen Einkommen und hohem Bildungsabschluss, die in städtischem Gebiet leben und zur Gruppe der ÖPNV-Nutzer gehören, auf das Angebot von Carsharing zurück. Neben den Privatnutzern sind es insbesondere Unternehmen, die Carsharing zum Ausgleich von Nachfragespitzen in ihren eigenen Fahrzeugpools nutzen. Für Pendler, die den gesamten Arbeitsweg mit dem Pkw zurücklegen stellt CS keine sinnvolle Alternative dar. Vielmehr bieten sich hierfür Mitfahrgelegenheiten oder Fahrgemeinschaften an. CS wird meist für unregelmäßige Fahrten und Transporte genutzt. Grundsätzlich muss bei CS zwischen stationären und free-floating Flotten unterschieden werden. Während stationäre Flotten fixe Start- und Endorte haben, können beim free-floating die Fahrzeuge variabel in öffentlichen Parkräumen abgestellt werden.

Die anfallenden Parkgebühren werden vom CS-Betreiberunternehmen an die Stadt abgeführt. Während den stationären Flotten ein nachhaltiger Beitrag zum Klimaschutz bestätigt wird, sind nach heutigem Stand noch keine nachhaltigen Effekte bei free-floating Flotten zu erkennen. Aus diesem Grund muss das stationäre Angebot soweit verdichtet werden, dass die Entfernungen für Kunden keine Barriere darstellen. Weiter ist darauf zu achten, dass eine Erhöhung des CS-Anteils nicht zu Lasten des öffentlichen Verkehrs führt.

Das Beratungsunternehmen Frost & Sullivan schätzt, dass Potential an CS-Nutzern bis 2020 europaweit auf 14 Mio. Kunden und prognostiziert den CS-Anbietern einen Umsatz in Höhe von sieben Milliarden Euro (Schlesiger, 2012). In Abbildung 126 wird das Wachstum der CS-Flotte und – Fahrberechtigter von 1999 bis 2014 in Deutschland dargestellt. Insbesondere in den Jahren 2011, 2012 und 2013 fand ein enorm hoher Zuwachs an CS-Nutzern statt. Allein im Jahr 2013 waren es über 300.000 Neukunden, sodass derzeit rund 750.000 CS-Nutzer in Deutschland registriert sind.

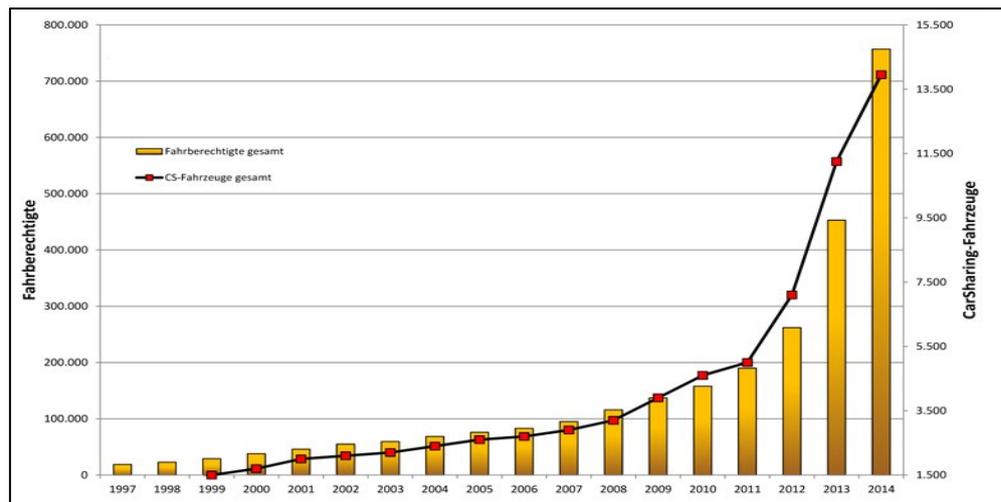


Abbildung 126: Wachstumsraten , (Bundesverband Carsharing, 2014).

In Frankfurt haben sich mehrere stationäre Anbieter etabliert. Neben Flinkster, dem Angebot der Deutschen Bahn gibt es mit „book-n-drive“, „stadtmobil“ und seit 2013 „CiteeCar“ drei weitere Anbieter. Insgesamt können an über 300 Stationen CS-Fahrzeuge genutzt werden. Book-n-drive arbeitet mit der Deutschen Bahn (auch Flinkster), dem Rhein Main Verkehrsverbund (RMV) und der lokalen Nahverkehrsgesellschaft traffiQ zusammen. Ähnlich wie book-n-drive steht auch Stadtmobil in enger Zusammenarbeit mit dem RMV, der Verkehrsgesellschaft Frankfurt (VGF) und traffiQ.

Die Zusammenarbeit zwischen ÖPNV und Carsharing Anbietern zielt auf eine bessere Kundenbindung ab.

Beispielsweise werden Sonderkonditionen für Carsharing mit dem Kauf einer RMV Jahreskarte attraktiver gestaltet. Trotz bzw. aufgrund des anhaltenden Trends hin zu der Nutzung von Carsharing in Frankfurt sollte das Angebot an Carsharing Stellplätzen innerstädtisch erhöht werden. In Frankfurt werden lediglich 0,63 (Oktober 2013) Carsharing Fahrzeuge je 1.000 Einwohner angeboten. In Karlsruhe (bundesweit die höchste Quote) stehen im Vergleich pro 1.000 Einwohner rund 1,63 Fahrzeuge zur Verfügung (Wirtschaftswoche, 2013).

Die stetige Steigerung des Carsharing Anteils geht mit der Substitution von Fahrten mit dem Privat-Pkw einher. Studien zufolge können derzeit sechs bis acht Privatautos durch ein Carsharing-Fahrzeug ersetzt werden. Damit hat Carsharing einen starken Einfluss auf die innerstädtische Verkehrsdichte (Sydlik, 2012). Demnach wurden 2013 grob 3.400 Privat-Pkw durch 432 Carsharing Fahrzeuge ersetzt. Damit ist der Ausbau des Carsharing eine zentrale Säule für den Aufbau einer nachhaltigen Mobilität in Frankfurt. In Frankfurt selbst testet derzeit die Stadtverwaltung in einem einjährigen Pilotprojekt die Nutzung von CS-Fahrzeugen in der Stadtverwaltung. Durch die gewonnen Erfahrungen soll zukünftig das Fuhrparkmanagement effizienter gestaltet werden. Dabei stehen neben der Steigerung der der Wirtschaftlichkeit die Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes im Vordergrund (Nick, 2014).

Auch wurde seit Sommer 2014 in einer Quartiersgarage im Nordend ein E-Carsharing-Auto über das vom Bundeswirtschaftsministerium geförderte Projekt "Leben im Westen" in Kooperation mit dem Carsharing-Unternehmen "book-n-drive" angeboten.

## **Maßnahmen**

### Ordnungsrechtliche Änderungen zu Gunsten des Carsharing

Der Ausbau des Carsharing Anteils in Frankfurt steht und fällt mit ordnungsrechtlichen Eingriffen sowie Vorrechten für Carsharing-Fahrzeuge. Demnach kann durch die Berücksichtigung von Abstellplätzen speziell für Carsharing-Fahrzeuge im Bebauungsplan die Verkehrsstruktur an das Carsharing angepasst werden. Bei einem ausreichenden CS-Angebot im Quartier kann bei Neubauten die Pflicht zum Vorbehalt von Pkw-Stellplätzen entfallen und somit eine Aufwertung des Quartiers beispielsweise durch das Anlegen von Grünflächen vorangetrieben werden. Weiter ist die Verpachtung öffentlicher Flächen an Carsharing-Unternehmen denkbar. Damit entstünden für die Stadt neue Einnahmequellen bei gleichzeitiger Entlastung der Park- und Verkehrssituation.

Zur Erhöhung der CS-Nutzung bei Unternehmen und öffentlichen Einrichtungen müssen vom CS-Anbieter gezielte Angebote auf die einzelnen Gruppen zugeschnitten werden. Der Fokus sollte weiter zu einer Verzahnung der unterschiedlichen Verkehrsteilnehmer führen. Beispielsweise ist die Erweiterung und stärkere Verbreitung der RMV-Mobilitätskarte denkbar, die dem Besitzer eine kombinierte Nutzung von CS, ÖPNV und Leihfahrrad ermöglicht.

## **Wirtschaftlichkeit**

Der Kostenaufwand für die Berücksichtigung von Parkplätzen für Carsharing in Verwaltungs- und Planungsverfahren sowie die Umwandlung von öffentlichen Parkplätzen zu Carsharing Parkplätzen ist als minimal einzuschätzen. Meist entstehen der Stadt durch die Vermietung von Flächen und öffentlichen Parkplätzen an CS-Betreibern zusätzliche dauerhafte Einnahmen. Die Wirtschaftlichkeit aus der Sicht der Nutzer ist ab einer jährlichen Fahrleistung von kleiner 10.000 km schon heute gegenüber der Anschaffung eines eigenen Pkw gegeben (Barthel, 2012).

## **Umweltauswirkung**

Der Ausbau des Carsharing-Anteils hat positive Auswirkungen auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz von Frankfurt. Die Höhe der CO<sub>2</sub>-Einsparungen ist abhängig von der Akzeptanz bei den Bürgern und der Förderung von Carsharing seitens der Stadt. Die Substitution von derzeit vier bis sechs Pkw pro CS-Fahrzeug führt zu einer deutlichen Reduktion des innerstädtischen Verkehrsaufkommens. Folglich sinken die Schmutz-, Lärm-, und Feinstaubemissionen.

## **Best Practice**

## *Förderung von Carsharing in Freiburg und Bremen*

In Freiburg wird die Förderung von Carsharing durch Verwaltungs- und Planungsverfahren vorangetrieben. Bei größeren Wohnbauvorhaben werden Stellplätze für Carsharing ausgewiesen. Weiter werden durch die Stadt zusätzliche Stellplätze von öffentlichen Parkplätzen und Parkhäusern ausschließlich für CS-Nutzer umfunktioniert. Neben einem erweiterten Parkangebot für CS-Fahrzeuge wird CS in städtische Kampagnen für ein umweltbewusstes Mobilitätsverhalten mit einbezogen (Rau & Baron, 2013). Ein anderes Beispiel zeigt die Stadt Bremen. Dort werden im Rahmen des Aktionsplan „Carsharing“ abgestimmte CS-Nutzungskonzepte für Unternehmen und den öffentlichen Dienst angeboten.

### Vorrang Parkplätze in Wohnvierteln für Carsharing E-Fahrzeuge

Als weitere nicht-technische Maßnahme gilt es ebenfalls Carsharing-Abstellplätze für E-Fahrzeuge zu schaffen. Dadurch soll das E-Fahrzeug seine Alltagstauglichkeit bei unterschiedlichen Nutzergruppen (Fahrten zur Arbeit, Familienfahrten, Besorgungen) zeigen. Um die Fahrzeuge im ausreichenden Maße und in direkter Nachbarschaft zum jeweiligen Wohnort anbieten zu können, werden Abstellplätze mit entsprechender Infrastruktur in den Wohngebieten mit der Möglichkeit des direkten Zugriffs durch die Nutzer geschaffen. Um diese Form der Mobilität in Frankfurt anbieten zu können, muss ein entsprechender Dienstleister im Bereich Carsharing gefunden werden. Hinderlich hierbei ist allerdings, dass Carsharing auf EV-Basis bisher nicht wirtschaftlich darstellbar ist, da der Anschaffungspreis für die Fahrzeuge deutlich höher ist und längere Standzeiten aufgrund der Wiederaufladung benötigt werden (Wirtschaftsförderung Frankfurt GmbH - Kompetenzzentrum Logistik & Mobilität, 2013). Als erster Schritt wird empfohlen, eine verstärkte Kooperation „Wohnungswirtschaft und Elektromobilität“ zwischen den Wohnungsgesellschaften und den lokalen Energieversorgern zu schaffen.

### **Wirtschaftlichkeit & Finanzierung**

Als Beispiel kann das Angebot von Car2Go als Carsharing Anbieter genannt werden, dieser setzt vermehrt Elektro-Smarts in seiner Flotte ein. Carsharing Anbieter könnten auch direkt private Parkplätze von Anwohnern mieten, hier wären ebenfalls Tiefgaragen in Wohnvierteln eine sichere und kostengünstigere Möglichkeit, Aufladestationen zu installieren. Ebenfalls steht hier die Wohnungswirtschaft als Investor und Betreiber in Zusammenarbeit mit den lokalen Energieversorgern im Vordergrund.

### **Umweltauswirkung**

Da insgesamt die Verkehrsdichte in Frankfurt reduziert werden soll, sind Carsharing E-Fahrzeuge von besonderer Bedeutung, um die städtischen Emissionen zu reduzieren. Somit reduzieren diese die Emissionen in Abhängigkeit der Anzahl der ersetzten Fahrzeuge um das vier bis sechs fache gegenüber normalen E-Fahrzeugen in privater Nutzung.

### **Hemmnis**

Erste E-Fahrzeuge sind bei den etablierten Carsharing-Anbietern zu finden. Für kurze Stadtstrecken und in Kopplung mit intelligenten Anwendungen für Smartphones, z.B. die Darstellung der verfügbaren Reichweite einzelner Fahrzeuge, bieten E-Fahrzeuge den gleichen Komfort wie fossile Carsharing-Fahrzeuge. Durch eine größere Auswahl von E-Fahrzeugen der Carsharinganbieter werden Kunden auch eher an E-Fahrzeuge herangeführt und die Skepsis gegenüber E-Fahrzeugen überwunden.

#### 6.4 Öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV)

**„Einst war die Lokomotive für den Menschen ein Ungeheuer aus Stahl, doch was ist sie heute anderes als ein bescheidener Freund, der jeden Abend um sechs vorbeikommt?“**

*Antoine de Saint-Exupéry (1900 - 1944), französischer Schriftsteller und Pilot*

Im Rahmen ihres Energiekonzepts ist die Bundesregierung bestrebt, den Ausbau des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) zu fördern. Durch eine erhöhte Nutzung der öffentlichen Verkehrsmittel können nicht nur CO<sub>2</sub>-Emissionen, sondern auch Stickoxid-, Feinstaub- sowie die Lärmbelastungen reduziert werden. Im Jahr 2010 lag der Anteil der ÖPNV in ganz Deutschland bei rund acht Prozent (Bertocchi, 2009). In urbanen Ballungsgebieten wie Städte mit Einwohnerzahlen größer 500.000 liegt dieser deutlich höher. In Frankfurt, München und Berlin werden ÖPNV Anteile von 26 bis 29 Prozent erreicht. Ein Vorreiter des ÖPNV ist die österreichische Hauptstadt Wien. In Wien ist der Anteil des ÖPNV mit 35 Prozent am höchsten und liegt somit rund acht Prozentpunkte über dem bundesweiten Durchschnitt der Städte mit einer Einwohnerzahl größer 500.000 (Siemens, 2013).. Durch den sukzessiven Ausbau des Linienverkehrs sollen bis 2050 der Anteil des ÖPNV am Modal Split über das Niveau von Wien auf ca. 35 Prozent angehoben werden.

##### 6.4.1 Elektro- / Hybridbusse, Schnellbusse

###### **Status Quo**

Im Jahr 2010 wurden zu Spitzenzeiten im innerstädtischen Verkehr rund 292 Busse und im Quell- und Zielverkehr 17 Busse des öffentlichen Nahverkehrs in Frankfurt eingesetzt (Stadt Frankfurt, 2011). Insgesamt legten diese im Jahr 2010 rund 17,6 Mio. Nutzkilometer bzw. 210 Mio. Personenkilometer zurück. Der Treibstoffverbrauch lag bei rund 6,95 Mio. Liter Diesel. Dies verursachte CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von rund 21.000 Tonnen. Seit 2010 werden zwei Hybrid Busse zu Demonstrationszwecke im Frankfurter Norden eingesetzt (VGF, 2010).

###### **Maßnahmen**

###### Umstellung der Busflotte auf elektrische Antriebe + Schnellbuslinien

Im Zuge der Elektromobilitätsstrategie der Bundesregierung ist wie bei den Pkw eine Umstellung der Busflotte auf elektrische Antriebe geplant. Im Vergleich zu den Elektro-Pkw können Elektrobusse zum einen über Wechselak-

kusysteme verfügen oder direkt über Induktionsspulen an den Haltestellen aufgeladen werden (Springer, 2013). Bei einer durchschnittlichen Weglängen von rund 250 km pro Tag (Durchschnittsgeschwindigkeit in der Stadt von rund 30 km/h, acht Stunden Fahrzeit) ist eine Batteriekapazität mit rund 250 bis 300 km Reichweite ausreichend. Elektrobusse mit Reichweiten von 200 km sind heute schon am Markt verfügbar (Stadtwerke Bonn, 2013).

Weiter kann eine Entlastung des Stadtverkehrs zu Hauptverkehrszeiten auch über die Einführung von sogenannten Schnellbussen realisiert werden. Schnellbusse werden auf viel befahrenen Strecken beispielsweise zwischen Park & Ride Parkplätzen und zentralen Stationen in der Innenstadt eingesetzt. Im Vergleich zu den Stadt- und Regionalbussen fährt der Schnellbus mit einer höheren Durchschnittsgeschwindigkeit und hält nur an wenigen strategischen Punkten. Analog zu den Stadtbussen können auch bei Schnellbussen elektrische und hybride Antriebstechniken zum Einsatz kommen. Insbesondere auf Linien, wo sich Tram und U-Bahn Verbindungen als unwirtschaftlich erweisen, sollte der Einsatz von Schnellbussen mit hoher Kapazität geprüft werden. In Abbildung 127 werden zwei mögliche Schnellbusse abgebildet.



Abbildung 127: AutoTram® und AutoTram® Extra Grand, (Fraunhofer IVI).

Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung des ÖPNV-Anteils liegt in der Erhöhung des Bestandes an Jobtickets. Dafür müssen der ÖPNV in noch engere Kooperationen mit den Unternehmen in Frankfurt treten. Die Einführung von Jobtickets seitens weiterer Unternehmen für deren Angestellte könnte die Nutzung des ÖPNV deutlich steigern. Somit müssen bei erhöhter Nachfrage weitere Busse eingesetzt bzw. die Taktung der Busse verkürzt werden. Ein guter Service (Taktung, Haltstellennetz, Sauberkeit etc.) sowie eine gut ausgebaute Infrastruktur sind zentrale Punkte für die Verlagerung des motorisierten Individualverkehrs auf öffentliche Verkehrsmittel.

### **Wirtschaftlichkeit**

Die Investitionskosten eines Elektrobusse liegen bei rund 300.000 bis 400.000 Euro. Im Vergleich zu konventionellen Dieselnissen liegen die Mehrkosten eines Elektrobusse derzeit bei rund 100.000 bis 150.000 Euro (Sorge, 2013). Die betriebsgebundenen Kosten von Elektrobusen sind rund 35

Ct/kWh geringer. Bei einer Laufleistung von durchschnittlich 65.000 km pro Jahr amortisiert sich die Investition gegenüber einem Diesibus innerhalb von fünf bis sechs Jahren. Aufgrund der erwartenden Kostensenkung insbesondere bei Lithium-Akkus und dem wesentlich geringeren Wartungskosten von Elektromotoren wird die Attraktivität von Elektrobussen bis 2020 stark zunehmen (Kern, 2012). Bei einem möglichen Technologiewechsel sind Investitionen in die ortsfeste Infrastruktur (Werkstätten, Unterwegs-Ladetechnik oder Akku-Tausch) zu tätigen. Das damit verbundene Investitionsrisiko ist von den zuständigen Verkehrsgesellschaften abzuwägen.

### **Umweltauswirkung**

Im Jahr 2010 lagen die jährlich durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Diesebusses bei rund 72,6 Tonnen CO<sub>2</sub>. Der Betrieb eines Elektrobusses verursacht bei dem heutigen spezifischen Emissionswert von Strom (0,456 kgCO<sub>2</sub>/kWh), CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 33,1 Tonnen. Damit können allein durch den Austausch schon heute rund 58 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart werden. Durch den Ausbau der erneuerbaren Energien bis 2050 sinken die spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen im Strommix auf 0,037 kgCO<sub>2</sub>/kWh (Nitsch, 2012). Die sich daraus ergebende Einsparung eines Elektro- gegenüber Diesebusses liegt somit bei über 97 Prozent.

### **Best Practice**

#### *Einsatz von Elektrobussen in Genf und Wien*

Derzeit laufen in vielen europäischen Städten Versuche Elektrobusse in die Fahrzeugflotte zu integrieren. In Genf wird seit Mai 2013 der erste rein elektrisch betriebene Gelenkbus, der ohne Oberleitung auskommt, getestet. Der Bus lädt sich an den planmäßigen Haltestellen innerhalb von rund 15 Sekunden des Ein- und Aussteigens der Fahrgäste auf. Die Ladung des Busses erfolgt über einen beweglichen Arm, der beim Halt mit einem in der Bushaltestelle integrierten Kontakt verbunden wird, siehe Abbildung 128.



Abbildung 128: Fahrleitungsloser Elektrobus mit ultra-schnellen Ladestationen, (ABB, 2013).

Sowohl in Genf als auch in Wien wurde eine elektrische Buslinie im innerstädtischen Raum eröffnet. Die Stadt Wien hat sich zum Ziel gesetzt durch den Einsatz zwölf weiterer Elektrobusse den kompletten Innenstadtraum elektrisch zu erschließen. An den Endhaltstellen werden die Akkus der Busse in rund 15 Minuten geladen; über die Nacht erfolgt die Aufladung der Akkus zu 100 Prozent zu günstigeren Stromtarifen (Kern, 2012).

#### 6.4.2 U-, S-, Regional- und Straßenbahnen

##### **Status Quo**

Im Jahr 2010 wurden zu Spitzenzeiten rund 199 U-Bahnen, 191 S-Bahnen, 34 Regionalbahnen und 81 Straßenbahnen in Frankfurt eingesetzt. Der statistischen Erhebung des Instituts für Energie und Umweltforschung nach, werden die Kilometerleistungen der U- und Straßenbahn dem Binnenverkehr zugeordnet; Kilometerleistungen der Regional- und S-Bahn zählen als Quell- und Zielverkehr. Im Binnenverkehr betrug die Personenkilometerleistung rund 657 Mio. Personenkilometer (Pkm). Davon entfielen rund 70 Prozent (463 Mio. Pkm) auf die U-Bahn, die restlichen 30 Prozent (194 Mio. Pkm.) auf die Straßenbahn. Bei annähernd gleich hohen Nutzkilometerleistungen (7,1 Mio. Nkm U-Bahn; 6,5 Mio. Nkm Straßenbahn) ist die Auslastung der U-Bahn (Verhältnis aus Pkm/Nkm) deutlich höher (Stadt Frankfurt, 2011).

Bei den S- und Regionalbahnen wurden 2010 rund 1.220 Mio. Pkm gezählt (Institut für Energie und Umweltforschung, 2010). Im statistischen Jahrbuch der Stadt Frankfurt wurden lediglich die Nutzkilometerleistung für S- und Regionalbahn erhoben. Demnach betrug die Nutzkilometerleistung der S-Bahn ca. 5,5 Mio. Nkm; der Regionalbahn 2,7 Mio. km. Eine Abschätzung über die Verteilung der 1.220 Mio. Personenkilometer auf S- und Regionalbahn wurde auf Datengrundlage des RMVs (Rhein-Main-Verkehrsbund, 2014) vorgenommen. Der Anteil der Personenkilometerleistung der Regionalbahn liegt auf vergleichbar hohem Niveau mit der U-Bahn. Die Personenkilometerleistung der S-Bahn beträgt ca. 733 Mio. Pkm.

Der erforderliche Strombedarf für alle Bahntypen lag 2010 bei rund 219 GWh. Unter Berücksichtigung der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Strommix von 2010 ergaben sich Gesamtemissionen in Höhe von rund 137.000 Tonnen (Institut für Energie und Umweltforschung, 2010).

#### 6.5 Lastkraftwagen / Citylogistik

Laut dem statistischen Jahrbuch der Stadt Frankfurt waren 2012 rund 24.000 Lastkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge in Frankfurt unterwegs (Stadt Frankfurt, 2011). Der Endenergieeinsatz der beiden Fahrzeuggruppen liegt bei 1.174 GWh. Dabei entfallen rund 16,6 Prozent auf die leichten Nutzfahrzeuge (LNF). Die übrigen 83,4 Prozent werden durch Lastkraftwagen mit einem Gewicht größer 3,5 Tonnen nachgefragt. Den Großteil des Endenergieeinsatzes fällt im Quell-/Zielverkehr sowie dem Durchgangsverkehr an. Lediglich

zehn Prozent der Endenergie entfallen auf dem Binnenverkehr. Wie in Kapitel 3.5 erwähnt verteilen sich die Emissionen analog zu dem Endenergieeinsatz zwischen LNF und Lkw. (Mobilitätsreferat der Stadt Frankfurt am Main, 2013).

### **Maßnahme**

#### City Logistik-Konzept auf E-Fahrzeuge erstellen und in die Umsetzung führen

Nach (Wirtschaftsförderung Frankfurt GmbH - Kompetenzzentrum Logistik & Mobilität , 2013) sollen neben dem von UPS gestarteten Projekt zur City Logistik weitere Paket-Dienstleister für den Einsatz von Elektrozustellfahrzeugen gewonnen werden. Aus der Sammlung der Erfahrungswerte im Rahmen des Projektes soll ein City Logistik-Konzept auf der Basis von Elektrofahrzeugen und Pedelecs/Lastenfahrrädern erstellt werden, um mittelfristig Zustellfahrzeuge mit Verbrennungsmotor durch Elektrozustellfahrzeuge im Stadtgebiet zu ersetzen und somit eine weitere Reduzierung von Abgasen zu erreichen. Hierzu soll ein Arbeitskreis mit allen Paketzustelldiensten initiiert werden, um die Machbarkeit und die dazu notwendige Bereitschaft der Dienstleister zu eruieren.

Neben dem Einsatz von Zustellfahrzeugen wird die Stadt Frankfurt in Bereichen mit hoher Kundendichte (z.B. Fußgängerzonen) gemeinsam mit Paket- und Postdienstleistern den Einsatz von Elektrolastenfahrrädern forcieren. Ziel ist es, die Leistungsfähigkeit und die Wirtschaftlichkeit dieses Transportmediums im Rahmen der City Logistik zu testen und zu bewerten. Der Vorteil dieser Lastenfahrräder liegt insbesondere in der Größe und der Schadstoffneutralität, die entscheidend für die Bewertung potentieller Nutzungskonflikte in Fußgängerzonen sind. Durch die Umsetzung bietet sich für Frankfurt am Main die Möglichkeit frühzeitig ein nachhaltiges City Logistik-Konzept zu projektieren und in die Umsetzung zu bringen.

### **Wirtschaftlichkeit & Finanzierung**

Die Konzepterstellung kann mehrere 10.000 € kosten. Die Bedingung für die Wirtschaftlichkeit von Elektro-Fahrzeugen im Transport- und Lieferverkehr ist bei den meisten Fahrzeugen mit ausreichender Kilometerleistung gegeben. Das jährliche Einsparpotential liegt in Abhängigkeit vom Fahrzeugtyp, der Kilometerleistung und der Treibstoffpreisentwicklung zwischen 1.000 und 8.000 Euro im Jahr (Wallner Energietechnik GmbH & Vobiscon). Demnach können sich bei Serienreife elektrische Kleintransporter, wie beispielsweise von Paketdiensten, innerhalb von zwei Jahren gegenüber konventioneller Fahrzeugentypen amortisieren.

### **Umweltauswirkung**

Neben reduzierten CO<sub>2</sub>-Emissionen in Abhängigkeit des Strommix können weitere Schadstoffe, wie z.B. Rußpartikel, durch die Nutzung von Elektrozustellfahrzeugen reduziert werden. Insbesondere in der Innenstadt bieten sich dafür Lastenfahrräder an. Zu berücksichtigen ist, dass Fahrradwege genügend breit ausgebaut werden.

### **Hemmnis**

Die Nutzung von Elektrozustellfahrzeugen kommt zunehmend aus der Projekt- und Demonstrationsphase heraus und etabliert sich im Markt. Zu den Lastenfahrrädern fehlt es oft an Informationen und der Einsatz scheitert ebenso oft an der eigenen Bequemlichkeit um das Auto stehen zu lassen. Weiter sind zu schmale Fahrradwege und ungenügend breite Abstellplätze ein Hemmnis zur Nutzung von Lastenfahrrädern.

### **Best Practice**

#### *E-Lkw in der Schweiz*

Die Schweizer Firma E-Force One hat einen 18-Tonnen-Elektro-Lastwagen entwickelt, der derzeit in Raum Zürich für die tägliche Belieferung von Kunden und Verkaufsstellen eingesetzt wird. Bei rund acht Tonnen Leergewicht verbleiben zehn Tonnen für Aufbau und Nutzlast. Die vollgeladene Batterie hat eine Reichweite von bis zu 300 km. Der Stromverbrauch auf 100 km beträgt rund 100 kWh auf der Autobahn und ca. 80 kWh im Stadt- und Überlandverkehr. Dies entspricht einem Dieselverbrauch von acht Litern auf 100 km. Die Batterieladezeit beträgt acht Stunden. Die doppelt so hohen Anschaffungskosten des E-Lkw werden durch die deutlich niedrigeren Betriebskosten (1/5 der Betriebskosten eines konventionellen Lkw) kompensiert und stellen nach den Betreibern ein „interessantes“ Kostenniveau dar (Wagner, 2013).

### **Best Practice**

#### *Zulieferungen bei der deutschen Post*

In Bonn und Umland soll bis 2016 die Zustellung von Paketen durch die Deutsche Post mittels 141 Elektrofahrzeuge erfolgen. Dadurch können pro Jahr rund 500 Tonnen CO<sub>2</sub> eingespart werden. In Zusammenarbeit mit der Street-Scooter GmbH und der RWTH Aachen wurde ein Fahrzeug für die Brief- und Paketzustellung entwickelt, das speziell auf die Bedürfnisse der Deutschen Post DHL abzielt. Der E-Pkw verfügt über eine Reichweite bis zu 120 Kilometern (im Postbetrieb max. 80 km), die auf die Auslieferung von Briefen und Paketen in der Verbundzustellung abgestimmt ist (Deutsche Post DHL, 2013).

### **Best Practice**

#### *Lastfahrräder privat als Sharing-Konzept – Frankfurter Projekt „Leben im Westen“*

Das Projekt „Leben im Westen“ zielt auf die Schaffung eines nachhaltigen Lebensumfeldes ab. Seit Oktober 2013 können Mieter/Innen der Konversions-Grundstückentwicklungsgesellschaft mbH (KEG) und der Wohnbaugenossenschaft in Frankfurt (WBG) sowie Interessenten auf das Verleihsangebot von Elektro-Fahrzeugen zurückgreifen. Dabei stehen neben Elektro-Pkw sogenannte E-Bakfiets zur Verfügung. Ein E-Bakfiets ist ein elektrisches Fahrrad, welches für den Transport von kleinen bis großen Lasten konstruiert wurde. Durch den Einsatz von E-Bakfiets sollen innerstädtische Erledigungen wie beispielsweise Einkäufe von dem Auto auf das Fahrrad verlagert werden.

#### Modellprojekt Logistik-Sharing

Oft fahren vollbeladene Lkws und LNF nur in eine Richtung und leer oder halbgeladen zum Logistikcenter zurück. Als innovatives Modellprojekt für Frankfurt und seinen vielen Logistikunternehmen sollte erprobt werden, in wie weit bestehende Logistikfirmen in der Region zu einer Kooperation und zum „teilen“ der Transportkapazitäten der Lkws und LNFs bereit wären und wie eine gemeinsame Plattform entstehen könnte. Dabei gilt das Carsharing-Modell für Pkw als Vorbild (Kane). Die Maßnahme gilt als erstes Modell- und Forschungsprojekt und soll erste Anstöße geben wie leere oder halbbeladene Lkws besser genutzt werden können.

#### **Wirtschaftlichkeit & Finanzierung**

Eine bessere Nutzung der bestehenden Transportkapazitäten führt zu weiteren Kostensenkungen der beteiligten Logistikunternehmen welche eine Partnerschaft eingehen. Die Kosten für ein Modellprojekt könnten durch das Verkehrsministerium, dem Umweltministerium und den ansässigen Logistikunternehmen getragen werden.

#### **Umweltauswirkung**

Durch die Kooperation können nicht nur die Kosten für den Transport gesenkt werden. Im Vergleich zu einem Güterzug stößt ein Lkw das Dreifache an Treibhausgasemissionen pro bewegte Tonne auf einem Kilometer aus.

#### **Hemmnis**

Als Hemmnis kann das Festhalten an alten Transportstrukturen der einzelnen Logistikfirmen genannt werden. Auch die Sichtweise Konkurrenten in der Logistikbranche zu helfen ist ein Hindernis zur Verbreitung dieses Modells. Dabei reduzieren sich die Fahrtkosten für beide kooperierenden Unternehmen.

### 6.6 Marketing, Wettbewerbe & Werbekampagnen

Als Gesamtmaßnahme „Marketing“ gilt es unterschiedliche Marketingkampagnen zu etablieren. Folgend werden unterschiedliche Marketingmaßnahmen kurz vorgestellt:

#### **Maßnahme**

Wettbewerb zu städtischen Fahrradwegen mit den örtlichen Stadt-, Landschafts- und Architekturuniversitäten.



Abbildung 129: Velo City von Chris Hardwicke, Bildquellen: Velo City unter Creative Commons Lizenz.

Als Maßnahme gilt es, einen Wettbewerb zu gestalten. Stadtplanungsstudiengänge an den lokalen Universitäten und Fachhochschulen werden aufgefordert werden, kreative und innovative innerstädtische Fahrradwege zu gestalten. Als zwei Beispiele sind der Entwurf der Velo City Schnellfahrradweges (Abbildung 129) von Chris Hardwicke zu nennen sowie die in 2014 eröffnete Fahrradbrücke sind die Cykleslangen (Fahrradschlange) in Kopenhagen in Abbildung 130.

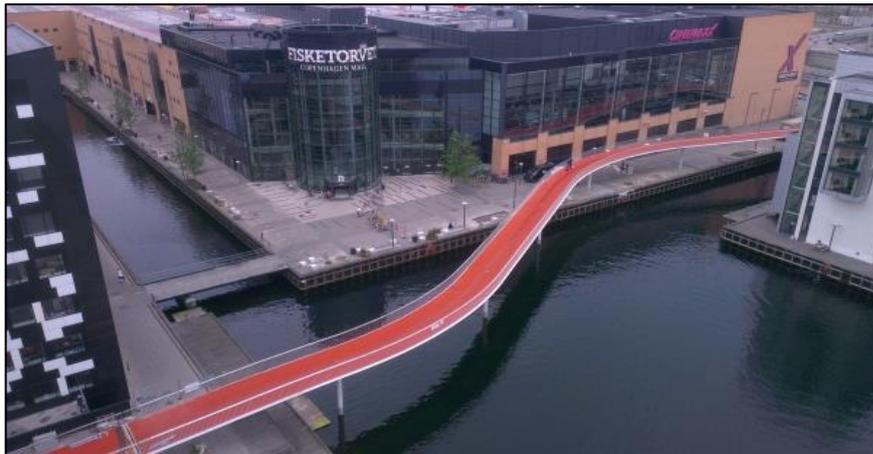


Abbildung 130: Die Cykleslangen im Kopenhagener Hafen. (Copyright: DISSING+WEITLING architecture a/s)

### Tag der Nahmobilität.

Als Maßnahme gilt es, einen Tag im Jahr der Nahmobilität festzuhalten. Möglichst viele Menschen, ob Alt und Jung, sollen dazu bewegt werden, zu Fuß zu gehen oder das Fahrrad zu nutzen. Dadurch kann gezeigt werden, dass die Hemmnisse zu Fuß zu gehen oder das Fahrrad zu nutzen, schnell überwunden werden können, wenn eine gewisse Masse an Menschen dies auch tut.

### Mobilitätsrechner online

Zur Kalkulation der eigenen Mobilität kann ein Kostenrechner die unterschiedlichen Mobilitätsformen vergleichen, z.B. MIV vs. ÖPNV + Fahrrad Kombi, und informieren. Mit wenigen Eingaben sollten die jährlichen Kosten für Mobilität dargestellt werden. Auch hier bietet sich an, mit den Hochschulen und Ämtern (Informatik, Stadtplanung, Verkehrsamt etc.) zusammenzuarbeiten und erste Projektideen zu initiieren.

### Wettbewerb „Green Mobility Award“

Ein jährlich stattfindender „Green Mobility Award“ wird an das Unternehmen verliehen, welches seine Mitarbeiter beim Verzicht auf eigene Autonutzung oder der Umstellung des Fuhrparks am erfolgreichsten motiviert hat. Neben dem Marketingeffekt für das jeweilige Unternehmen könnte für die Dauer von einer Woche ein oder mehrere Elektrofahrzeuge, Pedelecs oder Elektroller kostenlos genutzt werden.

### **Wirtschaftlichkeit & Finanzierung**

Die Kosten für Werbekampagnen sind unterschiedlich hoch. Wettbewerbe bei Hochschulen können die Kosten reduzieren. Außerdem werden innovative und kreative Ideen von selber und in den örtlichen Medien publiziert. Die Finanzierung könnte über Förderprogramme des Landes oder des Bundes gestemmt werden. Sponsoring könnte ebenfalls als Finanzierung in Betracht gezogen werden. Banken, Immobilienkonzerne, Versicherer oder Energieversorger könnten als Sponsor einzelner Feste oder Wettbewerbe gewonnen werden.

### **Umweltauswirkung**

Die Emissionsminderung durch Wettbewerbe, Informationskampagnen oder Marketingmaßnahmen sind kaum quantifizierbar. Dennoch sind diese unersetzlich, wenn die Bevölkerung über bestehende oder geplante Maßnahmen informiert werden soll.

### **Hemmnis**

Jeder Wettbewerb oder jede Informationskampagne muss organisiert und finanziert werden. Beides sind Hemmnisse dieser Maßnahmen. Mobilitätsreferat oder Energierferat sollten federführend die Organisation unterschiedlicher Kampagnen übernehmen. Die Öffentlichkeitsabteilung sollten durch weiteres fachliches Personal, wie z.B. Eventmanager oder Marketingexperten, unterstützt werden.

## 6.7 Visionäre Maßnahmen

Neben den aufgeführten Maßnahmen im Kapitel 2.3 stellen die folgenden visionären Maßnahmen weitere Möglichkeiten zur Umgestaltung des bisherigen Verkehrsaufkommens dar. Es ist zu betonen, dass diese aus heutiger Sicht eher sehr visionären Maßnahmen nicht in der Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzierung berücksichtigt werden. Vielmehr sollen diese einen Überblick künftig möglicher Maßnahmen geben.

### Autonome Taxis

Mehrere Automobilhersteller sowie der Internetkonzern Google arbeiten seit Jahren an selbstfahrenden Autos. Nissan kündigte im August 2013 an, ein autonomes Auto bis 2020 auf den Markt zu bringen. Google testet seit rund zwei Jahren auf den Straßen von Nevada einen umgebauten selbstfahrenden Toyota Prius.

In Milton Keynes (England) sollen ab 2015 ca. 20 autonome elektrische Taxis eingesetzt werden. Bis 2017 soll die Flotte auf 100 Fahrzeuge ausgebaut werden. Neben diesen Beispielen arbeiten auch andere Hersteller wie Tesla, VW und Mercedes an autonomen Autos.

Die Vision von autonomen Taxis ist als sehr realistisch zu betrachten. Nutzer bestellen per Smart-Phone das autonome Taxi vor die Haustür und geben ihr Ziel ein. Insbesondere für eine alternde Bevölkerung stellen autonome Taxis eine echte Alternative zum ÖPNV dar. In Zusammenhang mit Carsharing Angeboten stellen autonome Pkw eine zukünftig interessante Option der Mobilität dar.

### Induktionsaufladen von Bussen und Pkw

An mehreren Forschungseinrichtungen wird induktives Laden getestet, um künftig ohne Kabel schnell Batterien von Elektroautos als auch Elektrobusse aufzuladen. In der Vision Nachhaltige Mobilität 2050 kann davon ausgegangen werden, dass für Frankfurt alle innenstädtische Busse bis 2050 induktiv geladen werden können.

In der Stadt Gumi in Südkorea testet das Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) in einem Forschungsprojekt wie induktives Laden mit Bussen während der Fahrt funktionieren kann. Dabei beziehen die Fahrzeuge während der Fahrt durch magnetische Induktion kontaktlos Energie von Kabeln, die in den Straßenbelag eingebettet sind. Dabei wird die Technologie nicht in Forschungsumgebung, sondern auf Straßen im öffentlichen Verkehr zum Einsatz getestet. Auch das Beispiel des Elektrobusses in Genf mit seiner Schnellladestation mit einer Aufladezeiten von 15 Sekunden zeigt, dass schnelles Laden von Batterien keine Vision mehr sein muss. Grund hierfür ist, dass die Batterien an mehreren Stationen aufgeladen werden und somit der Aufladungsvorgang nur zu gewissen Teilen erfolgen muss.

### Wassertaxi für Frankfurt

Eine Maßnahmen-Vision, die Mehrfacheffekte aufweist, stellt die Ausschreibung und Einrichtung einer Wassertaxi-Linie auf dem Main dar. Städtebaulich erhöht sie die Qualität, die die in den vergangenen Jahren wiederentdeckte Lage am Fluss bietet. Weiter stellt sie eine Ergänzung des klimafreundlichen ÖPNV-Angebotes dar. Es besteht die Option, neue, schnelle Querverbindungen zwischen den Stadtteilen entlang des Mains zu schaffen. Sowohl entlang des Flussverlaufes in ost-westlicher Richtung als auch in Nord-Süd-Verknüpfung der Stadtteile auf beiden Mainseiten. Eine Mischung aus Stop-by-Stop-Linien und Expresslinien kann die Attraktivität zusätzlich steigern. Zielgruppenbezogen bieten sich nicht nur Potenziale in Bezug auf die Arbeits- und Wohnbevölkerung sondern auch in Bezug auf Touristen. Ein modern-futuristisches Design und ein entsprechender zukunftsweisender Hybrid-Antrieb der Fähren können so auch zu einem kommunikativen Leuchtturm im Stadtraum für die Ausrichtung der Stadt auf eine attraktive postfossile Zukunft führen.

In einer ersten Ausbauvariante kann der Bereich zwischen den Staustufen in der Nähe des Osthafens sowie der Staustufe bei Griesheim im Westen erschlossen werden. Die besonders attraktive Schnellanbindung der räumlichen Randlagen Fechenheim und Höchst ist durch die Staustufen behindert. Aufgrund der besonders schlechten ÖPNV-Anbindungssituation von Fechenheim kann hier geprüft werden, ob eine Anbindung von beiden Seiten der Staustufe Osthafen dennoch sinnvoll ist.

Im Folgenden werden zwei unterschiedlichen Szenarien im Mobilitätssektor skizziert. Dabei wird zwischen einem Referenzszenario bzw. Business as usual und einem ambitionierten Maßnahmenzenario unterschieden, in denen die oben vorgestellten Maßnahmen expliziert nach der Verkehrsroadmap umgesetzt werden.

## 6.8 Entwicklungen des Verkehrssektors für Referenz- und Maßnahmenzenario

Im Folgenden werden auf Basis der beschriebenen Maßnahmen die Entwicklungen zum MIV, ÖPNV für die Szenarien im Kapitel 12 beschrieben. Es wird zwischen einem Referenz- und Maßnahmenzenario unterschieden, die unterschiedliche Auswirkungen auf die Entwicklungen des Endenergieverbrauch aber auch auf das Stadtbild (Maßnahmenzenario: Halbierung der Pkw-Dichte) haben.

### 6.8.1 Entwicklungen des Verkehrssektors im Referenzszenario

Das Referenzszenario baut auf einer Trendprognose für den Verkehr bis zum Jahr 2050 als Entwicklungsannahme ohne zusätzliche Maßnahmen zu ergreifen auf. Diese liefert die Datengrundlage für den CO<sub>2</sub>-Trend im Verkehrssektor. Es basiert auf der Fortschreibung des langjährigen Entwicklungstrends nach Möglichkeit mit Berücksichtigung bereits konkretisierter Verkehrsplanungen und entspricht somit einem Trendszenario.

Im Folgenden wird für das Trendszenario eine Prognose zur Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2050 dargestellt. Dieses dient als Referenzszenario, dem das Maßnahmenszenario gegenüber steht. Für die Bilanzierung des Referenzszenarios wurden folgende Annahmen getroffen.

- Fortführung stadtplanerischer Ansätze zur Wohnraumverdichtung
- Bevölkerungsanstieg durch Zuwanderung (2010: 656.427 EW; 2050: 720.000 EW (Hessen Agentur, 2010).)
- Geringer Ausbau der Fahrradverkehrswege
- Keine bzw. geringe Umsetzung der oben beschriebenen Maßnahmen (wie z.B. Ausweisen von CS-Parkplätzen)
- Späte Akzeptanz neuer Verkehrsformen und alternativer Antriebe (Elektromobilität) ab 2030
- Keine umwälzende Durchbrüche heute noch unbekannter Techniken
- Konstante Verteilung der Kilometeranteile nach Quell-/Ziel-, Binnen- und Durchgangsverkehr
- Anstieg der Kilometerleistungen im Transportsektor gemäß Leitstudie des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
- Pkw-Dichte reduziert sich nur geringfügig
- Moderater Anstieg des CS-Anteils (5 % p.a.)
- Moderater Anstieg von E-Fahrzeugen (Anstieg nach Zielen der Bundesregierung bis 2020)
- Moderater Anstieg des ÖPNV Anteils [Pkm/Nkm] (Bus: 0,25% bzw. 0,35% p.a. / U-, Straßenbahn: 0,15 % p.a. / S-, Regionalbahn: 0,20 % p.a.)
- Effizienzsteigerung bei Motoren gemäß Leitstudie des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
- Anstieg der spez. CS-Kilometerleistung pro CS-Fahrzeug von 2010 bis 2050

#### 6.8.2 Entwicklung des motorisierten Individualverkehrs

Im Referenzszenario wird von einer moderaten Entwicklung des MIVs ausgegangen. Die Pkw-Dichte sinkt lediglich im gesamten Betrachtungszeitraum von 463 auf 451 Pkw/1.000 Einwohner (siehe Abbildung 131). Bei einer steigenden Einwohnerzahl von 0,16 Prozent pro Jahr bedeutet dies einen absoluten Mitanstieg der Pkw.

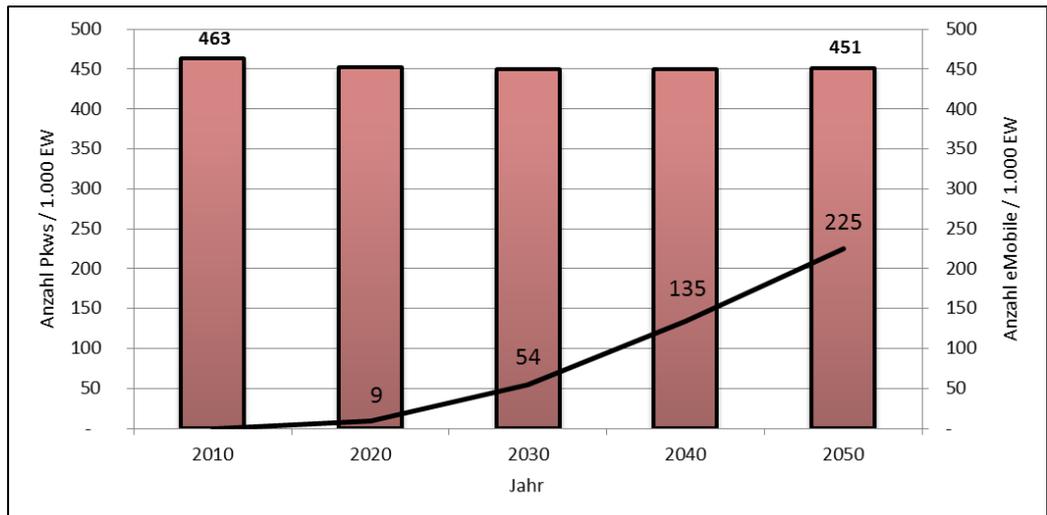


Abbildung 131: Entwicklung Pkw- und eMobile- Dichte pro 1.000 Einwohner bis 2050 (Referenzszenario), eigene Darstellung (IBP).

Der Pkw-Bestand an Fahrzeugtypen (Benziner, Diesel-, Hybrid- und Elektrofahrzeuge) entwickelt sich gemäß Abbildung 132.

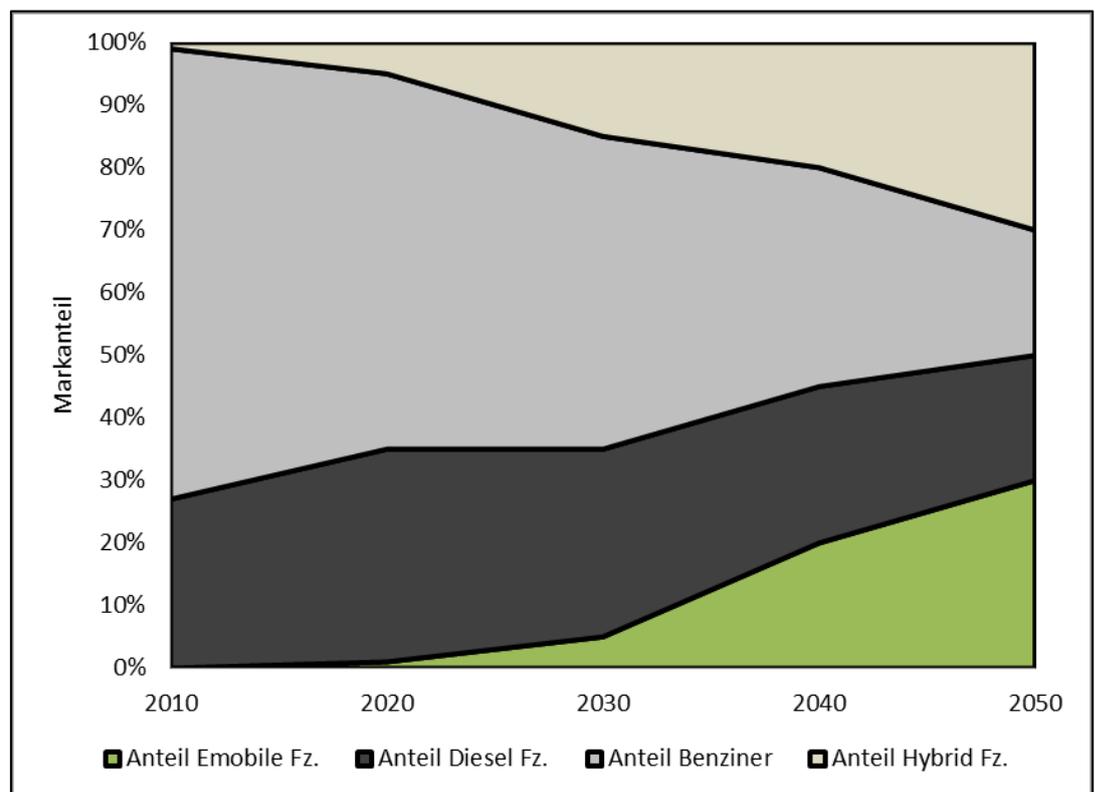


Abbildung 132: Entwicklung des Fahrzeugmix in Frankfurt bis 2050 (Referenzszenario), eigene Darstellung (IBP).

Bis 2030 entwickelt sich aufgrund einer inkonsequenten Förderung der alternativ angetriebenen Fahrzeuge deren Anteil nur geringfügig. Der Anteil an Hybrid- und Elektro-Pkw liegt zu diesem Zeitpunkt bei ca. 20 Prozent. Die

restlichen 80 Prozent verteilen sich auf Diesel und Benzin-Pkw. Damit werden die von der Bundesregierung gesetzten Zielwerte für Elektromobilität nicht erreicht. Erst im Jahr 2045 liegen die Marktanteile von alternativen und konventionellen Fahrzeugen auf einem ähnlich hohen Niveau wie der der konventionell angetriebenen Fahrzeuge. Im Jahr 2050 besteht der Fahrzeugmix zu je 30 Prozent aus Hybrid- und Elektro-Pkw. Die restlichen 40 Prozent verteilen sich gleichmäßig auf Diesel und Benzin.

Dem Carsharing wird im Referenzszenario eine moderate Entwicklung unterstellt. Der Anteil an Fahrzeugen steigt gleichmäßig alle zehn Jahre um fünf Prozent an. Im Jahr 2050 sind rund 2.900 Fahrzeuge in Frankfurt im Einsatz. Weiter werden im Referenzszenario keine Veränderungen in der Verteilung der anteiligen Kilometerleistung (Binnen-, Ziel- und Durchgangsverkehr) vorgenommen (siehe Tabelle 5). Eine mögliche Weiterentwicklung bzw. Effizienzsteigerung sämtlicher Antriebsmotoren wird der prognostizierten Entwicklung der Leitstudie vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit entnommen.

Tabelle 5: Übersichtstabelle zu den Annahmen zum MIV Sektor (Referenzszenario), eigene Darstellung (IBP).

	Einheit	2010	2020	2030	2040	2050	
Pkw-Dichte	[Pkw/Tsd. EW]	463	452	450	449	451	
CS-Dichte	[CS-Pkw/Tsd. EW]	0,6	1,8	2,6	3,4	4,0	
CS-Pkw ersetzt Privat-Pkw		6	6	5	4	3	
Binnenverkehr	[%]	19	19	19	19	19	
Quell- und Zielverkehr	[%]	57	57	57	57	57	
Durchgangsverkehr	[%]	24	24	24	24	24	
Pkw-Mix	Benzin & Diesel	[%]	99	94	80	60	40
	Hybrid	[%]	1	5	15	20	30
	Elektrisch	[%]	0	1	5	20	30

Die Entwicklung des Diesel-, Benzin- und Strombedarfs im MIV Sektor bis 2050 wird Abbildung 133 dargestellt. Die Energieträger Diesel und Benzin dominieren im Referenzszenario den Endenergieverbrauch des MIVs. Insgesamt beträgt der Anteil an Benzin und Diesel 87 Prozent. Lediglich die restlichen 13 Prozent Endenergie fallen auf den Einsatz von Strom zurück. Insgesamt kann der Endenergiebedarf um 47 Prozent reduziert werden. Damit sinkt der Endenergieverbrauch von 2.888 GWh auf 1.544 GWh. Der Anteil an Biokraftstoffen ist im Referenzszenario auf den geforderten Mindestanteil der EU (zehn Prozent) beschränkt.

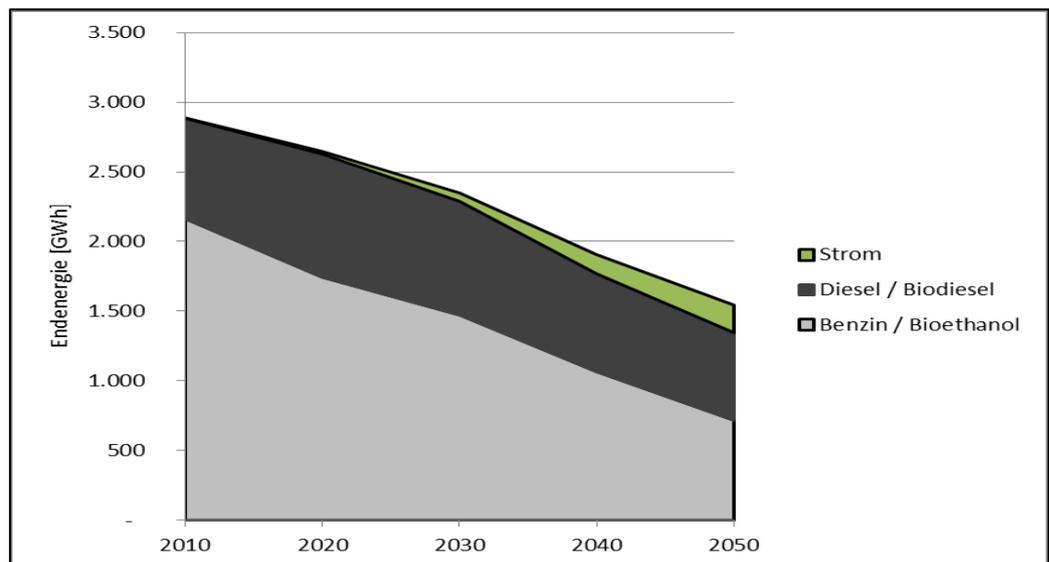


Abbildung 133: Entwicklung des Endenergieeinsatzes im MIV bis 2050 (Referenzszenario) nach Energieträger, eigene Darstellung (IBP).

### 6.8.3 Entwicklung des öffentlichen Personennahverkehrs

#### Busse

Im Referenzszenario wird von einer moderaten Entwicklung des ÖPNV ausgegangen. Die Anzahl der eingesetzten Busse steigt aufgrund des Bevölkerungszuwachses. Insgesamt sind 2050 rund 43 Busse im Binnenverkehr und 21 Regionalbusse mehr gegenüber 2010 im Einsatz. Weiter erhöht sich die Auslastung der Busse im Binnenverkehr. Die Auslastung wird im Verhältnis der Personenkilometer/Nutzkilometern (Pkm/Nkm) angegeben und steigt jährlich um 0,25 Prozent an. Im Jahr 2050 ist das Verhältnis Personenkilometerleistung zu Nutzkilometerleistung von 11,91 (2010) auf 13,16 angestiegen. Die Auslastung der Busse im Quell- und Zielverkehr steigt aufgrund des Umstiegs der MIV-Pendler auf ÖPNV mit jährlich 0,35 Prozent stärker an. Damit verbessert sich die Auslastung von ursprünglich 13 Pkm/Nkm auf 14,95 Pkm/Nkm im Jahr 2050. In Abbildung 134 wird eine Übersicht über die angenommene Entwicklung der Busflotte bis 2050 skizziert. Demnach besteht im Jahr 2050 die Busflotte des Binnen- und des Ziel und Quellverkehrs zu 50 Prozent aus Elektro-, zu 40 Prozent aus Diesel- und zu zehn Prozent aus Hybridbussen.

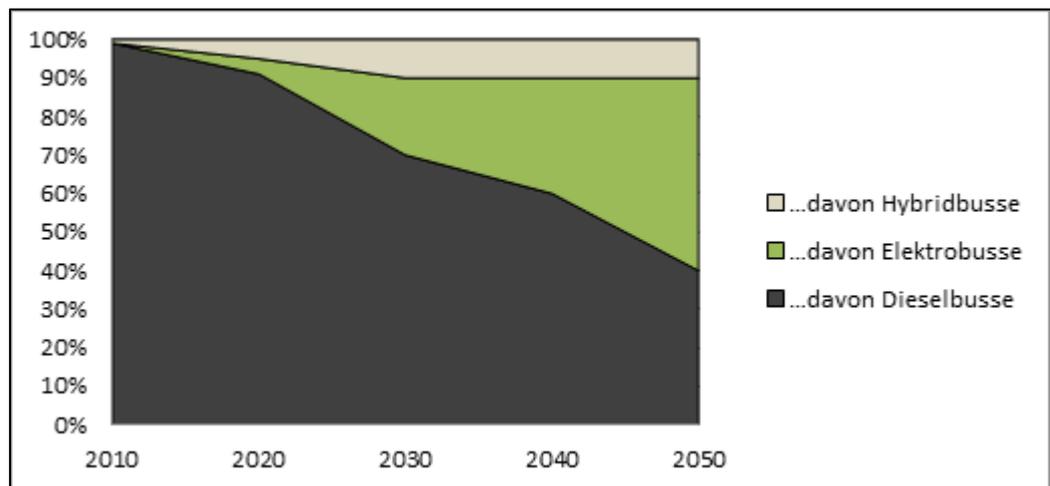


Abbildung 134: Entwicklung des Busflottenmix bis 2050 (Referenzszenario), eigene Darstellung (IBP).

#### Bahn

Anders als bei den Bussen wird die Anzahl eingesetzter Schienenfahrzeuge im ÖPNV bis 2050 konstant gehalten. Die Auslastung der Bahnen steigt jedoch aufgrund des umsteigenden Pendlerverkehrs und den stetig steigenden Treibstoffpreisen für Pkw an. In U- und Straßenbahn (Binnenverkehrsmittel) beträgt der jährliche Anstieg der Personenkilometer ca. 0,15 Prozent; in S- und Regionalbahn (Quell- und Zielverkehr) 0,20 Prozent. Bei sinkenden spezifischen Verbrauchswerten (kWh/Pkm) verringert sich der Endenergieeinsatz trotz zunehmender Personenkilometerleistung der Bahnen.

In Abbildung 135 wird die Entwicklung des Endenergieverbrauchs des gesamten Öffentlichen Personennahverkehrs dargestellt. Der Endenergieverbrauch

der öffentlichen Verkehrsmittel sinkt bis 2050 um 20 Prozent. In absoluten Zahlen reduziert sich der Endenergiebedarf von 289 GWh (2010) auf rund 232 GWh (2050).

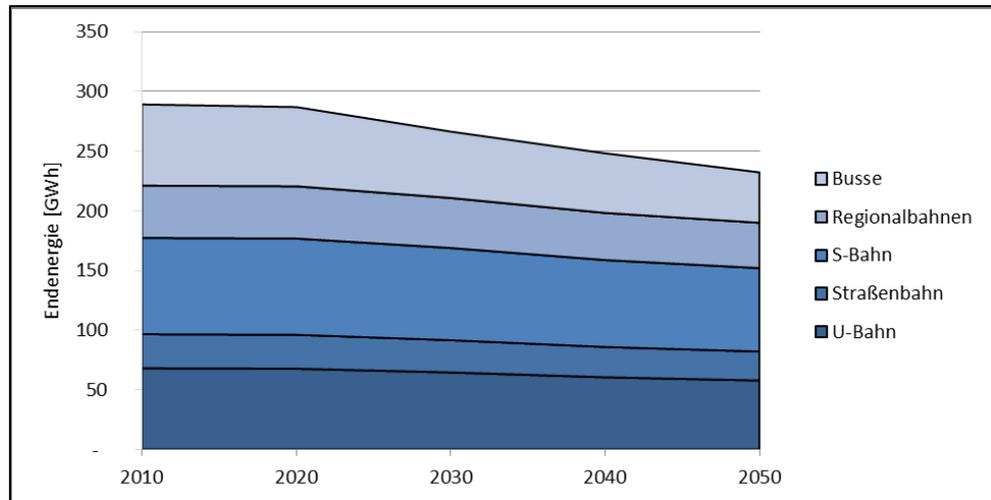


Abbildung 135: Entwicklung des Endenergieeinsatzes im ÖPNV (Referenzszenario), eigene Darstellung (IBP).

#### 6.8.4 Entwicklung des Straßengüterverkehrs (LNF und Lkw > 3,5 Tonnen)

Im Straßengüterverkehr wird von einer ansteigenden Kilometerleistung im Binnen-, Ziel- und Quell- sowie Durchgangsverkehr ausgegangen. Der Anteil der Kilometerleistung des Binnenverkehrs aufgrund eines erhöhten Transportaufkommens (Auslieferungen von Internetbestellung etc.) nimmt dabei deutlich zu.

Wie bei den Pkw wird auch bei den Lastkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen von einem Wandel in der Antriebstechnik ausgegangen. Der Anteil an Biotreibstoff (Biodiesel) bleibt nach Erreichen der von der EU auferlegten zehn Prozentquote bis 2050 mangels heimischen Biomassepotentials (Konkurrenz zum Wärmemarkt) und Akzeptanz in der Bevölkerung konstant. Der Aufbau einer Wasserstoffflotte bzw. eine an Stromleitungen geführte Elektrifizierung der Lkw wird im Referenzszenario ausgeschlossen. Somit bleibt bis 2050 die Dominanz der Diesel-Lkw (90 Prozent Marktanteil) erhalten.

Bei den LNF wird von einer langsam ansteigenden Elektrifizierung der Fahrzeuge ausgegangen. Bis 2050 sind insgesamt 25 Prozent der LNF mit einem elektrischen Antrieb ausgestattet. Der Einsatz von Wasserstoff bleibt wie bei den Lkw unberücksichtigt. Die restlichen 75 Prozent verteilen sich zu 65 Prozent auf Diesel und zehn Prozent Biodiesel LNF. Damit findet keine Umstellung der Antriebstechnik auf alternative Antriebe im Fracht- und Warentransport statt (Abbildung 136).

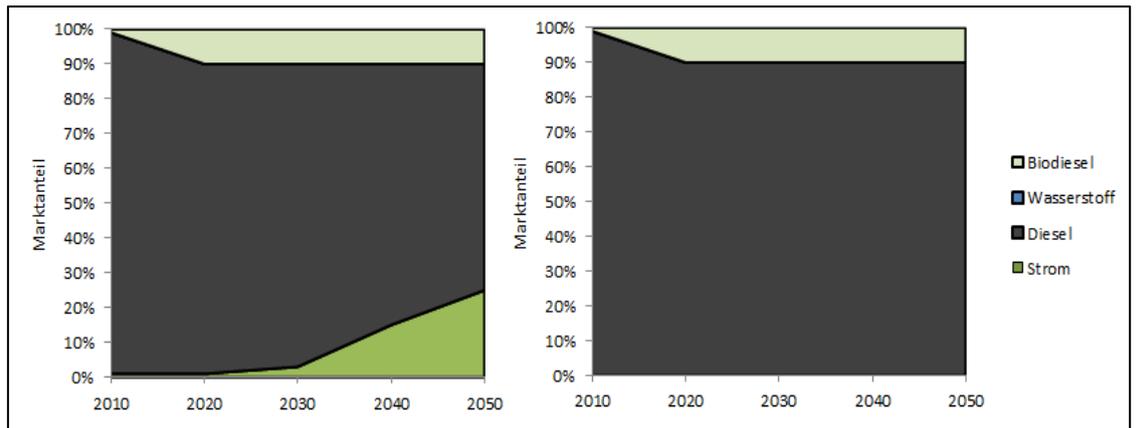


Abbildung 136: Entwicklung der Marktanteile von LNF und Lkw in Frankfurt (Referenzszenario), eigene Darstellung (IBP).

Insgesamt ist bis 2050 ein Anstieg bei der Endenergie gegenüber 2010 im Straßengüterverkehr zu verzeichnen. Die Einsparungen aufgrund der steigenden Anteile von Elektro- und Biodieselfahrzeugen werden von der steigenden Kilometerleistung überkompensiert. Insgesamt steigt der Endenergiebedarf bis 2050 um 13 Prozent an (Abbildung 137). Der Anstieg der Endenergie bei den Lkw von sechs Prozent erhöht die Energienachfrage um 149 GWh. Die Reduktion der Endenergie bei den LNF um 27 Prozent (17 GWh) führt im Saldo zu einem Gesamtanstieg von 132 GWh. Im Jahr 2050 beträgt der Anteil am Endenergiebedarf (LNF + Lkw) rund ein Prozent. Weitere zehn Prozent werden über den Einsatz von Biodiesel abgedeckt. Die restlichen 89 Prozent entfallen auf den Treibstoff Diesel.

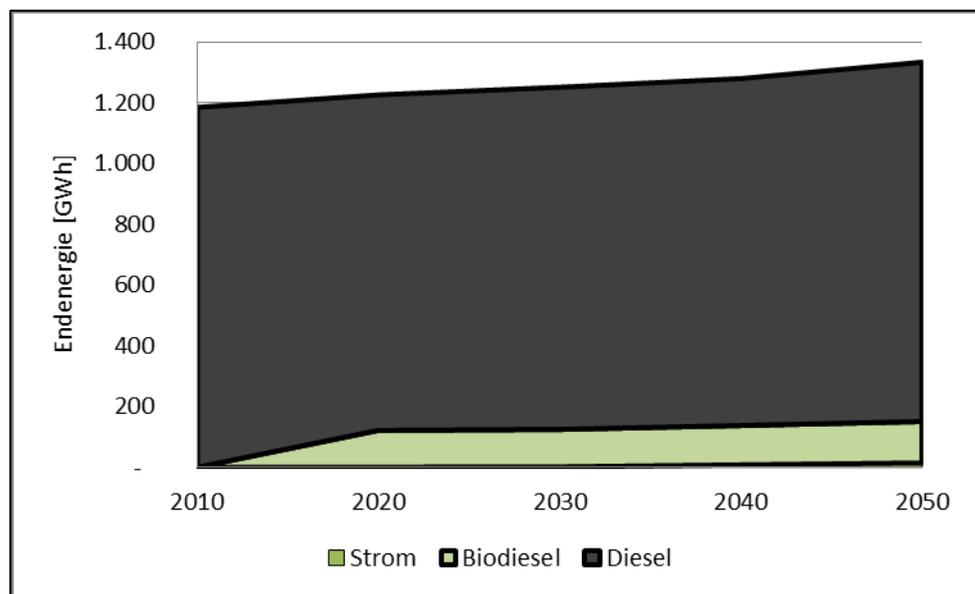


Abbildung 137: Entwicklung des Endenergieverbrauchs der LNF und der Lkw bis 2050 nach Energieträger (Referenzszenario), eigene Darstellung (IBP).

## 6.8.5 Fiktiver Modal Split im Referenzszenario

Aus dem im Referenzszenario zu Grunde gelegten Trend resultiert eine Veränderung des Modal Splits. Diesem obliegt keine Berechnungsgrundlage, sondern basiert auf Abschätzungen, die auf Basis der für das Referenzszenario getroffenen Maßnahmen/Annahmen, beruhen. In Abbildung 138 wird die Veränderung des Modal Splits im lokalen Personenverkehr gegenüber der Ausgangssituation dargestellt.

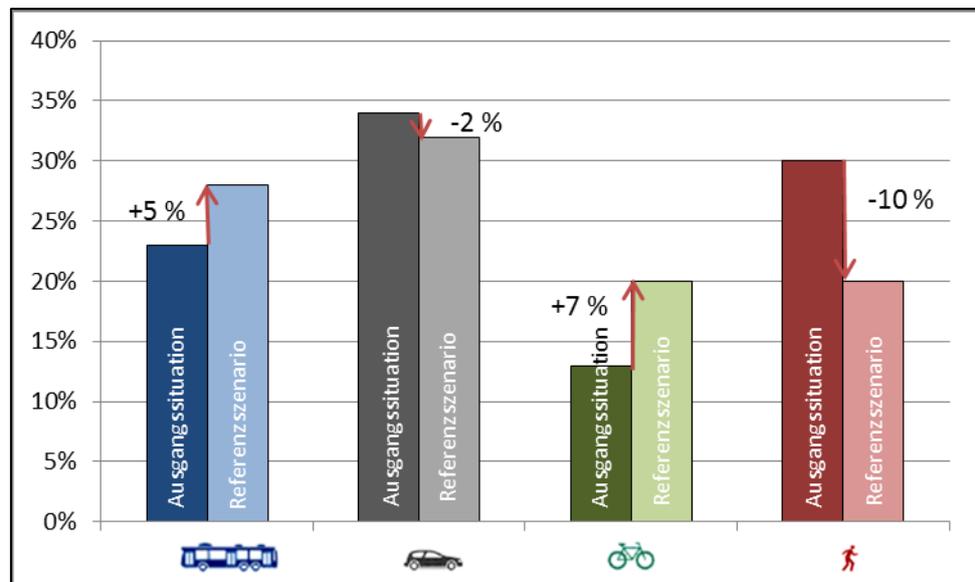


Abbildung 138: Veränderung des Modal Splits im Referenzszenario 2050 gegenüber 2010, eigene Darstellung (IBP).

Den größten Anteil am Modal Split hält weiterhin der MIV. Zwar konnten die zurückgelegten Wege um zwei Prozentpunkte reduziert werden, dennoch liegt der Anteil weiterhin bei über 30 Prozent. Beim ÖPNV kann im Referenzszenario ein Anstieg der täglichen Fahrten um ca. fünf Prozentpunkte bis 2050 gegenüber 2010 festgestellt werden. Damit werden rund 28 Prozent der Wegstrecken mit dem ÖPNV abgewickelt. Der Anteil der zu Fuß und mit dem Rad zurückgelegten Strecken beträgt je 20 Prozent. Der Anstieg im Modal Split bei den Fahrradfahrten geht unter anderem zu Lasten der Fußgänger. Deren Anteil am Modalsplit sinkt gegenüber 2010 um zehn Prozentpunkte. In Abbildung 139 wird der Modal Split im Jahr 2050 im Referenzszenario dargestellt.

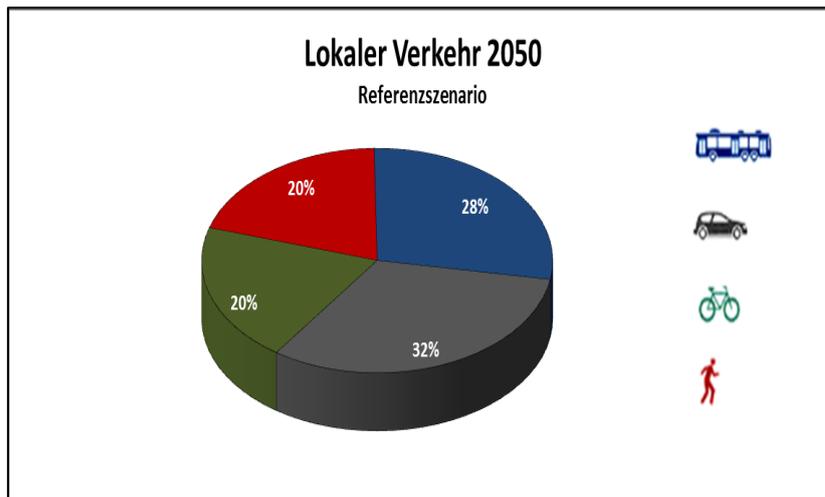


Abbildung 139: Modal Split lokaler Personenverkehr im Jahr 2050 (Referenzszenario), eigene Darstellung (IBP).

Im Zielverkehr dominieren weiterhin die Pkw mit einem Anteil von ca. 60 Prozent. Für die restlichen Fahrten wird von den Pendlern auf das Angebot des ÖPNVs zurückgegriffen (Abbildung 140).

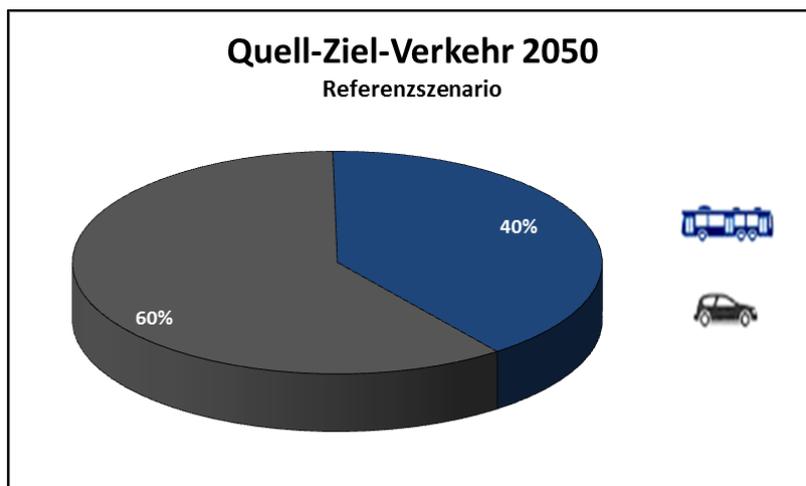


Abbildung 140: Modal Split Zielverkehr im Jahr 2050 (Referenzszenario), eigene Darstellung (IBP).

## 6.9 Entwicklungen des Verkehrssektors im Maßnahmenszenario

Im Maßnahmenszenario wird eine Entwicklung des Verkehrssektors unter Annahme der vollständigen Umsetzung der oben beschriebenen Maßnahmen bis 2050 skizziert. Analog zum Referenzszenario wird im Maßnahmenszenario von keinen umwälzenden Durchbrüchen in der Technologie ausgegangen. Die Entwicklung der Endenergie und der CO<sub>2</sub>-Emissionen können auf Grundlage der Maßnahmen abgeschätzt werden. Für die Bilanzierung des Maßnahmenszenarios wurden folgende Annahmen berücksichtigt:

- Fortführung stadtplanerischer Ansätze zur Wohnraumverdichtung
- Bevölkerungsanstieg durch Zuwanderung (2010: 656.427 EW; 2050: 720.000 EW (Hessen Agentur, 2010).)
- Intensiver Ausbau der Fahrradverkehrswege
- Größtenteils Umsetzung der in Kapitel 3.2 beschriebenen Maßnahmen (wie z.B. Ausweisen von CS-Parkplätzen etc.)
- Offenheit gegenüber neuer Verkehrsformen und alternativer Antriebe
- Konstante Verteilung der Kilometeranteile nach Quell-/Ziel-, Binnen- und Durchgangsverkehr
- Starke Reduzierung der Pkw-Dichte (von 463 Pkw/1.000 EW → 205 Pkw/1.000 EW)
- Starker Anstieg des CS-Anteils (9 % p.a.)
- Rascher Anstieg von E-Fahrzeugen nach 2025
- Anstieg der ÖPNV Nutzung (Pkm/Nkm); Bus: 0,5% bzw. 0,7% p.a. / U-, Straßenbahn: 0,3% p.a. / S-, Regionalbahn: 0,4% p.a.
- Effizienzsteigerung bei Motoren gemäß Leitstudie des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
- Ab 2040 gibt es kein Benzin und Diesel mehr. Die restlichen Hybrid-Fahrzeuge werden mit Biodiesel und Bioethanol oder EE-Gas angetrieben.

### 6.9.1 Entwicklung des motorisierten Individualverkehrs

Im Maßnahmenzenario wird von einem Rückgang der Pkw-Dichte bis 2050 ausgegangen. Trotz einer stetig wachsenden Einwohnerzahl (im Durchschnitt 0,16 Prozent pro Jahr) reduziert sich die Pkw-Dichte von 463 auf 205 Pkw/1.000 EW im Jahr 2050 (Abbildung 141).

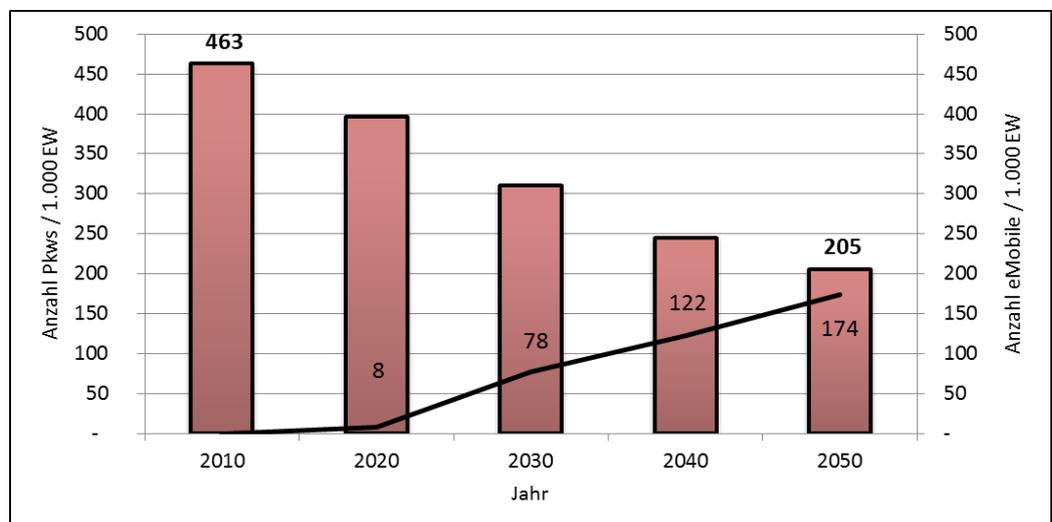


Abbildung 141: Entwicklung Pkw- und E-Mobile- Dichte pro 1.000 Einwohner bis 2050 (Maßnahmenzenario), eigene Darstellung (IBP).

Der absolute Rückgang der Pkw ist auf den Ausbau der Fahrradinfrastruktur und einem verbesserten ÖPNV Angebot zurückzuführen. In Abbildung 142 wird die Entwicklung des CS-Bestands bis 2050 prognostiziert. In den Jahren von 2010 bis 2020 ist der Anstieg der CS-Fahrzeuge in Frankfurt eher mode-

rat. Im Zeitraum von 2020 bis 2040 muss aufgrund der steigenden Nutzer das CS-Angebot weiter ausgebaut werden, sodass 2040 rund 14 Fahrzeuge pro 1.000 EW zum Teilen in Frankfurt bereitstehen. Ab 2040 verringert sich der Anstieg. Im Jahr 2050 liegt die CS-Fahrzeugdichte bei rund 17 Fahrzeugen pro 1.000 EW. Durch eine vermehrte Nutzung einzelner Fahrzeuge steigt auch die Verkehrsleistung von rund 15.000 km auf rund 30.000 km pro Jahr.

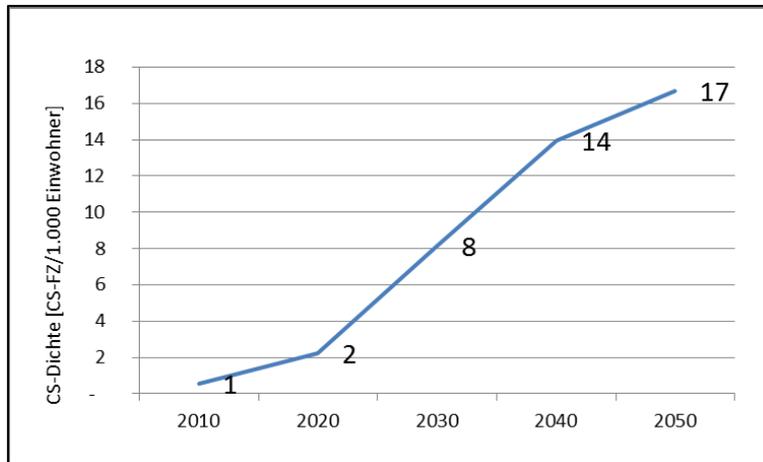


Abbildung 142: Anstieg der Carsharing-Dichte je 1.000 Einwohner bis 2050 (Maßnahmenszenario), eigene Darstellung (IBP).

Die verbleibenden Pkw (CS + private Pkw) in Frankfurt verteilen sich gemäß Abbildung 143. Durch das Erreichen des Break-Even-Point in der Elektromobilität und den intensive Fördermaßnahmen seitens der Stadt (z.B. freie Parkplätze für E-Fahrzeuge, etc.) steigt der Anteil an Hybrid- und insbesondere Elektrofahrzeugen ab 2020 rasant an. Demnach werden Benzin und Diesel Pkw bis 2050 durch Hybrid und Elektrofahrzeuge vollständig verdrängt. Der Pkw-Mix 2050 besteht zu 15 Prozent aus Hybrid- und zu 85 Prozent aus Elektrofahrzeugen.

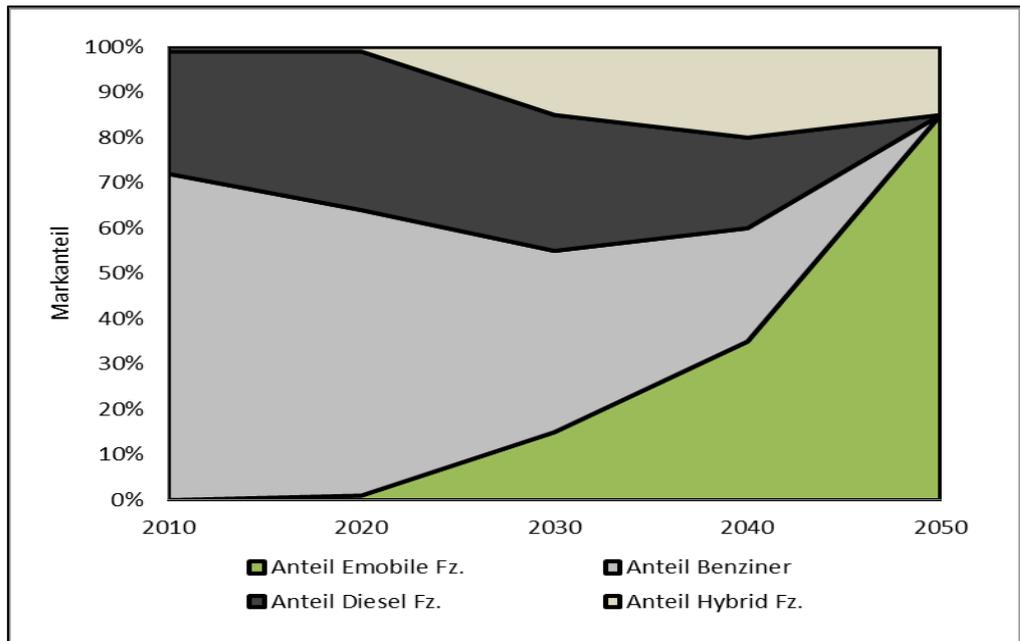


Abbildung 143: Entwicklung des Fahrzeugmix in Frankfurt bis 2050 (Maßnahmenszenario), eigene Darstellung (IBP).

Weiter werden im Maßnahmenszenario keine Veränderungen in der Verteilung der anteiligen Kilometerleistung (Binnen-, Ziel- und Durchgangsverkehr) vorgenommen. Eine mögliche Weiterentwicklung bzw. Effizienzsteigerung bei Ottomotoren über die Jahre wird, wie im Referenzszenario, gemäß der Leitstudie des BMU berücksichtigt. Tabelle 6 gibt einen Überblick über die im Maßnahmenszenario getroffenen Annahmen.

Tabelle 6: Übersichtstabelle zu den Annahmen zum MIV Sektor (Maßnahmenszenario).

		Einheit	2010	2020	2030	2040	2050
Pkw-Dichte		[Pkw/Tsd. EW]	463	390	343	292	205
CS-Dichte		[CS-Pkw/Tsd. EW]	1	2	8	14	17
CS-Pkw ersetzt Privat-Pkw			6	6	5	4	3
Binnenverkehr		[%]	19	19	19	19	19
Quell- und Zielverkehr		[%]	57	57	57	57	57
Durchgangsverkehr		[%]	24	24	24	24	24
Pkw-Mix	Benzin & Diesel	[%]	99	98	70	45	0
	Hybrid	[%]	1	1	15	20	85
	Elektrisch	[%]	0	1	15	20	15

In Abbildung 144 wird die Entwicklung der Endenergie bis 2050 für den motorisierten Individualverkehr im Maßnahmenszenario skizziert. Demnach reduziert sich bis 2050 der Endenergiebedarf von 2.888 GWh auf 413 GWh. Der Anteil an Strom am Gesamtendenergieeinsatz im Sektor MIV beträgt im Jahr 2050 rund 68 Prozent.

Die restliche eingesetzte Endenergie verteilt sich auf die Biotreibstoffe Bioethanol (18 Prozent) und Biodiesel (15 Prozent). Diese werden für den Antrieb der verbleibenden Hybrid-Fahrzeuge benötigt.

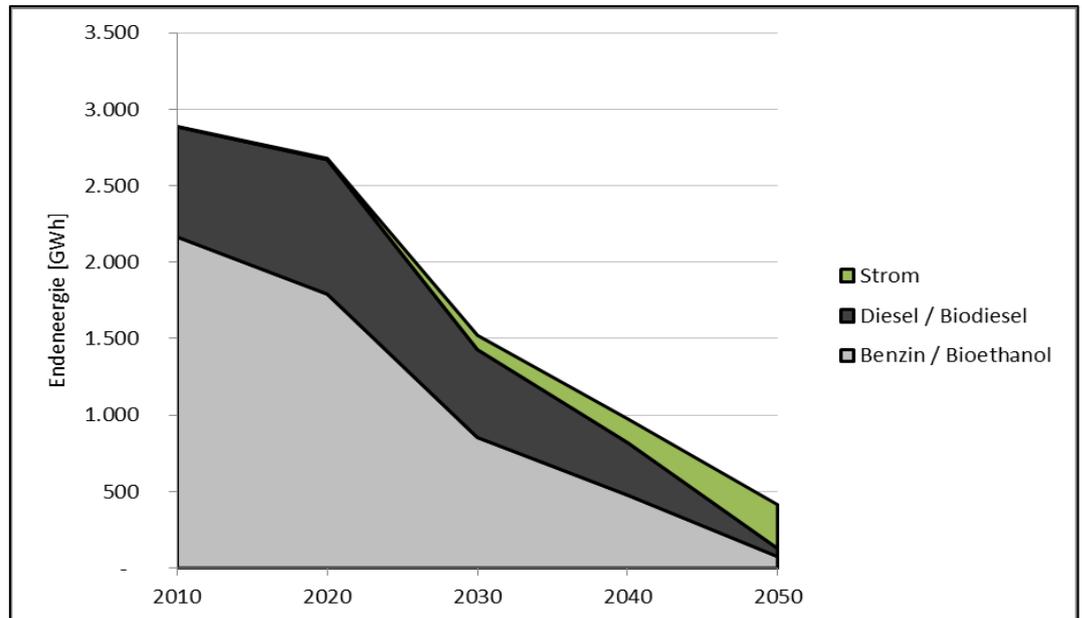


Abbildung 144: Entwicklung des Endenergieeinsatzes bis 2050 im Sektor MIV nach Energieträger (Maßnahmenszenario), eigene Darstellung (IBP).

Die deutliche Reduktion des Benzin- und Dieselverbrauchs von 2010 bis 2030 resultiert aus der stark reduzierten Pkw-Dichte, der Substitution von Benzin- und Diesel-Fahrzeugen durch Hybrid- und Elektro-Pkw und Effizienzsteigerungen in der Antriebstechnik.

## 6.9.2 Entwicklung des öffentlichen Personennahverkehrs

Im Maßnahmenszenario wird von einer deutlich höheren Nutzung des öffentlichen Personennahverkehrs ausgegangen. Aufgrund der kontinuierlichen Förderung und Verbesserung des Angebots kann die Attraktivität des ÖPNV deutlich gesteigert werden. Weiter führt die verstärkte Nutzung von Carsharing und Pendler-Pedelecs zur steigenden Fahrgastzahlen im ÖPNV.

### Busse

Die Auslastung (Pkm/Nkm) der im Binnenverkehr eingesetzten Busse steigt konstant mit 0,5 Prozent pro Jahr bei gleichzeitigem Ausbau der Busflotte bis 2050. Im Quell- und Zielverkehr kommt es aufgrund des Umstiegs der Pendler auf den ÖPNV zu einem jährlichen Anstieg der Auslastung (Pkm/Nkm) von 0,7 Prozent. Insgesamt werden im Jahr 2050 rund 93 Busse mehr gegenüber 2010 in Frankfurt eingesetzt. Die Busflotte besteht Ende 2050 zu 98 Prozent aus Elektro- und zu zwei Prozent aus Hybridfahrzeugen. Bei der Umstellung der Busflotte wird von einer deutlich höheren Dynamik als bei den Pkw ausgegangen. Dabei ist das vom Gesetzgeber vorgeschriebene maximale Alter eines Busses Ursache für den raschen Paradigmenwechsel. Im Maßnahmen-

szenario wird davon ausgegangen, dass der übermäßige Teil der Neuanschaffungen ab 2018 Elektrobusse sind. Damit werden schon 2020 knapp 30 Prozent der Busse elektrisch angetrieben. Bis 2030 hat sich der Anteil auf 48 Prozent erhöht; bis 2040 auf 90 Prozent. Die Anzahl der Hybridbusse steigt bis 2030 geringfügig, wird ab dann jedoch durch Elektrobusse substituiert (siehe Abbildung 145).

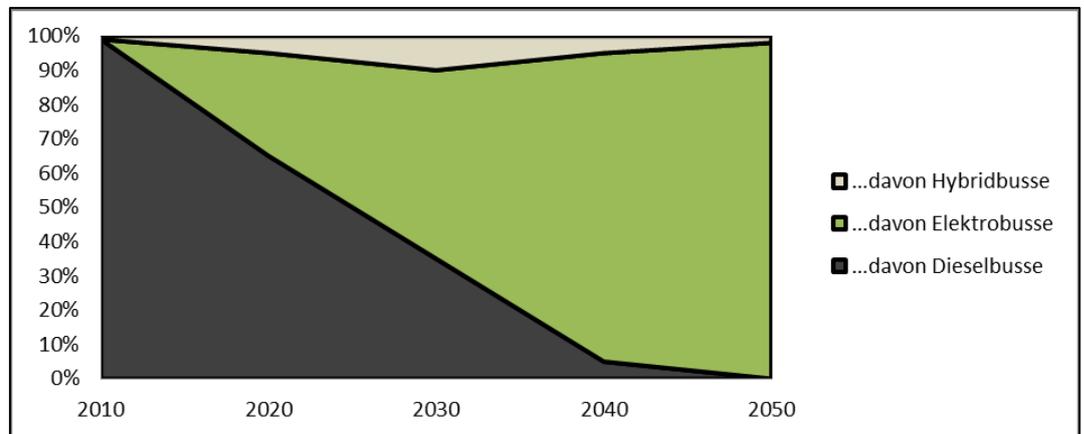


Abbildung 145: Entwicklung des Busflottenmix bis 2050 (Maßnahmenszenario), eigene Darstellung (IBP).

### Bahn

Analog zu den Bussen wird eine steigende Auslastung (Pkm/Nkm) auch bei den Bahnen prognostiziert. Bei den U- und Straßenbahnen (Binnenverkehr) erhöht sich die Auslastung jährlich um 0,3 Prozent. Der jährliche Anstieg der Auslastung bei S- und Regionalbahnen wird aufgrund der ansteigenden Pendlernutzung mit 0,4 Prozent angenommen. Neben einer höheren Auslastung werden gegenüber 2010 im Jahr 2050 ca. 13 U-, 11 Regional-, 12 S- und 11 Straßenbahnen mehr im Einsatz sein.

Der damit einhergehende höhere Strombedarf wird durch Effizienzmaßnahmen wie den Steuerungsassistenten und Effizienzsteigerungen der Antriebsmotoren überkompensiert. Bei den Bussen kann trotz steigender Fahrleistung und Flottenerweiterung der Endenergieeinsatz durch die Umstellung auf Elektroantriebe und effizientere Motoren entscheidend gesenkt werden. Insgesamt ist der Endenergieeinsatz des ÖPNVs im Jahr 2050 um 31 Prozent niedriger als 2010. Demnach sinkt der Endenergieeinsatz von 289 auf 199 GWh (Abbildung 146).

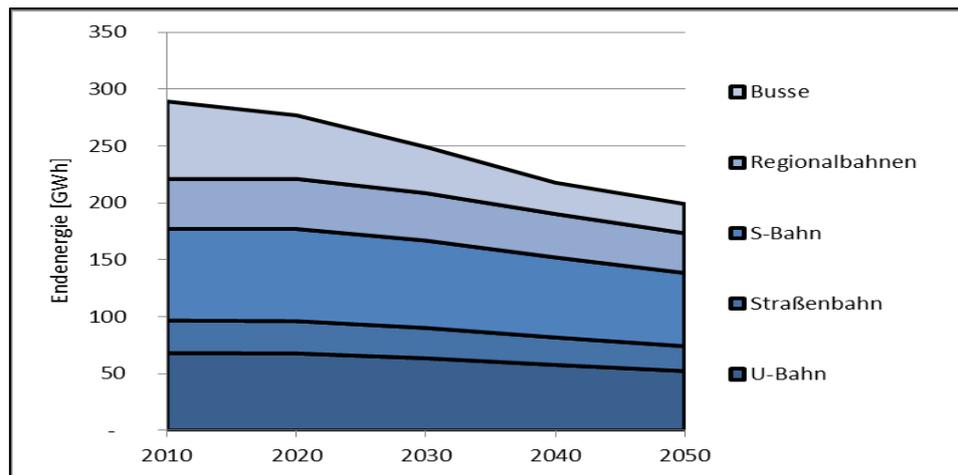


Abbildung 146: Entwicklung des Endenergieeinsatzes im ÖPNV (Maßnahmenszenario), eigene Darstellung (IBP).

### 6.9.3 Entwicklung des Straßengüterverkehrs (LNF und Lkw > 3,5 Tonnen)

Im Maßnahmenszenario wird von einer leicht steigenden Kilometerleistung bei den LNF und Lkw von zehn Prozent bis 2050 ausgegangen. Der Anstieg fällt aufgrund einer verbesserten Citylogistik im Vergleich zum Referenzszenario deutlich geringer aus. Analog zum Referenzszenario werden Effizienzsprünge in der Motorentechnik gemäß Leitstudie des BMU berücksichtigt. Die Marktdurchdringung von elektrischen LNF verläuft wesentlich langsamer als bei den Pkw jedoch deutlich schneller als im Referenzszenario. Bis zum Jahr 2020 verfügen zwei Prozent der Fahrzeuge über einen Elektromotor. Im Zeitraum bis 2040 kann der Anteil auf 25 Prozent (2030) bzw. 45 Prozent (2040) gesteigert werden. 2050 liegt der Anteil elektrischer LNF bei knapp 70 Prozent. Der Anteil an Wasserstoff-LNF steigt aufgrund geringer Fördermaßnahmen deutlich langsamer an. Bis 2050 beträgt der Anteil lediglich 20 Prozent. Die übrigen zehn Prozent der LNF werden mit Biotreibstoffen betrieben.

Bei den Lkw verteilen sich die Technologien zu 50 Prozent auf Elektro-, und 40 Prozent Wasserstoffantriebe. Der Anteil an Biodiesel bleibt nach dem Erreichen des vorgegebenen Zielwertes der EU von rund zehn Prozent konstant (Abbildung 147).

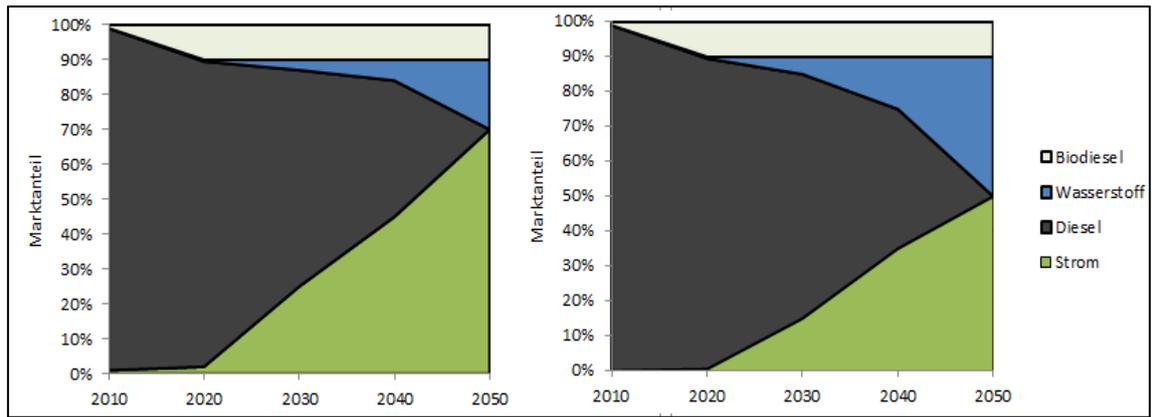


Abbildung 147: Entwicklung der Marktanteile von LNF (links) und Lkw (rechts) in Frankfurt (Referenzszenario), eigene Darstellung (IBP).

Durch die schrittweise Umstellung der Antriebe von Diesel auf Strom bzw. Wasserstoff kann der Endenergieverbrauch sowohl bei den LNF als auch den Lkw gesenkt werden. Insgesamt kann der Endenergieverbrauch 2050 aufgrund des Technologiewandels und effizienter werdenden Motoren gegenüber 2010 um 60 Prozent reduziert werden. Anders als im Referenzszenario kann durch den hohen Anteil alternativer Antriebe der Mehraufwand an Endenergie aufgrund der erhöhten Kilometerleistung überkompensiert werden.

Die Endenergieeinsparung beläuft sich auf rund 700 GWh. Im Jahr 2050 beträgt der eingesetzte Anteil an Strom am Gesamtendenergiebedarf des Transportsektors 77 Prozent. Der restliche Endenergiebedarf wird durch Biodiesel (ca. 23 Prozent) gedeckt (Abbildung 148).

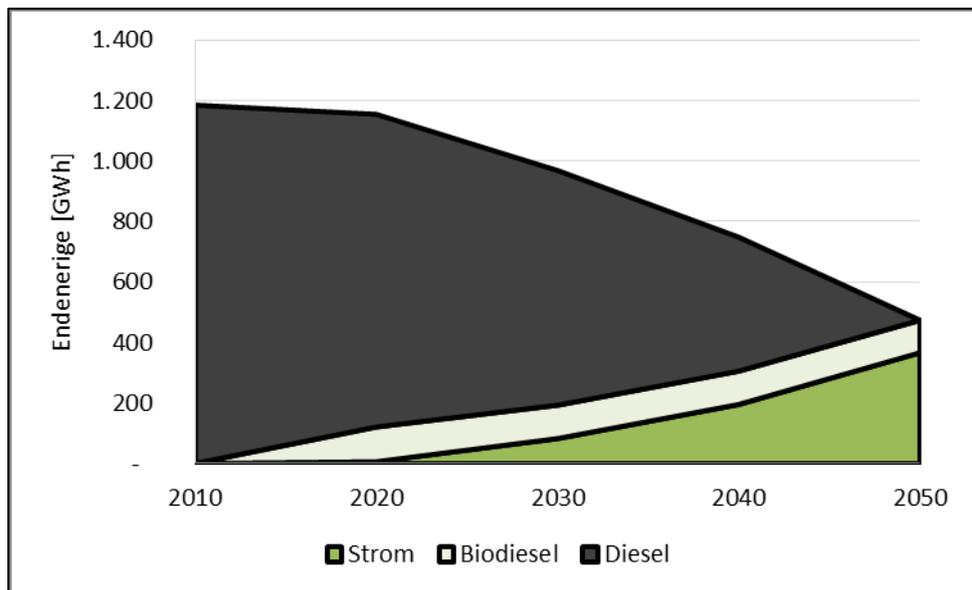


Abbildung 148: Entwicklung des Endenergieverbrauchs der LNF und der Lkw bis 2050 nach Energieträger (Maßnahmenszenario), eigene Darstellung (IBP).

## 6.9.4 Visionärer Modal Split im Maßnahmenszenario

Die Umsetzung der oben beschriebenen Maßnahmen stehen in Wechselbeziehungen zueinander und beeinflussen die Verteilung des Modal Split im Personenverkehr. Aufgrund dessen, dass eine quantifizierte Aussage hinsichtlich der Wirkung einer jeder Maßnahme auf den Modal Split nicht möglich ist, kann für das Jahr 2050 lediglich ein visionärer Modal Split dargestellt werden (Abbildung 149). Dieser wird mit dem Modal Split der Ausgangssituation verglichen. Die Veränderung des Modal Splits wird nachfolgend begründet.

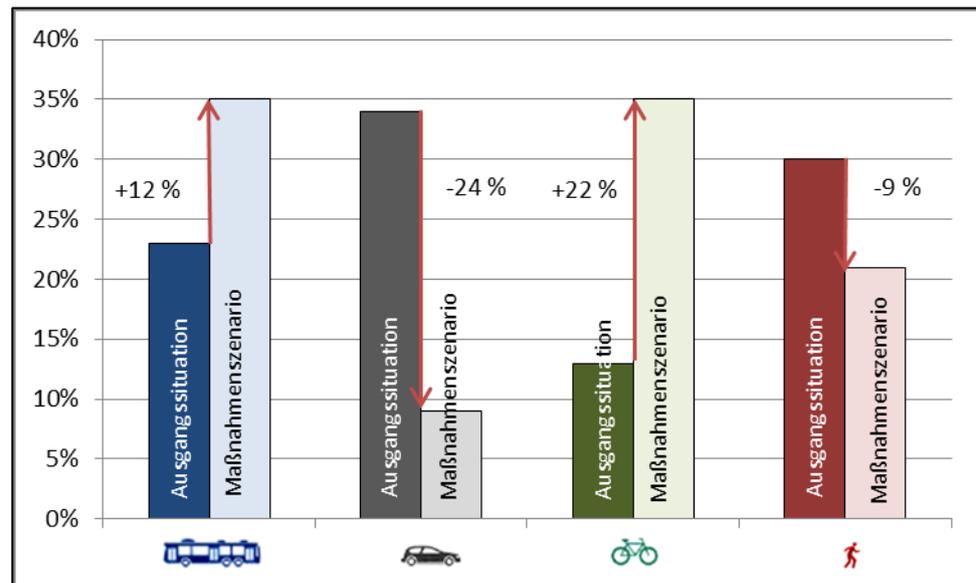


Abbildung 149: Veränderung des Modal Splits im Maßnahmenszenario 2050 gegenüber 2010, eigene Darstellung (IBP).

Durch die konsequente Umsetzung der Maßnahmen steigt wie zuvor beschrieben die Nutzung des ÖPNVs gegenüber 2010 um 12 Prozentpunkte an. Weiter führt der Ausbau der Infrastruktur für Radfahrer sowie ein flächendeckendes Bike-Sharing Angebot und Marketingaktionen zu einem starken Anstieg der Fahrradfahrten am Modal Split (+22 Prozentpunkte). Demnach werden 2050 rund 35 Prozent der Fahrten in Frankfurt mit dem Rad getätigt. Der Anteil der zu Fuß zurückgelegten Strecken sinkt bis 2050 gegenüber 2010 um neun Prozentpunkte auf 21 Prozent. Die Einbußen sind auf den enormen Anstieg der Radfahrten sowie die verbesserte ÖPNV-Erschließung und der damit verbunden erhöhte Nutzung zurückzuführen. Die größte Veränderung am Modal Split findet im motorisiertem Individualverkehr statt. Dort ist ein Rückgang der täglichen Fahrten um 24 Prozentpunkte zu verzeichnen. Der Anteil des MIV am Modal Split beträgt 2050 lediglich neun Prozent. Ursache für den Rückgang ist neben der kontinuierlichen Weiterentwicklung der Leitidee „Stadt der kurzen Wege“ eine fahrradfreundliche Verkehrsinfrastruktur. Zusammenfassend wird in Abbildung 150 der Modal Split für den lokalen Verkehr im Jahr 2050 dargestellt.

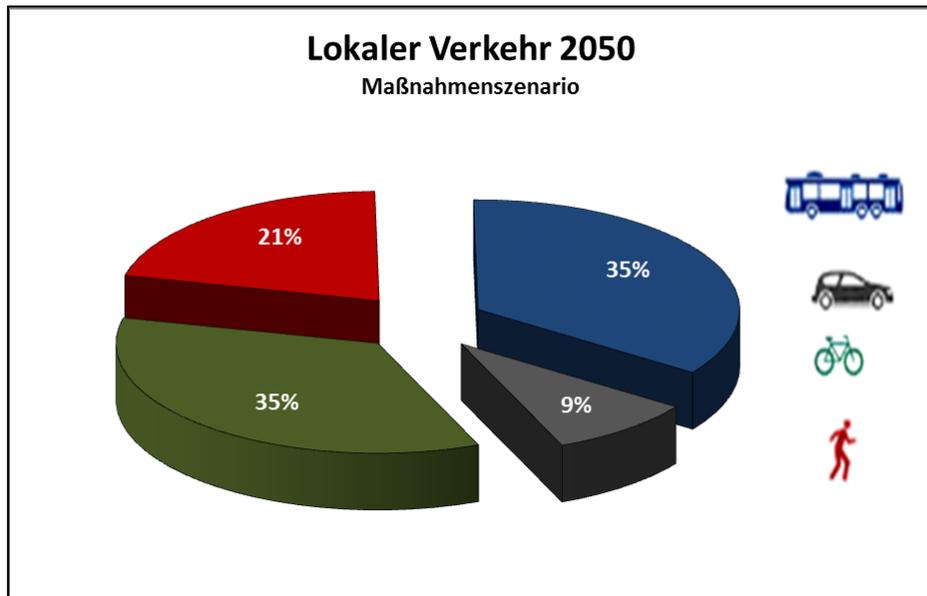


Abbildung 150: Modal Split lokaler Personenverkehr im Jahr 2050 (Maßnahmenszenario), eigene Darstellung (IBP).

Weiter beeinflussen die Umsetzungen der Maßnahmen auch die Verkehrsteilnehmer des Quell- und Zielverkehrs (Abbildung 151). Durch den Ausbau der Fahrradschnellwege und die Einführung von Pedelecs in Bikesharing Stationen greifen Pendler aus dem unmittelbaren Einzugsgebiet von Frankfurt neben dem ÖPNV häufiger auch zum Fahrrad. Damit werden durchschnittlich rund 15 Prozent der täglichen Pendlerfahrten mit dem Rad zurückgelegt. Weiter greifen Pendler aufgrund des Angebots von Jobtickets seitens der Arbeitgeber und den steigenden Treibstoffpreisen häufiger auf das stark verbesserte Angebot des ÖPNV zurück. Dadurch erhöht sich der Anteil der täglichen Fahrten zur Arbeit um 37 Prozentpunkte, was etwa einer Verdreifachung entspricht. Pendler die eine ungünstige ÖPNV Anbindung haben und gleichzeitig in großer Entfernung zu Frankfurt wohnen nutzen weiterhin den Pkw. Anders als im Jahr 2010 ist die Gründung von Fahrgemeinschaften im Jahr 2050, aufgrund der stark gestiegenen Treibstoffpreise, nicht die Ausnahme sondern die Regel.

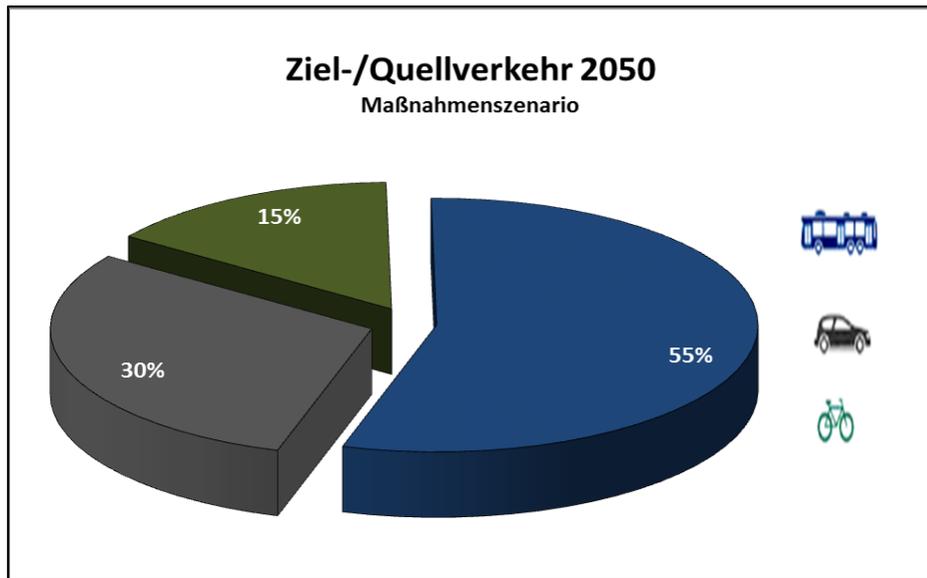


Abbildung 151: Modal Split des Zielverkehrs in FRANKFURT im Jahr 2050 (Maßnahmenzenario), eigene Darstellung (IBP).

### 6.10 Zusammenfassung der Ergebnisse Maßnahmen- und Referenzszenario

In Abbildung 152 wird der Modal Split des lokalen Personenverkehrs in der Ausgangssituation mit dem Modal Splits der beiden Szenarien verglichen. Durch die Darstellung wird der Einfluss der Maßnahmen auf die innerstädtische Verkehrsstruktur deutlich. Während im Referenzszenario die Pkw mit über 30 Prozent der täglichen Fahrten noch das bestimmende Verkehrsmittel in Frankfurt sind, verliert der MIV im Maßnahmenzenario erheblich an Bedeutung. Durch die Sensibilisierung der Bevölkerung mit dem Thema Mobilität und dem verbesserten Angeboten für ÖPNV und Bike bzw. Carsharing gelingt es im Maßnahmenzenario das Fortbewegungsmittel Pkw durch das Rad und die öffentlichen Verkehrsmittel zu substituieren.

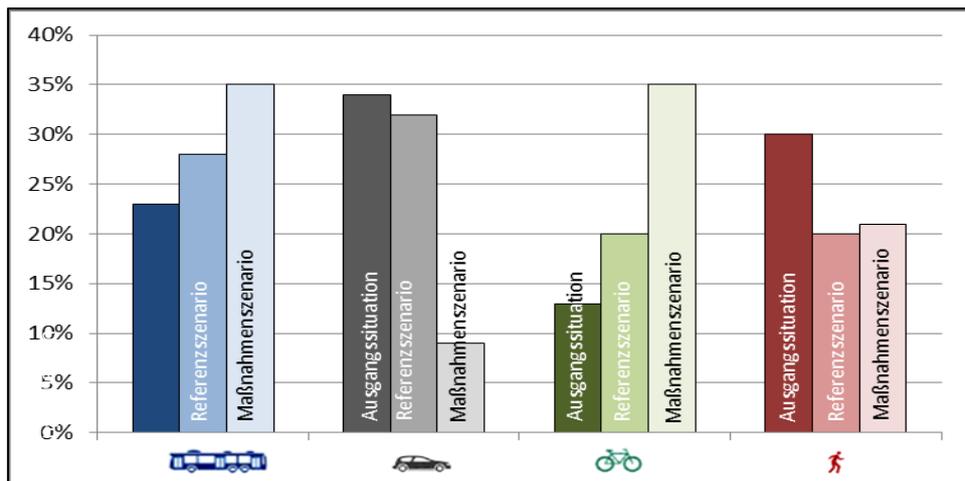


Abbildung 152: Gegenüberstellung des Modal Splits der Ausgangssituation im Referenz- und Maßnahmenzenario, eigene Darstellung (IBP).

## 7 Kosten und Finanzierung zur Umlenkung der bisherigen Ausgaben für Energie in Frankfurt am Main und Region

### 7.1 Einleitung

Das Verfolgen von Klima- und Umweltschutzzielen der Stadt Frankfurt am Main steht im direkten Zusammenhang mit der Finanzierbarkeit und den ökonomischen Folgen des Vorhabens. Die Vereinbarkeit von positiven Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekten mit den gesetzten Zielen ist ein ausschlaggebendes Argument für ein verstärktes Engagement zur Umgestaltung einer klimaneutralen Stadt. In Zeiten eher klammer kommunaler Kassen wird die Finanzierung und Kostenentwicklung oft als Abbruchkriterium oder nicht Umsetzungsfähig solcher Projekte herangezogen. Die erfolgreiche Umsetzung kann nur dann realisiert werden, wenn allen Akteuren der Mehrwert des Vorhabens aufgezeigt wird. Durch die Regionalisierung der Energiebezugsquellen kann die regionale Wertschöpfung gesteigert und dem Abfluss von Finanzmitteln nach Außen entgegengewirkt werden.

Unter regionaler Wertschöpfung werden die Gesamtheit der Leistungen regionaler Unternehmen und deren Nutzen für den Konsumenten, abzüglich der von der Region erbrachten Leistungen verstanden (Energien, Agentur für Erneuerbare, 2009). Die Elemente der Wertschöpfung lassen sich in direkte, indirekte und induzierte Effekten unterteilen. Die Summe aus allen drei Effekten ergibt die Gesamtwertschöpfung. Unter direkten Effekten werden zum Beispiel Gewinne der Kommune durch Steuereinnahmen, das Einkommen der Beschäftigten und regional verbleibende Zinsen verstanden. Sie sind offensichtlich und gut messbar. Indirekte Effekte ergeben sich aus der Umsetzung der Unternehmung. So wird die Nachfrage nach Gütern (z.B. Ersatzteile) oder nach Dienstleistungen diesen zugeordnet. Induzierte Effekte ergeben sich aus den direkten und indirekten Effekten. Unter ihnen ist die Verausgabung des entstanden Einkommens wie z.B. die Kaufkraft der Region zu verstehen (Raatz, 2011).

Der wirtschaftliche Kreislauf einer Region besteht aus der regionalen Produktion, dem regionalen Konsum und dem Saldo von Import und Export. Neben dem innerregionalen Kreislauf, in dem Ware produziert und abgesetzt wird, existiert der überregionale Kreislauf, der sich durch den Import und Export auszeichnet. Im Zuge der Globalisierung und dem Trend hin zu größeren Produktionsstätten kommt es zur Abwanderung von mittelständigen Betrieben zugunsten logistisch vorteilhafter Standorte. Dies hat den Verlust von Arbeitsplätzen, das Sinken der Kaufkraft in der Region und niedrigere Steuereinnahmen für die Kommune zur Folge. Weiter sinken die Exporteinnahmen der Region, da die Wertschöpfungspotenziale nicht ausgeschöpft werden. Gleichzeitig steigen die Importausgaben für Güter, die nicht mehr in der Region produziert werden (Gothe & Hahne, 2005).

Die Energiewende mit ihren dezentralen Charakter kann als Chance genutzt werden, um diesen Trend entgegen zu wirken und die Wertschöpfung aus Energieproduktion und Energieeffizienz in der Kommune zu steigern. Weiterhin spielt die Reduzierung der jährlichen Energiekosten eine tragende Säule. Wird weniger für Energie ausgegeben können Finanzmittel für andere Maßnahmen frei werden.

Durch die Umstellung des Energieversorgungssystems von konventionellen Energieträgern auf erneuerbare Energien wird der Import von Energierohstoffen und Endenergie durch heimische Energiequellen, Technologie und Dienstleistungen ersetzt. Folglich werden Ausgaben für den Energieimport eingespart. Durch den Ausbau der erneuerbaren Energien in der Region entstehen Arbeitsplätze, die Kaufkraft in der Region steigt und Unternehmen machen Gewinne, die wiederum in der Kommune versteuert werden (Hirschl, Aretz, & al, 2010). Demnach muss die regionalökonomische Optimierung eine zentrale Aufgabe der regionalen Energiepolitik werden. Somit müssen in erster Linie die Potenziale der vorhandenen erneuerbaren Energien einer Region ausgeschöpft und mittels Wertschöpfungskettenmanagement und geeigneten Finanzierungs- und Betreibermodellen optimiert werden (Hoppenbrock & Albrecht, 2010). Abbildung 153 verdeutlicht die Wirkung der regionalen Wertschöpfung. Die linke Bildhälfte zeigt den Abfluss von Rohstoffen und finanziellen Mitteln aus der Region. Dadurch muss mehr Ware importiert werden und der Export sinkt. Mit dem Abbau der Arbeitsplätze sinkt auch die Kaufkraft. In der rechten Bildhälfte erfolgt die Wertschöpfung in der Region. Die Finanz- und Rohstoffströme bleiben in der Region, ziehen Arbeitsplätze und Kaufkraft mit sich und verringern die Importquote. Der Export steigt und transferiert von außen Geld in die Region.

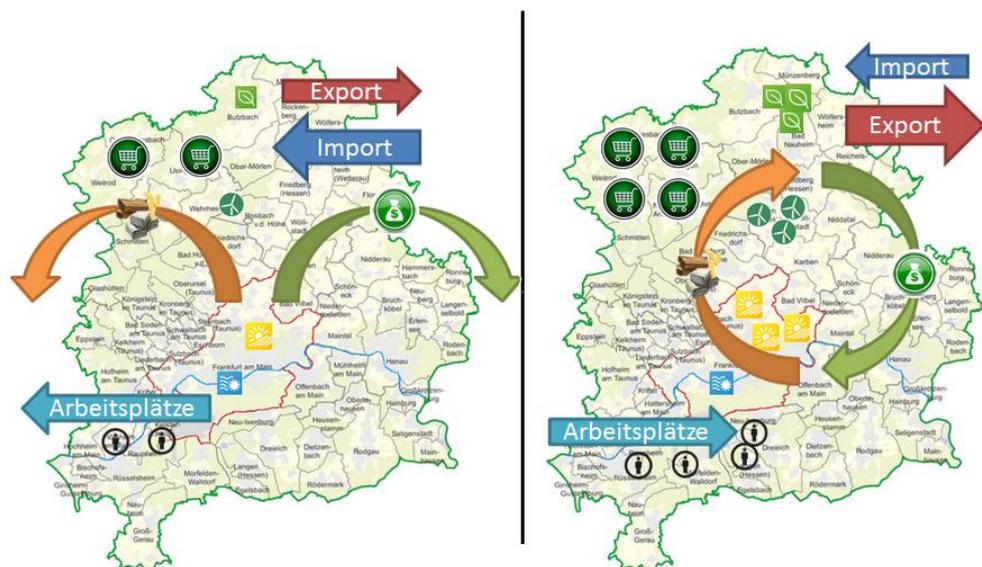


Abbildung 153: Effekte der regionalen Wertschöpfung in Frankfurt am Main und dem RheinMainVerbund

## 7.2 Methodik

Zu Beginn des Kapitels „Kosten und Finanzierung zur Umlenkung bisherigen Ausgaben für Energie in Frankfurt am Main und Region“ werden die Gesamtausgaben für den Einkauf von Energie der Stadt Frankfurt am Main sowie der Region durch seine Bewohner/innen dargestellt. Dabei wird eine differenzierte Darstellung nach den Sektoren Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistung, Industrie und Verkehr vorgenommen. Nach Darstellung der Ausgangssituation erfolgt auf Basis einer jährlichen inflationsbereinigten durchschnittlichen Preissteigerung von 2,5 Prozent eine Fortschreibung der jährlichen Ausgaben für fossile Energieträger bei gleichbleibenden bzw. moderat sinkenden Energieverbrauchswerten bis 2050. Diese werden mit den Investitionskosten des vom Fraunhofer ISE empfohlenen Zielenergiesystemszenarios verglichen.

Weiter erfolgt eine Gegenüberstellung der Stromgestehungskosten unterschiedlicher Energieerzeugungstechnologien. In den vergangenen Jahren sind die Produktions- und Systemkosten von erneuerbaren Energieanlagen deutlich gesunken. Dies hat dazu geführt, dass diese bald auch ohne Förderung wettbewerbsfähig gegenüber fossilen Energiesystemen sind. Aufgrund der innerstädtischen Potentiale wird der Fokus auf die Solarenergie und Speichertechnologie ausgerichtet sein.

Einfache Rechenbeispiele zu Effizienzmaßnahmen wie beispielsweise der Austausch von Umwälzpumpen in Haushalten oder Einsatz von LED-Leuchten im GHD Sektor werden beispielhaft für ganz Frankfurt am Main hochgerechnet.

Im Wärmesektor werden die Kosten einer breiten energetischen Sanierung sowie die Umsetzung neuer effizienter Anlagentechnik monetär bewertet. Anhand der Beispiele wird der monetäre Gesamtnutzen für die Stadt dargestellt.

In allen Sektoren werden lediglich die direkten bzw. messbaren Kosteneinsparungen bei der Umstellung des derzeitigen Energiesystems betrachtet. Die Berücksichtigung von indirekten und induzierten Effekten kann seitens des Fraunhofer IBP nicht vorgenommen werden.

Als letzter Teil dieses Kapitels werden die bisherigen Finanzierungsmodelle mit neuen Finanzierungsformen und deren Vor- und Nachteile gegenübergestellt.

### 7.3 Bisherige Energiekosten der Stadt Frankfurt am Main

Im folgenden Abschnitt werden die Kosten für Energie (Strom, Wärme und Mobilität insgesamt) dargestellt. Basis sind die Energieverbräuche des Jahres 2010 und der Annahme eines bis 2013 gleichbleibenden Energieverbrauchs. Als Strompreise für Haushalte (28,7 ct/kWh inkl. MwSt.), kleine/mittlere GHD (21,5 ct/kWh) und Industrie (rund 5-10 ct/kWh) werden die Strompreise nach BMWi 2013 Zahlen und Energie herangezogen (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2013). Für den GHD Sektor wurden 20 Prozent niedrigere Energiepreise angenommen, da diese Sondervertragskunden sind. Die Großindustrie welche auch im Industriepark Höchst angesiedelt ist produziert dabei zu geringeren Preisen, da sie ihre eigenen Kraftwerke besitzt. Tabelle 7 stellt die Energiepreise für die in Frankfurt am Main eingesetzten Energieträgern dar.

Tabelle 7: Brennstoffpreise für die Jahre 2010 und 2013 nach Sektoren nach (BDEW, 2014)

<b>Haushalte (einsch. MWSt)</b>	<b>Einheit</b>	<b>2010</b>	<b>2013</b>
- Heizöl leicht	€ct/kWh	6,55	8,35
- Erdgas	€ct/kWh	6,36	7,13
- Fernwärme	€ct/kWh	6,36	7,12
- Brikets	€ct/kWh	5,04	5,04
- Strom	€ct/kWh	23,69	28,73
<b>Mittlere GHD (einsch. MWSt)</b>			
- Heizöl leicht <sup>1)</sup>	€ct/kWh	5,24	6,68
- Erdgas	€ct/kWh	5,09	5,70
- Fernwärme	€ct/kWh	5,09	5,69
- Brikets	€ct/kWh	4,03	4,03
- Strom	€ct/kWh	18,95	22,98
<b>Industrie (ohne MWSt)</b>			
- Heizöl schwer <sup>1)</sup>	€ct/kWh	3,54	4,53
- Heizöl leicht <sup>1)</sup>	€ct/kWh	5,23	6,80
- Erdgas	€ct/kWh	2,93	3,37
- Strom (ohne Stomsteuer)	€ct/kWh	10,84	13,34
<b>Verkehr (einsch. MWSt)</b>			
- Superbenzin	Euro/l	1,42	1,61
- Diesellostoff	Euro/l	1,23	1,45

Werden die Energiepreise für 2010 und für 2013 wie in Tabelle 7 den gesamten Endenergieverbrauch (Strom, Wärme, Mobilität) der Stadt Frankfurt am Main von 2010 grob berechnet, entstehen Ausgaben von **über 2,2 Milliarden Euro**. Abbildung 154 zeigt die Aufteilung nach Haushalte, GHD, Industrie und Verkehr. Bei angenommenem gleichbleibendem Energieverbrauch für das Jahr 2013 wie 2010 und einer Preissteigerung zwischen 2010 und 2013 wie in Tabelle 7 dargestellt erhöhen sich die Gesamtausgaben von **rund**

**2.201 Mio. Euro auf 2.603 Mio. Euro.** Ein Anstieg der Ausgaben für Energie in sämtlichen Sektoren von **400 Mio. Euro in nur 3 Jahren.** Der Gewerbe, Handel, Dienstleistung (GHD) Anteil liegt mit rund 884 Mio. Euro für 2013 am höchsten, gefolgt vom gesamten Verkehrssektor mit 637 Mio. Euro und den Haushaltssektor mit 571 Mio. Euro.

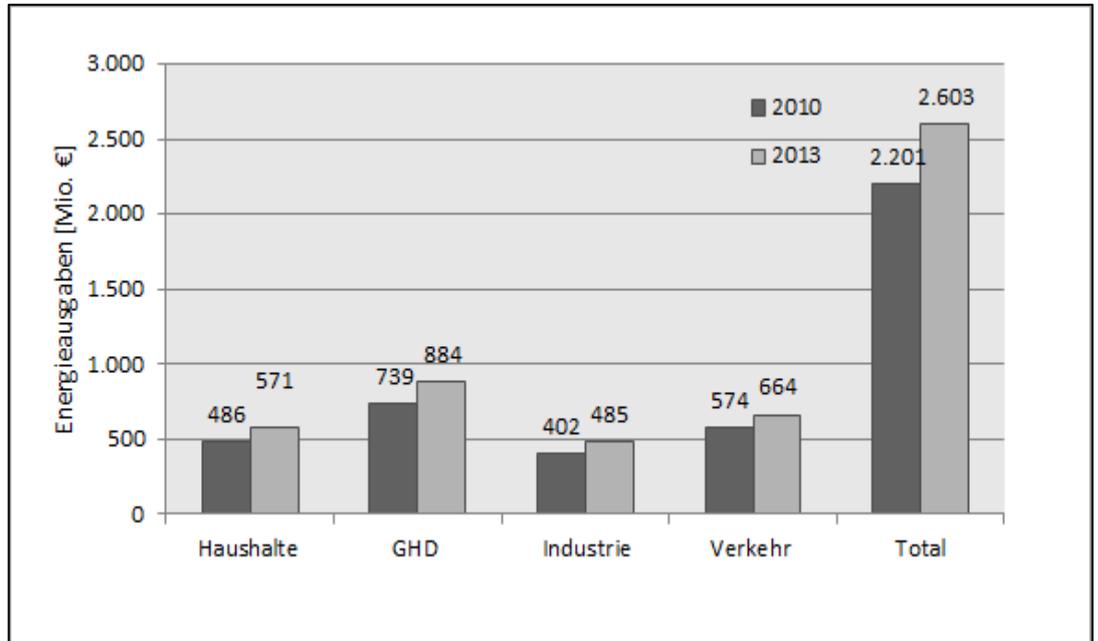
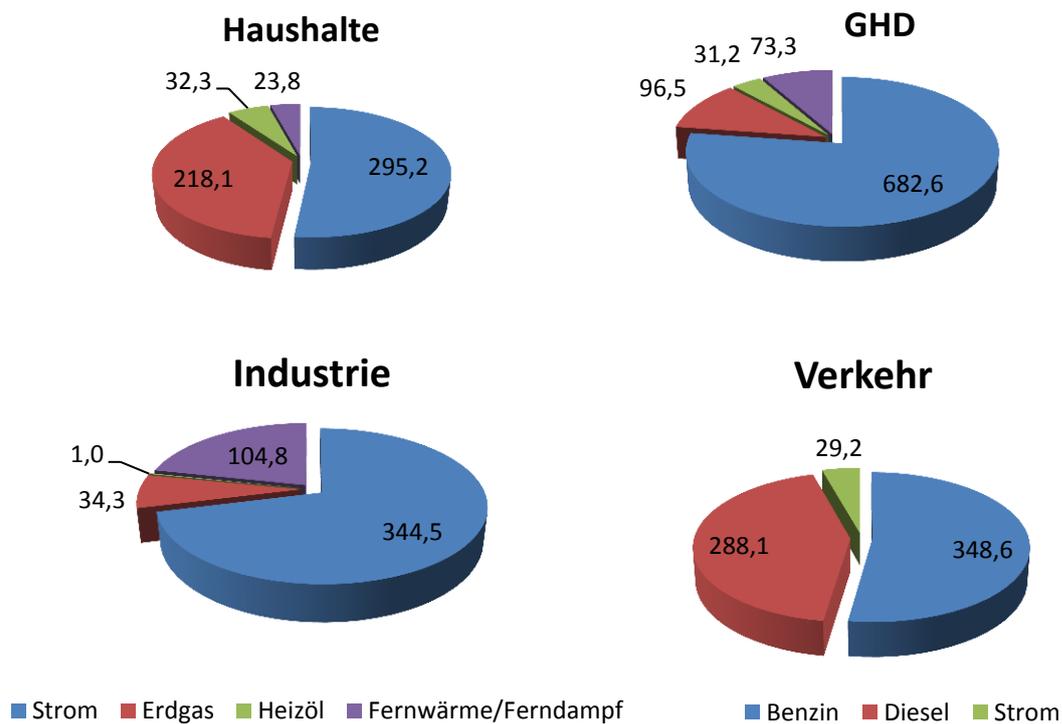


Abbildung 154: Vergleich der Energieausgaben der Stadt Frankfurt am Main für 2010 und 2013

Folgende Abbildungen zeigen die Ausgaben in Frankfurt am Main für Strom, Erdgas, Heizöl, Fernwärme und Ferndampf der Haushalte, dem GHD Sektor und der Industrie. Weiter wird im Verkehrssektor zwischen Benzin, Diesel und Strom unterschieden.



Dabei muss für den Verkehrssektor berücksichtigt werden, dass hier auch die Kosten nicht nur für den innerstädtischen Verkehr sondern auch für den Quell-Ziel Verkehr berechnet wurden, da er den Energieverbrauch der Stadt Frankfurt am Main ebenfalls beeinflusst. Der Strompreis für Straßen- und U-Bahnen wurde mit dem gleichen Strompreis der Industrie angenommen. Die Grafiken zeigen, dass Strom in allen Sektoren die höchsten Ausgaben verursacht. Für Strom wird insgesamt rund 1,3 Milliarden Euro im Jahr 2013 ausgegeben. Dies begründet, durch einen hohen Anteil weiterer Abgaben wie Steuern, Konzessionsabgaben, EEG-Umlage etc. beinhaltet wie im folgenden Kapitel deutlich wird. Die Ausgaben für Erdgas beziffern sich auf rund 350 Mio. Euro, für Fernwärme und Ferndampf auf rund 202 Mio. Euro und für Heizöl auf rund 64 Mio. Euro.

#### 7.4 Strom und Erdgas und sein Einfluss auf die innerstädtische Wertschöpfung

Werden allein die Bestandteile des Strompreises wie in Abbildung 155 dargestellt, wird deutlich, dass nur ein gewisser Anteil direkt von externen Energieträgerkosten abhängig ist. Dabei variieren die reinen Stromgestehungskosten für eine Kilowattstunde Strom je nach Energieträger, Art und Alter der Strom erzeugenden Anlage. Beispielsweise sind Stromgestehungskosten aus abgeschriebenen Atomkraftwerken oder Kohlekraftwerken günstig, da die direkten Energieträgerkosten gering und der CO<sub>2</sub>-Preis kaum Einfluss nehmen kann. Auf der anderen Seite produzieren auch abgeschriebene Solar- und Windkraftanlagen Strom mit einem Energieträgerpreis von Nahe Null, da

Wind- und Solarenergie keine Brennstoffkosten besitzen. Mit der Zunahme abbezahlter Solar- und Windkraftanlagen besteht der Strompreis nur mehr aus weiteren Ausgaben wie Transport, Speicher, Vertrieb und weiteren Umlagen und Steuern, siehe Abbildung 155.

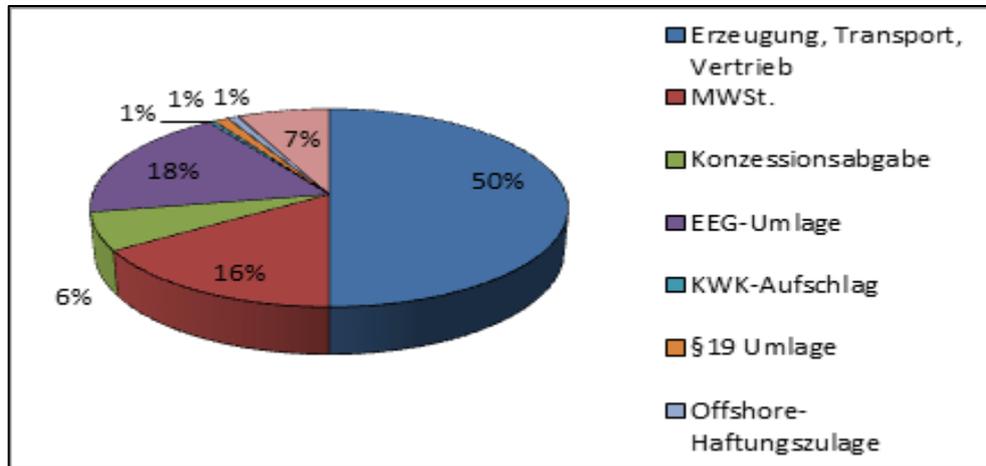


Abbildung 155: Zusammensetzung des Strompreises nach (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2013)

Für eine grobe Berechnung der Umverteilung der Energieausgaben wird angenommen, dass Energieträgerkosten von Erdgas und Kohle mit Kosten zur Stromproduktion von rund 5 bis 6 ct pro kWh (Werte 2013) nicht mehr aus Frankfurt am Main abfließen. Erdgas und Kohle werden sozusagen durch die innerstädtische und regionale Eigenproduktion aus erneuerbaren Energien substituiert. Hochgerechnet für die innerstädtische Erzeugung in der Stadt Frankfurt am Main und dem Bundesland Hessen von 5.579 GWh Jahr 2050 würden Ausgaben für Energieträger im Wert zwischen rund 279 und 335 Mio. Euro in der Stadt und im Bundesland Hessen bleiben. Allein für das Jahr 2050 und bei keiner weiteren Preissteigerung der fossilen Energieträgerkosten. Dies verdeutlicht, je schneller der Übergang zu erneuerbaren Energien erreicht würde, je geringer sind die kumulierten Ausgaben an fossilen Energieträger nach außen.

In wieweit sich Strom- und Mehrwertsteuer als auch andere Umlagen in den nächsten Jahren verändern wenn ein hoher Anteil der Verbraucher oder Konsumenten zu sogenannten „Prosumern<sup>24</sup>“ werden, kann hier nicht untersucht werden, sollte aber öffentlich diskutiert werden.

<sup>24</sup> Prosumer beziehen nicht nur Energie sondern erzeugen diese. Nicht verbrauchter Strom speichern Prosumer in Batteriespeichern oder laden ihre Elektroautos und geben Teile des nicht benötigten Stroms an Nachbarn oder der Allgemeinheit über das Stromnetz ab.

Es kann jedoch weiter davon ausgegangen werden, dass private Haushalte als auch GHD Betriebe eine tragende Rolle des künftigen Energiesystems einnehmen und damit auch die Wertschöpfung der gesamten dezentralen Erzeugung sich auf viele Haushalte und GHD Betriebe aufteilen. Dennoch werden nicht alle Haushalte besonders in Städten wie Frankfurt am Main in der Lage dazu sein. Die Stadt und seine Energieversorger werden auch künftig eine bedeutende Rolle in der Energielandschaft Frankfurt am Main spielen, auch in der sie Bewohnern, Flächen zur Eigenversorgung zur Verfügung stellt bzw. verpachtet oder selber dezentrale Erzeugungsanlagen aufbaut. Schulen und andere kommunale Gebäude sind heute und werden künftig vermehrt zu Prosumer. Sie produzieren ihren eigenen Strom mittels KWK-Anlagen oder PV-Anlagen und verbrauchen ihn auch selbst. Der Anteil selbsterzeugter Strom wird sich weiter erhöhen wenn Speicherkosten fallen. Auch wird der eigenerzeugte Strom für mehr und mehr E-Fahrzeuge genutzt. Eine Zunahme von Elektroautos führt zu einem Anstieg der lokalen und regionalen Wertschöpfung, da der selbsterzeugte Strom aus KWK oder Solarenergie Zuhause oder im Büro die Fahrt zur Tankstelle größtenteils überflüssig macht.

Energieversorger und Stadtwerke können vermehrt Solaranlage, BHKWs oder auch Wärmepumpe verpachten und bieten somit nur das Endprodukt Licht oder Wärme an.

Neben dem Strompreis mit seinen unterschiedlichen Bestandteilen ist Erdgas der weitaus bedeutendste Energieträger in Frankfurt am Main. Erdgas wird nicht nur zur Stromerzeugung sondern auch zu Wärmeerzeugung verbrannt. Erdgas hat einen Anteil zur Wärmeversorgung bei den Haushalten von 80 Prozent, im GHD Sektor liegt der direkte Anteil im Wärmesektor bei rund 44 Prozent. Abbildung 156 zeigt die Bestandteile des zusammengestellten Erdgaspreises für Beschaffung und Vertrieb, Steuern, Netznutzung und Konzessionsabgaben.

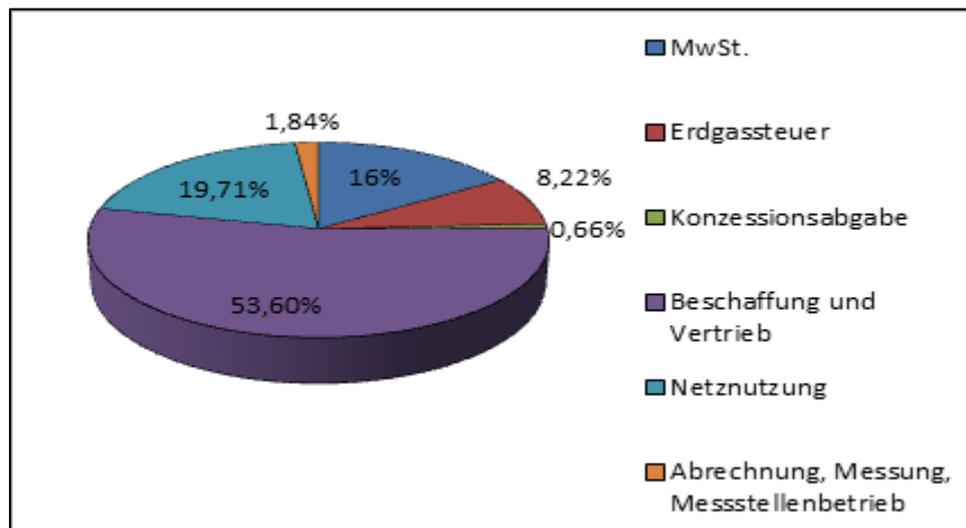


Abbildung 156: Zusammensetzung des Gaspreises nach (Bundesnetzagentur, 2014), eigene Darstellung IBP.

Anderes als beim Strom würden dem Bund fehlende Einnahmen durch ausbleibende MwSt., Erdgassteuer etc. bei der vollständigen Substitution von Gas durch die Nutzung von Biomasse, Solarthermie und Wärmepumpen entstehen. Die Stadt Frankfurt am Main kann dagegen mit keinen Rückgängen der Einnahmen rechnen. Zudem würden entgehende Einnahmen aus der Erdgassteuer für den Bund durch die Stromsteuer für Strom der Wärmepumpen kompensiert. Inwieweit die Installation der Anlagen direkte Einnahmen aus der Umsatzsteuer und dem Verkauf der Anlagen generiert werden, kann leider hier nicht berechnet werden.

Steigende Strompreise sind für einen Ausbau von Wärmepumpen die größtenteils mit Windstrom betrieben werden eher kontraproduktiv. Geringere Umlagen und Steuern für Gas- und Erdöl gegenüber Strom welcher auch für eine Wärmewende gebraucht wird, reduziert die Wettbewerbsfähigkeit von erneuerbaren Energieträgern im Wärmesektor. Sollen die Ziele einer klimaneutralen Energiesystems für Frankfurt am Main erreicht werden, müssen Reformen dazu führen, dass erneuerbare Energien im Wärmesektor nicht nur ökologisch die attraktivsten Energieträger werden.

Werden Erdgas und Heizöl bis 2050 ganz durch erneuerbare Energien substituiert, reduzieren sich Energieausgaben im Wert von rund 314 Mio. Euro für Erdgas und 63,5 Mio. Euro für Heizöl gegen Null. Der Sektor Industrie wurde bei dieser Betrachtung nicht berücksichtigt. Bei einem Anteil von 54 Prozent für die Beschaffung und Vertrieb würden bei Energieträgerpreisen von 2013 **jährlich 168 bzw. 34 Mio. Euro nicht aus der Stadt abfließen.**

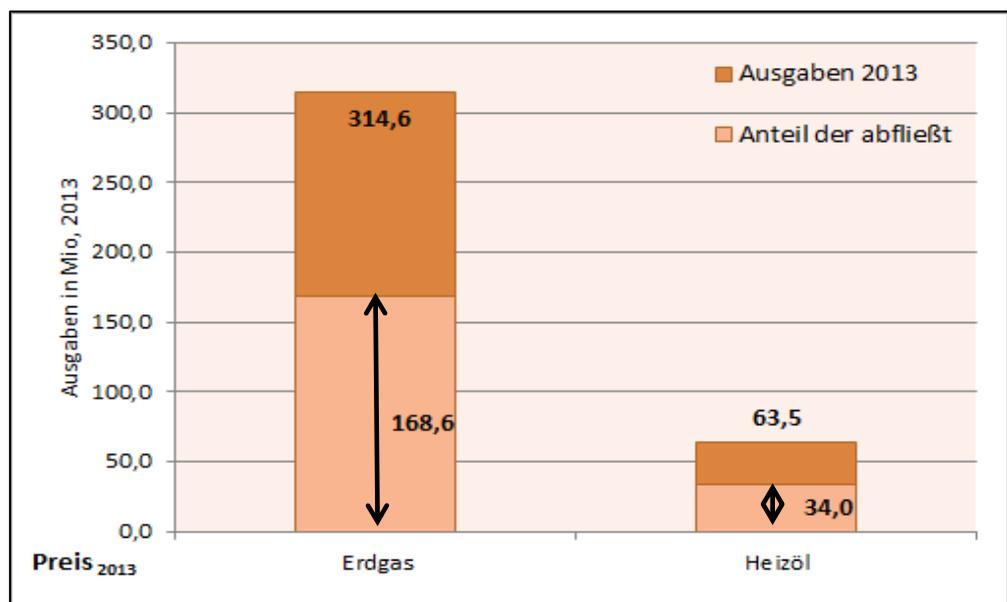


Abbildung 157: Ausgaben für Gas und Heizöl 2013 und sein Anteil für Beschaffung und Vertrieb

Damit würden weitere rund 202 Millionen Euro in der Stadt zirkulieren. **Bei einer nominalen Preissteigerung von nur 2,5 Prozent pro Jahr summieren sich die in der Stadt gehaltenen Ausgaben bis 2050 auf 12 Milliarden Euro.**

**den Euro.** Der Gas-Anteil welcher für die Fernwärme mitverbrannt wird bleibt unberücksichtigt.

Somit kann mit der Umstellung auf erneuerbare Energien der Abfluss der Finanzmittel von jährlich 202 Mio. Euro nach Außen entscheidend entgegen gewirkt werden.

## 7.5 Heute und künftige Entwicklung unterschiedlicher Energieträgerkosten

Die Entwicklung der Strom- und Wärmegestehungskosten von erneuerbaren Energien ist in den letzten Jahren deutlich gesunken. Einen gegenläufigen Entwicklung lässt sich bei den Gestehungskosten konventioneller Kraftwerke feststellen. Durch den massiven Ausbau der erneuerbaren Energien und deren Vorrangspeisung kommt es zu immer geringeren Laufzeiten von Großkraftwerken, die einen wirtschaftlichen Betrieb in Frage stellen. Zukünftig ist zu erwarten, dass sich dieser Trend weiter fortsetzen wird.

In Abbildung 158 werden Stromgestehungskosten verschiedener erneuerbarer Energien, neu errichteten konventionellen GuD-Kraftwerken gegenübergestellt (Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme, 2013). In Abhängigkeit der Einstrahlung (1.000 bis 1.200 kWh/m<sup>2</sup>) und des Anlagentyps (Freifläche oder Dachanlage) ergeben sich bei spezifischen Investitionskosten von 1.000 bis 1.800 Euro pro kW Stromgestehungskosten zwischen 7,8 und 14,22 €ct/kWh. Damit liegen die Stromgestehungskosten von PV-Anlagen deutlich unterhalb des Strompreises für Haushalte (2013: 0,289 Euro/kWh) welcher zu einem steigenden Eigenverbrauch des eigenerzeugten Stroms führt.

Die Höhe der spezifischen Stromgestehungskosten von neu errichteten Onshore WEA an sehr guten Standorten liegt schon heute unterhalb der Stromgestehungskosten konventioneller Steinkohle- und GuD-Kraftwerke. In Abhängigkeit des Standortes produzieren diese eine Kilowattstunde Strom für 4,5 ct bis 10,7 €ct/kWh.

Die Erzeugung von Strom aus Braunkohle liegt aufgrund des derzeit nicht funktionierenden CO<sub>2</sub>-Zertifikathandels bei 3,8 bis 5,3 €ct/kWh. Analog zur Braunkohle können die niedrigen Stromgestehungskosten von Steinkohlekraftwerken (6,3 – 8 €ct/kWh) mit den niedrigen Zertifikatspreisen erklärt werden. Die Stromgestehungskosten von Gas- und Dampfkraftwerken liegen zwischen 7,5 bis 9,8 €ct/kWh und somit auf einem ähnlichen Niveau wie die Stromgestehungskosten einer PV-Dachanlage.

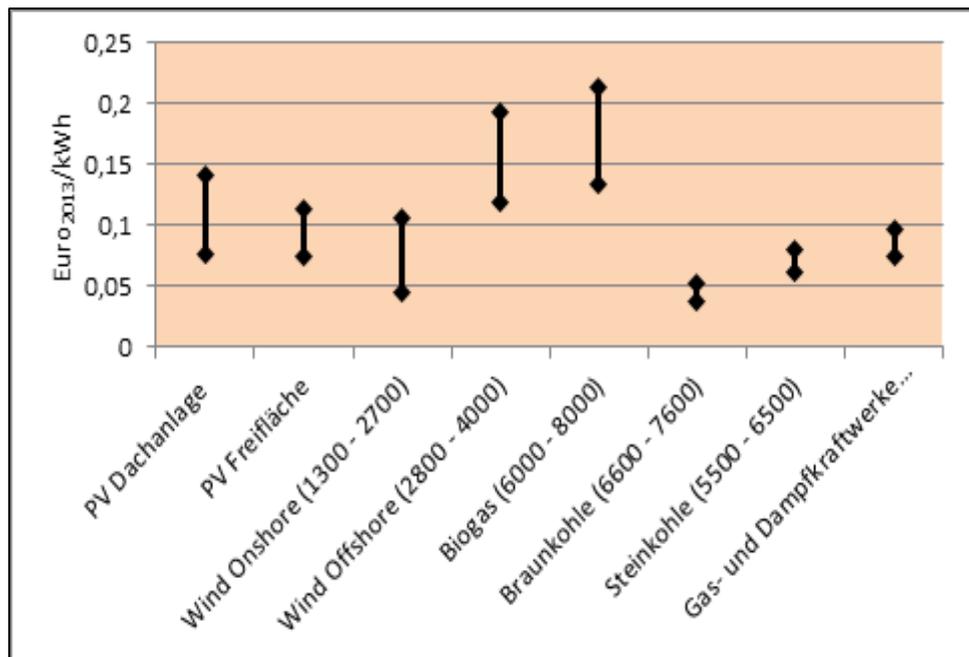


Abbildung 158: Vergleich der Stromgestehungskosten erneuerbarer und fossiler Kraftwerke, (Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme, 2013).

Bei Betrachtung der mittelfristigen Entwicklung bis 2020 für Frankfurt am Main bedeutender Systemkombinationen liefert die Studie der UBS einen guten Überblick. Die Studie untersucht die Amortisationszeiten und die Kapitalrendite der Kombination aus Solaranlage, elektrischen Speicher sowie einem Elektroauto.

Abbildung 159 zeigt, dass sinkende Preise für PV-Anlagen, elektrischen Speicher für den Keller dazu führen, dass schon ab 2020 Amortisationszeiten unter 8 Jahren erreicht werden können und der ROI (Return on Investment) bzw. die Kapitalrendite bei 7,3 Prozent liegt (Reneweconomy, 2014). Dabei geht die UBS Studie davon aus, dass der Preis für elektrische Speicher (Keller und E-Fahrzeug) sich bis 2020 halbieren wird. Insbesondere für die 26 Prozent Einfamilien- und Zweifamilienhausbesitzer in Frankfurt am Main wären solche kombinierten Systeme interessant. Auch für Wohnungsgesellschaften welche sich mit Energieversorgern zu kombinierten Angeboten zusammenschließen, könnten Mietern einen hohen Anteil Solarenergieanteil vom eigenen Dach oder dem Nachbardach anbieten.

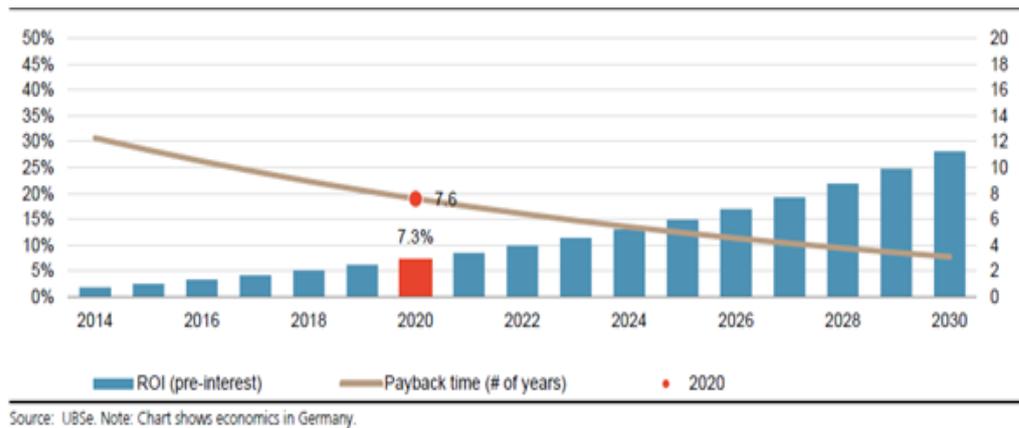


Abbildung 159: Amortisationszeit und Rendite eines Solar+Speicher Systems in Deutschland

Neben den Frankfurter Haushalten werden durch den Preisrutsch bei Solar- als auch bei elektrischen Speichern Kombilösungen auch für Unternehmen im GHD Sektor interessant, da zudem in büroähnlichen Betrieben, Logistikfirmen, Hotels etc. der Verbrauch und Solarproduktion gut miteinander korrelieren.

## 7.6 Reduzierung der Energieausgaben bei Umsetzung ausgewählter Maßnahmen

Im folgenden Abschnitt werden ausgewählte Maßnahmen im Bereich Energieeinsparung und Energieeffizienz grob berechnet und ihren Einfluss auf die lokale und regionale Wertschöpfung diskutiert. Unterschieden wird jeweils zwischen Beispielmaßnahmen in den Haushalten, im GHD Sektor sowie im Verkehrssektor Frankfurts. Dadurch soll gezeigt werden wie sich Ausgaben für Strom, Wärme und Verkehr reduzieren oder umlenken lassen.

### 7.6.1 Reduzierung der Energieausgaben durch Energieeinsparung

Eine Hauptmaßnahme Energieausgaben zu reduzieren ist der effiziente Umgang mit Energie. Dabei muss Energieeinsparung nicht mit Verzicht im Einklang stehen. Infrastrukturelle Maßnahmen beispielsweise der Ausbau von Fahrradwegen kann langfristig zu einem erhöhten Fahrradanteil in der Stadt und Region führen. Auch müssten Ausgaben nicht immer kostenintensiv für die Kommune sein. Gesetzesänderungen und Mindeststandards für mehr Energieeffizienz fördern auch die Innovationskraft der Unternehmen in Frankfurt am Main und Umgebung. Im Folgenden zeigen drei Beispiele wie derzeitige Ausgaben durch Energieeinsparung bei den Haushalten, im GHD-Sektor und im Verkehrssektor reduziert werden können.

#### **Beispiel 1: Energieeinsparung durch energetische Sanierung in den Frankfurter Haushalten**

Durch konsequente Umsetzung der energetischen Sanierung reduziert sich der Wärmebedarf der Haushalte bis 2050 von 3.830 GWh auf 1.034 GWh um rund 70 Prozent. Bei durchschnittlichen Brennstoffkosten für Haushalte von 7 bis 8 ct/kWh (Erdgas, Fernwärme und leichtes Heizöl, 2013) reduzieren sich die Ausgaben aller Frankfurter Haushalte um jährlich 230 Mio.

Zur Berechnung der Ausgaben zur energetischen Sanierung werden energiebedingte Mehrkosten<sup>25</sup> von rund 150 Euro pro m<sup>2</sup> Wohnfläche nach (Dena, 2010) und (Dena, 2012) angenommen.

Eine Reduzierung des Wärmebedarfs von rund 60-70 Prozent würden für Frankfurt am Main kumulierte Ausgaben von jährlich rund 3,6 Milliarden bis 2050 bedeuten und somit weit unterhalb der kumulierten Ausgaben für Energie liegen.

### **Beispiel 2: Energieeinsparung durch Energiemanagementlösungen im GHD Sektor**

Als weiteres Beispiel zur Energieeinsparung kann der Einsatz von Energiemanagementlösungen genannt werden. Gerade der GHD Sektor bietet ein hohes Potential zur Umsetzung einfacher Energiemanagementlösungen um den Energieverbrauch transparenter und übersichtlicher zu gestalten und unnötige Verbraucher aufzuspüren, siehe Maßnahmenbeschreibung in Kapitel 4.3.

Bei der Beispielrechnung zur Reduzierung der Energieausgaben wird davon ausgegangen, dass bis 2050 rund die Hälfte aller GHD Betriebe Frankfurts softwarebasierte Energiemanagementlösungen eingeführt haben. Dadurch reduziert sich der Energieverbrauch um rund 15 Prozent im GHD-Sektor. Bei einem derzeitigen durchschnittlichen Strompreis für das mittlere Gewerbe von rund 23 ct/kWh (Stand 2013) würde Ausgaben im Wert von 51 Mio. Euro pro Jahr vermieden. Bei einer nominalen Strompreissteigerung von 2,5% pro Jahr steigen die jährlichen Ausgaben bis 2050 auf rund 128 Mio. Euro. Die Kosten zur Einführung eines Energiemanagementsystems sind von der Größe des Unternehmens abhängig. Für den Großteil des mittleren Gewerbes lohnen sich solche Systeme bisher jedoch nicht. Systeme welche auch von Energieversorgern angeboten werden könnten und die Einführung von Smart-Metern können künftig die Kosten stark reduzieren.

### **Beispiel 3: Energieeinsparung im Verkehrssektor durch langfristige Infrastrukturmaßnahmen**

Auch im Verkehrssektor lassen sich jährliche Energieausgaben, Instandhaltungskosten für den steigenden MIV als auch externe Kosten wie Luftverschmutzung durch langfristige Infrastrukturmaßnahmen zu Gunsten einer erhöhten Lebensqualität erzielen. Maßnahmen wie in Kapitel 6 beschrieben, die den Fußgänger- und Fahrradanteil erhöhen, sind mit erhöhten anfänglichen Investitionskosten verbunden. Die hohen Investitionskosten reduzieren neben Ausgaben für Treibstoff jedoch weitere Kosten für Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten der Infrastruktur wie Straßen, Parkplätze, Brücken etc. der Stadt

---

<sup>25</sup> Berücksichtigt werden in diesem Fall nur die Kosten der energetischen Sanierung. Kosten welche sowieso durch die Instandhaltung stattfinden, finden keine Berücksichtigung in dieser Rechnung.

Frankfurt am Main. Die Studie von (Protected Bike Lanes mean business, 2014) stellt vier weitere Gründe vor, welche die Wirtschaft und somit die lokale Wertschöpfung in einer Stadt ankurbeln:

1. *Fahrradwege und ÖPNV Anbindungen machen Immobilien wertvoller;*  
Dies bedeutet, je näher Immobilien an Fahrradwegen sind je wertvoller sind diese Immobilien. Dies gilt ebenfalls für die Nähe von ÖPNV Anbindungen.
2. *Fahrradwege kurbeln den Umsatz im Handel an;*  
Nach der zitierten Studie fahren Fahrradfahrer langsamer an Geschäften vorbei und können die Schaufenster besser betrachten. Dadurch ist die Wahrscheinlichkeit höher, dass sie anhalten und das Geschäft betreten als dies bei Autofahrern der Fall ist. Weiterhin führt eine geringere Anzahl Parkplätze nicht dazu, dass weniger eingekauft wird.
3. *Mitarbeiter sind fitter und produktiver, wenn sie zu Fuß oder mit Fahrrad unterwegs sind;*  
Nach einer Untersuchung in den USA wären Arbeitnehmer die regelmäßig mit dem Fahrrad zur Arbeit kommen im Schnitt 32 Prozent seltener krank, 52 Prozent produktiver und hätten Gesundheitskosten, die um 55 Prozent niedriger liegen als Kollegen, die mit dem Auto ins Büro kommen.
4. *Mehr Fahrradwege und eine gute ÖPNV Anbindung machen Arbeitgeber attraktiver;*  
Neben dieser Tatsache benötigen Unternehmen geringere Flächen für Parkplätze, wenn sie nahe an Fahrradwegen liegen, dies ist besonders in einer dichtbesiedelten Stadt in der Parkplatzraum rar ist, bedeutsam. Nicht genutzte Parkplätze können für andere Funktionen des öffentlichen Lebens genutzt werden (Wohnen, Grünflächen und Geschäfte);

Diese Untersuchungen sind zwar schwer in ökonomische Zahlen für Frankfurt am Main quantitativ zu berechnen, zeigen jedoch, dass die Umlenkung der Mittel für eine nachhaltige Infrastruktur nach dem Konzept der kurze Wege und der Ausbau des ÖPNVs weit mehr wirtschaftlichen Einfluss besitzt als oft angenommen wird.

#### 7.6.2 Verschiebung und Reduzierung der Ausgaben durch Energieeffizienzmaßnahmen

Neben der Energieeinsparung spielen auch Effizienzmaßnahmen eine bedeutende Rolle zur Reduzierung des Energieverbrauchs. Dazu werden folgend zwei weitere Beispielrechnungen zur Reduzierung der Ausgaben durch Energieeffizienzmaßnahmen und sein Einfluss auf die lokale Wertschöpfung in Frankfurt am Main und Region beschrieben.

#### Beispiel 4: Energieeffizienz durch den Austausch von Umwälzpumpen in Haushalten

Als Energieeffizienzmaßnahme zur Reduzierung des Strom- und Wärmebedarfs in Haushalten wurde im Kapitel 5.4 der Austausch von Umwälzpumpen durch hocheffiziente dezentrale Umwälzpumpen genannt. Bei vollständiger Umsetzung dieser Maßnahme durch beispielsweise eine Abwrackprämie für ineffiziente Umwälzpumpen würden sich der Wärmebedarf um 19 Prozent und der Stromverbrauch um 53 Prozent gegenüber einer Standardumwälzpumpe reduzieren. Als weiteres gutes Beispiel kann das bestehende Infoblatt für effiziente Umwälzpumpen des Energiereferats der Stadt Frankfurt am Main und der Mainova AG genannt werden. Dargestellt werden die direkten Kosten zwischen einer unregelmäßig betriebenen Pumpe und einer hocheffizienten Umwälzpumpe, siehe Tabelle 8 (Energiereferat Stadt Frankfurt am Main, 2000)

Es wird bei diesem groben Rechenbeispiel davon ausgegangen, dass in der Hälfte der 31.200 Einfamilienhäuser Frankfurts eine unregelmäßig betriebene Heizungspumpe installiert ist. Eine Hochrechnung der jährlichen Stromkosten von 26 Euro gegenüber 145 Euro würde für die Hälfte der Frankfurter Haushalte jährliche Stromkosten von 405.600 Euro gegenüber 2,26 Mio. Euro bedeuten. Somit würden 1,85 Mio. Euro eingespart. Tendenz mit steigenden Stromkosten steigend.

Tabelle 8: Stromverbrauch von Heizungspumpen im Einfamilienhaus, (Energiereferat Stadt Frankfurt am Main, 2000) und angepasste Rechnung (Fraunhofer IBP)

<b>Beispiel für Heizungspumpen im Einfamilienhaus oder bei Etagenheizungen</b>	Durchschnittliche Pumpenleistung in Watt	Stromverbrauch pro Jahr in kWh/a	Stromkosten in Euro pro Jahr (28ct/kWh)
Unregelmäßig betriebene Pumpe (ohne hydraulischen Abgleich)	85	519	145
Elektronisch druckgeregelte Pumpe (mit hydraulischem Abgleich)	45	274	77
Hocheffiziente druckgeregelte Pumpe (mit hydraulischem Abgleich)	15	92	26

#### Beispiel 5: Einsatz von effizienten LEDs im GHD-Sektor

Wie in Kapitel 4.3 beschrieben beläuft sich der Anteil der Beleuchtung am Gesamtstromverbrauch im GHD Sektor auf durchschnittlich 40 Prozent. Insbesondere der Einzelhandel, büroähnliche Betriebe und die Logistik haben einen überdurchschnittlichen hohen Bedarf an Beleuchtung. Durch den flächendeckenden Einsatz von LEDs kann der Stromverbrauch im GHD Sektor um bis zu 75 Prozent gegenüber Altanlagen reduziert werden. Es wird davon ausgegangen, dass die meisten GHD Betriebe schon effizientere Leuchten besitzen, so dass die Einsparung durch neue LEDs eher bei rund 30 bis 40 Prozent geschätzt wird. Bei derzeitigen Strompreisen von rund 23 ct/kWh im mittleren Gewerbe und im Handel würden dies für Frankfurt am Main und seinen ho-

hen Anteil an GHD Betrieben Einsparungen in Höhe von 96 Mio. Euro pro Jahr bedeuten.

## 7.7 Finanzierungsmodelle zur Erreichung der Klimaschutzziele

Als letzten Abschnitt werden unterschiedliche Förder- und Finanzierungsmodelle vorgestellt, die helfen können die gesteckten Ziele Frankfurts zu erreichen. Neben einer kurzen Beschreibung werden auch die Vor- und Nachteile der Modelle die Bedeutung für die Stadt Frankfurt am Main kurz beschrieben.

### 7.7.1 Bestehende Förderungsinstrumente für den Ausbau von regenerativen Energien

Zunächst sollen die derzeit bestehenden Förderinstrumente wie das Erneuerbaren Energien Gesetz, EEG für regenerative Erzeugungstechnologien im Strom- und Wärmesektor aufgezeigt werden.

#### 7.7.1.1 Erneuerbare Energiegesetz EEG – Reform und deren Auswirkungen auf regenerative Energieprojekte im Stromsektor

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) ist der wichtigste Baustein für den Ausbau der regenerativen Energien und unterliegt durch politische Entscheidungen ständig Änderungen. Im Jahr 2014 wurde das EEG reformiert und trat zum 1. August 2014 in Kraft. Die Hauptziele der Reform nach (BMW 2014) sind:

- Kosten für den weiteren Ausbau zu senken
- Förderkosten besser verteilen
- Ausbau der erneuerbaren Energien fortsetzen und intelligenter steuern
- Erneuerbare Energie weiter an dem Markt heranzuführen

In diesem Abschnitt werden nur die für Frankfurt am Main relevanten Erneuerbare Energien (Stromsektor) betrachtet und deren wichtigsten Änderungen im reformierten EEG aufgezeigt.

Es gilt anzumerken, dass sich für bestehende Anlagen nichts ändert (Bestandsschutz), lediglich für Neuanlagen treten Änderungen in Kraft.

Im Bereich der Photovoltaik treten folgende Änderungen mit dem neuen EEG in Kraft: Es wird ein Ausbaukorridor von neu errichteten Photovoltaikanlagen von 2400 bis 2600 MW pro Jahr festgelegt, gesteuert wird dies über den „atmenden Deckel“, eine quartalsweise Anpassung der Vergütung an den aktuellen Ausbau. Die bei der Vorstellung des Gesetzesvorschlags in kritikstehende EEG-Umlage für den Eigenverbraucher betrifft die Kleinanlagen (bis 10 kW und einem Verbrauch des selbst erzeugten Stromes bis 10 MWh), wie etwa Anlagen bei Eigenheimbesitzer, nicht. Dies fördert die gewünschte Verstärkung des Eigenstromverbrauches von PV-Strom in städtischen und ländlichen Gebieten. Mittlere Betriebe und Unternehmen, deren installierte Photovoltaikleistung 10 kW übersteigt, müssen den Eigenverbrauch von Strom mit

30 Prozent (bis Ende 2015), 35 Prozent (ab 2016) und 40 Prozent (ab 2017) der EEG-Umlage bezahlen. Des Weiteren wird der Wechsel vom alten System der Einspeisevergütung zur Direktvermarktung stufenweise vollzogen. Von der Änderung ausgeschlossen sind zunächst kleine und mittlere Photovoltaik-Anlagen bis 500 kW, wie sie beispielsweise auf Dachflächen in Frankfurt am Main installiert werden können. Ab dem Jahr 2016 wird die Obergrenze der festen Einspeisevergütung von 500 kW auf 100 kW herabgesetzt. Anlagenbesitzer, deren Anlagen beim Bau eine Leistung über 500 kW bzw. 100 kW (ab 2016) besitzen, müssen ihren Strom zukünftig selbst vermarkten und verkaufen. Die aktuellen Fördersätze der Photovoltaik-Anlagen, die nach dem 31. August 2014 in Betrieb gehen, sind auf der Homepage der Bundesnetzagentur zu finden (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, BMWi, 2014).

Für die Windenergie an Land ergeben sich nachfolgende Änderungen: Ebenso wie bei der Photovoltaik gibt es für die Windenergie ein Ausbaukorridor, der sich in der gleichen Größenordnung bewegt. Der Ausbau soll ebenfalls über den „atmenden Deckel“ geregelt werden. Bonuszahlungen für besonders leistungsfähige Anlagen oder die Erneuerung bestehender Anlagen werden im neuen EEG nicht mehr bezahlt.

Im überarbeiteten EEG sind die besonderen Ausgleichsregelungen durch die stromintensiven Unternehmen in der Industrie überarbeitet worden. Die Bezahlung einer reduzierten EEG-Umlage erhalten stromintensive Unternehmen, die im internationalen Wettbewerb stehen. Zu stromintensive Unternehmen zählen dabei Unternehmen aus 68 unterschiedlichen Branchen, deren Stromkosten mindestens 16 Prozent (ab 2015: 17 Prozent) der Bruttowertererschöpfung betragen. Über einen Antrag können die Unternehmen eine Begünstigung in Form von einer Reduzierten EEG-Umlage auf 15 Prozent erhalten (SPD Fraktion, 2014).

#### **7.7.1.2 Marktanreizprogramm für regenerative Energieanlagen im Wärmesektor**

Das Marktanreizprogramm (MAP) zur Förderung von Energieanlagen im Wärmemarkt ist das zentrale Förderinstrument der Bundesregierung im Wärmesektor und somit auch für Frankfurt am Main relevant. In den Segmenten der Solarthermie, Biomasse, Wärmepumpen, Innovationsförderung und Visualisierung werden ausgewählte Maßnahmen über das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) mit einem Förderbetrag unterstützt. Die Investitionszuschüsse für thermische Solarkollektoranlagen, Biomasseanlagen und Wärmepumpen in 1- und 2-Familienhäuser, Mehrfamilienhäuser, sowie gewerblich und öffentlichen Gebäude sind schon im August 2012 deutlich erhöht worden. Die zu fördernden Anlagen müssen bestimmte technische Anforderungen erfüllen, die in den Förderrichtlinien zum Marktanreizprogramm festgelegt sind, um die finanzielle Förderung nach Antragstellung zu erhalten (BAFA, 2014).

Die von der öffentlichen Förderung unabhängige Nachfrage (vor allem im Bereich solare Trinkwasseranlagen und Biomassekessel) hat im Jahr 2011 an Be-

deutung zugenommen. Diese Entwicklung zeigt die zunehmende Verbreitung der erneuerbaren Energien auch ohne Förderung, wodurch sich der Charakter des Marktanreizprogramms erfüllt [5, S.94]. Ein weiterer Vorteil des MAP ergibt sich durch die Wechselwirkung mit anderen Instrumenten, so verstärkt das MAP andere Instrumente (EEWärmeG und EEG) indirekt (Fichner, 2012). Neben dem Auftragsstellen der Energieanlagen profitiert das lokale Sanitär-Heizungs-Klima-Handwerk von der Förderung durch eine erhöhte Auftragslage. Die Fachbetriebe der Innung Sanitär-Heizung-Klima Frankfurt profitieren ebenfalls vom MAP und haben sich die Bewältigung der Herausforderungen der Energiewende zum Ziel gesetzt.

Gerade mittelständische agierende Unternehmen und Bauherren werden durch jährlich öffentlich geführte Diskussionen über das Programmvolumen, Änderungen der Förderkonditionen bis hin zum zeitweisen Förderstopp verunsichert. Die ändernden Förderrichtlinien beeinflussen die Auftragslage der involvierten Unternehmen negativ, wodurch die Bereitschaft in Innovationen zu investieren gehemmt wird. Die fehlende Sicherheit für den Erhalt der Förderung wegen des Nichtbestehens eines gesetzlichen Förderanspruches ist als ein weiterer nachteiliger Aspekt zu nennen und führt dazu, dass Kosten im Wärmesektor wesentlich geringer gefallen sind als durch das EEG gefördert Technologien im Stromsektor.

### **Empfehlung für Frankfurt am Main**

Zu empfehlen ist für die Stadt Frankfurt am Main ein Förderprogramm, welches einen gesetzlichen Anspruch auf Förderung beinhaltet und nicht von kurzfristigen Schwankungen der Haushaltslage oder der wechselnden Politik in Frankfurt am Main abhängig ist. Zusätzlich kann gesetzlich festgelegt werden, dass bestimmte steuerliche Einnahmen zweckgebunden für die Förderung zur Verfügung stehen (Öko-Institut e.V., 2013).

Fördergelder des Bundes und Länder könnten den Städten zur Verfügung gestellt werden und die lokale Energiewende fördern.

## 7.7.2 Neue Finanzierungsformen außerhalb der bestehenden Förderungsprogramme

Zur ausreichenden energetischen Gebäudesanierung und zur Erfüllung weiterer Effizienzziele müssen neue Politikmaßnahmen in Form von Finanzierungsformen im Wärmesektor angewendet werden.

Zunächst werden dabei staatliche Anreizinstrumente steuerlicher Art untersucht, die über eine Energiesteuer Projekte finanzieren. Eine weitere Finanzierungsform sind Fonds, sogenannte Effizienzfonds oder Energiesparfonds, die mit ihrem eingezahlten Kapital Energiesparmaßnahmen entrichten. Eine relativ neue Finanzierungsform ist das Crowdfunding. Über eine Internetplattform können dabei selbst initiierte Projekte von anderen Personen unterstützt werden. Betrachtet wird zudem das Contracting in Form des Einspar-Contracting, wodurch die gewünschte Energieeinsparungsmaßnahme durch einen Contractor geplant, finanziert und kontrolliert wird. Die letzte zu nennende

Finanzierungsform ist die Stiftung, über die Zinsen oder Dividenden eines Vermögens werden unterschiedlichste Projekte unterstützt.

#### 7.7.2.1 Staatliche Anreizinstrumente steuerlicher Art

Über Anreize der Neugestaltung der Energiesteuer ließe sich die Aufstockung der bestehenden Förderprogramme finanzieren und somit der Förderpool für die energetische Sanierungen erhöhen. Vorstellbar ist die Staffelung nach CO<sub>2</sub>-Emissionen, Einführung eines zweckgebundenen Zuschlags oder die Koppelung mit gesetzlichen Förderansprüchen zur Umsetzung dieser Energiesteuer. In der Studie des Forum ökologisch-soziale Marktwirtschaft (FÖS) ist von der Erhöhung der Heizstoffsteuer die Rede, wodurch eine sehr positive Wirksamkeit des Instruments im Bereich CO<sub>2</sub>-/ Energieeinsparung, geringe Vermeidungskosten/ große Hebelwirkung und bei der Umsetzung des Verursacherprinzips auftreten. Letztendlich ist nur der Aspekt der Planungsunsicherheit für Investoren bei dieser Finanzierungsform negativ zu bewerten (Küchler & Nestle, 2012).

Ein weiteres steuerliches Anreizinstrument könnte die Einführung einer neuen auf die energetische Gebäudequalität bezogene Steuer, beispielsweise Klimasteuer, sein. Dieser Steuer mehrbetrag richtet sich nur an Gebäudebesitzer mit schlechtem energetischem Zustand, Gebäudebesitzer mit energetisch sanierten Gebäuden werden durch die Steuererstattung begünstigt. Dieses Instrument erfordert die zuverlässige energetische Bewertung des Bestandsgebäudes (Öko-Institut e.V., 2013).

#### 7.7.2.2 Effizienzfonds und Energiesparfonds

Eine neue Finanzierungsform neben den bestehenden Förderprogrammen ist die Einführung einer fondsgebundene Abgabe auf die energetische Gebäudequalität. Verpflichtete Akteure, welche ihrer Einsparverpflichtung nicht nachgekommen sind, müssen eine Zahlung auf einen Effizienz- oder Energiesparfonds zahlen und sind von ihrer Verpflichtung freigekauft. Über die Mittel des Fonds können zweckgebundene Fördermaßnahmen umgesetzt werden, um das vorrangige Ziel einer Breitenwirkung zu erzielen. Das zentrale Merkmal der Fondsarbeit sind die koordinierten Abstimmungen im Bereich der Finanzierung, Informationen, Beratung und Steuerung. Schon heute gibt es Effizienzfond in Dänemark (Elsparefonden), Großbritannien (Energy Saving Trust ergänzt durch Carbon Trust), Bremen (Bremen Energiekonsens) und Hannover (Enercity Fonds Pro Klima) (BUND, 2010).

Mit diesen Mitteln können innovative und investitionsintensive Effizienzprojekte umgesetzt werden, die über die andere Instrumente nicht zu realisieren sind. Gebäudebesitzer mit einer guten energetischen Qualität werden finanziell entlastet.

### **Best Practice Beispiel**

Der im Jahr 1998 gegründete Klimaschutzfonds Enercity-Fonds Pro Klima wird durch Städte Hannover und Hemmingen und den Stadtwerken Hannover AG finanziert. Durch den Fond werden Projekte zur Einsparung von Heizenergie und Strom gefördert, die zuvor festgelegte Kriterien im Bereich CO<sub>2</sub>-Effizienz, absolute CO<sub>2</sub>-Reduzierung und Innovationsgrad erfüllen. Das Fondsvolumen beträgt 4,4 Millionen Euro, der Schwerpunkt der Förderprogramme ist das energieeffiziente Bauen und Modernisieren fokussiert. Neben den Förderungen stehen auch individuelle Beratungen durch Experten zur Verfügung (Pro Klima , 2014).

### **Empfehlung für Frankfurt am Main**

In einem neu gegründeten Fond zahlen in Abhängigkeit der Unternehmensgröße Frankfurter Unternehmen ein. Jeden eingezahlten Euro würde die Stadt mit einer weiteren Einzahlung verdoppeln. Dabei sollen Angebote wie Effizienzberatung nicht kostenlos angeboten werden, sichert jedoch eine Grundfinanzierung und kann dadurch mehr Kunden anwerben. Ein Großteil der jährlichen Finanzierung wird somit selber durch die Dienstleistung gestemmt. Unternehmen und die Stadt finanzieren größtenteils Anteile zum Marketing, die Organisation und bestimmte Fixkosten.

Eine weitere Möglichkeit den Energiesparfonds zu finanzieren wäre eine erhöhte Abgabe für Neubauten in der Stadt Frankfurt am Main. Jeder energieeffiziente Neubau finanziert durch einen Beitrag pro m<sup>2</sup> die energetische Sanierung eines Altbaus und könnte wie das Beispiel in Dänemark zeigt in einen Sanierungsfond eingezahlt werden. Der Grund ist, dass jeder Neubau egal wie effizient er ist, Ressourcen und Flächen der Stadt beansprucht. Dadurch soll der Anreiz zu mehr energetischen Sanierungen erhöht und ein geringerer Leerbestand erreicht werden.

### **Förderung von Klimaschutzinitiativen**

Neben den von der Stadt Frankfurt am Main bzw. den entsprechenden Ämtern durchgeführten Maßnahmen und Programmen zum Klimaschutz, wird in Frankfurt und der Region eine Großzahl von Klimaschutzinitiativen durch Unternehmen, Vereine, Privatpersonen etc. durchgeführt. Um deren Wirkung zu verstärken und mögliche Multiplikatoren zu nutzen, wird empfohlen, die entsprechenden Initiativen gezielt zu fördern. Hierzu ist es unabdingbar, dass angemessene Förderrichtlinien erlassen werden. Diese definieren, welche thematischen und inhaltlichen Anforderungen an die zu fördernden Initiativen gestellt werden und wie diese nachgewiesen werden müssen. Die Förderung soll dabei als „Anschubfinanzierung“ verstanden werden, welche auf eine langfristige Verstetigung der geförderten Klimaschutzinitiativen abzielt.

### 7.7.2.3 Crowdfunding

Unter Crowdfunding versteht man das Finanzieren von Projekten, Produkte und Start-Ups durch eine Vielzahl an Menschen (engl. Crowd) in zentralen Plattformen im Internet. Der Projektinitiator wendet sich direkt an die Öffentlichkeit, stellt sein Projekt vor, um möglichst viele Interessenten für eine gemeinschaftliche Vorabfinanzierung zu gewinnen. Der Auftraggeber gibt im Vorfeld eine Mindestsumme und einen Zeitraum an, bis das Projekt umgesetzt werden kann. Wird das Ziel erreicht, erhalten die Unterstützer in der Regel eine Gegenleistung vom Projektinitiator. Dies kann vielfältigste Formen annehmen, öffentliche persönliche Danksagung, Einblick hinter den Kulissen, Exemplare des Projektergebnisses oder eine finanzielle Beteiligung. Crowdfunding richtet sich an soziale, kulturelle, visionäre oder forschungsintensive Projekte, die sich bei den üblichen Mechanismen im Markt schwer realisieren lassen.

Vorteil ist der verminderte bürokratische Aufwand zur Finanzierung im Gegensatz zur staatlichen Förderungen. Durch die Vielzahl an Förderer wird der tatsächliche, gesellschaftliche Bedarf des Projektes zielgenauer getroffen als beispielsweise bei staatlichen Subventionen oder klassische Finanzierungsformen. Zusätzlich wird der Geldgeber am Projekt emotional beteiligt, wodurch eine neue Art von Finanzierung stattfinden kann. Der Geldgeber kann sich mit sehr geringen Beiträgen am Projekt beteiligen, dies stellt sich beim Risikoinvestment als Vorteil heraus (crowdfunding.de, 2014).

Crowdfunding findet sich noch in der Findungsphase und hat gerade bei der Bewerbung der Initiatoren für ihre Projekte Schwierigkeiten. Nicht jedes Projekt kann umgesetzt werden, weil sich nicht genügend Unterstützer finden oder deren Beträge zu klein sind (ist dies der Fall, so wird den Investoren ihr Geld zurückgezahlt) (crowdfunding.de, 2014).

#### **Empfehlung für Frankfurt am Main**

Die Finanzierungsform des Crowdfunding eignet sich optimal für quartiersnahe Projekte in Frankfurt am Main. Gerade die Nähe der Bürger für die ortsbundenen Projekte kann durch eine ausgeprägte Öffentlichkeitsarbeit zum Erfolg und einen Beitrag zur energieeffizienten Stadt Frankfurt am Main führen.

### 7.7.2.4 Contracting

Das Contracting, genauer gesagt das Energiespar-Contracting, ist eine vertragliche Dienstleistung zwischen dem externen, privaten Dienstleister (Contractor) und dem Energieverbraucher. Der Contractor plant, finanziert, realisiert und betreut Energiesparmaßnahmen und garantiert dem Auftraggeber eine Energiekosteneinsparung. Refinanziert wird diese Dienstleistung für den Contractor durch eine Beteiligung an der Energiekosteneinsparung. Anwendung findet dies meist in öffentlichen Liegenschaften und das Energiespar-Contracting ermöglicht eine große Einsparung auch ohne zusätzliche Investitionskosten aus dem öffentlichen Haushalt. Durch öffentliche Ausfall-

bürgschaften kann das Risiko für den Contractor gemindert werden und dies kann zu einer verstärkten Anwendung des Contracting führen (Küchler & Nestle, 2012).

Gerade für Städte und Kommunen bietet das Contracting Vorteile im Bereich der Investitionsmöglichkeit ohne Finanzierungsproblem und der eigenen langfristigen Kosteneinsparung durch die Optimierung der Anlagen vor Ort. Das Risiko minimiert sich durch die Verantwortungsübergabe an den Contractor, der eine garantierte Einsparung verspricht. Durch das notwendige Berichtswesen der Energieverbräuche und –kosten erhält man einen eigenen Überblick.

Als Nachteile oder Risiken kann sich die langfristige Abhängigkeit vom Contractor erweisen, wodurch bei drohendem Zahlungsausfall enorme Kosten auf den Auftraggeber fallen. Der geringe Anteil am Contracting Markt von 6 Prozent verdeutlicht, dass das wirtschaftliche Potenzial (v.a in der privaten Wohnungswirtschaft) erweitert werden muss. Bei dieser Finanzierung mindert der Gewinnaufschlag des Contractors die Energieeinsparkosten (Küchler & Nestle, 2012).

### **Best Practice Beispiel**

Die Stadt Sehnde, nahe Hannover, nutzt seit 2010 Energiespar-Contracting für öffentliche Liegenschaften der Stadt. Der Contractor WISAG Energiemanagement senkte die Energiekosten im Rathaus und zehn weiteren Gebäuden um ca. 30 Prozent. Die Garantiephase beläuft sich auf 14 Jahre und spart im Jahr 590 Tonnen CO<sub>2</sub> ein. Die Energiekosteneinsparung liegt bei ca. 110 000 €/a netto und die statische Amortisationszeit der durchgeführten Einsparmaßnahmen liegt bei 7 Jahren (Energiedienstleistungs-Contracting, 2014).

## **7.7.2.5 Stiftungen**

Eine Stiftung ist eine Einrichtung, die unter der Verwendung eines Vermögens einen festgelegten Zweck erfüllt, der meist über den Stifter festgelegt wird. Die meisten Stiftungen werden in privat(rechtlich)er Form errichtet und dienen gemeinnützigen Zwecken. Zumeist werden zu diesen Zweckerfüllungen nur die aus dem Vermögen fließenden Erträge (z.B. Zinsen, Dividenden) verwendet, so dass die Existenz der Stiftung Jahrhunderte überdauern kann. Die siebte größte Stiftung in Deutschland, die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, beschäftigt sich unter anderem mit den Themengebieten der Ressourcenschonung und des Klimaschutzes und setzt dort unterschiedlichste Projekte um.

Der Vorteil der Stiftung ist die dauerhafte Zweckerfüllung durch das unbeeinflusste Vermögen und die gewünschten Entscheidungsstrukturen bleiben grundsätzlich erhalten. Die staatliche Aufsicht garantiert eine relativ hohe Gewähr für die Dauerhaftigkeit der Stiftung.

Die Stiftung ist eine relativ starre Organisation d.h. die Stiftungssatzung bleibt so erhalten, wie sie am Zeitpunkt der Stiftungserrichtung eingeführt worden ist. Moderne oder visionäre Projekte werden in der Regel nur unterstützt,

wenn Satzungsänderungen vorgenommen werden, die durch die Aufsichtsbehörde genehmigt werden müssen.

### **Empfehlung für Frankfurt am Main**

Eine in Frankfurt am Main ansässige Stiftung unterstützt damit beispielweise Kindergärten und Schulen, in Form von Gebäudesanierungen und Wissensvermittlung mit dem Umgang von erneuerbaren Energien und Energieeffizienz.

## 7.7.3 Maßnahmen der Stadtverwaltung

### **7.7.3.1 Querschnittsaufgabe Klimaschutz in der Stadtverwaltung – Etablierung einer Arbeitsgruppe**

Um die Beschlüsse zum Klimaschutz in Frankfurt erreichen zu können, müssen sich neben der Tätigkeit des Energiereferats alle Ämter der Stadt für die Erreichung des CO<sub>2</sub> Einsparziels und die Umsetzung der Beschlüsse in der Stadtverordnetenversammlung durch ihr Verwaltungshandeln einsetzen. Ziel ist es daher, unter Federführung des Energiereferates eine ämterübergreifende Arbeitsgruppe zu etablieren, die Klimaschutz als Querschnittsaufgabe in der Verwaltung definiert und umsetzt. Dadurch können in Hinblick auf Projekte schon zu einem frühen Zeitpunkt deren Auswirkungen auf den Klimaschutz bewertet und die fachlichen Synergien der Ämter für die Zielerreichung (CO<sub>2</sub>-Reduktion) genutzt werden.

Die Arbeitsgruppe könnte auch besser die Beschlüsse der Stadtverordnetenversammlung zum Klimaschutz (z.B. Hochhausrahmenplan (150 kWh/m<sup>2</sup> Primärenergie für neue Hochhäuser) überwachen und so das Erscheinungsbild der Verwaltung z.B. gegenüber Investoren harmonisieren. Empfehlung für Frankfurt

In einem Ersten Schritt sollten die Ämter identifiziert werden, die konkret Einfluss auf die Klimaschutzbeschlüsse nehmen können. Dazu gehören z.B. das Stadtplanungsamt, Liegenschaftsamt, Hochbauamt, Schulamt, Straßenverkehrsamt und noch einige mehr. Ggf. sollte der Kreis auch um städtischen Gesellschaften erweitert werden.

### **7.7.3.2 Abbau von Hemmnissen (rechtlich, ökonomisch, technisch, sozial)**

Bei der Umsetzung von Klimaschutzprojekten können immer wieder Hemmnisse auftreten. Diese sind oft organisatorischer oder verwaltungstechnischer oder juristischer Art. Manchmal liegen auch technologische, sozioökonomische Gründe für die Nicht-Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen vor. Hier ist es erforderlich diese Hemmnisse genauer zu analysieren und ggf. eine das Problem beschreibende und zugleich lösungsorientierte Studie zu beauftra-

gen. Solche Studien dienen dann z.B. für die Politik als Grundlage für Maßnahmen, um die Hemmnisse/ Barrieren zu beseitigen.

Letztendlich können sich die Auswirkungen der Grundsatzuntersuchungen bundesweit positiv auf den Klimaschutz auswirken. Zudem sind die Adressierung von Hemmnissen und das Aufzeigen von Lösungen ein klarer Auftrag für die 19 Städte und Regionen, die den Maßnahmenplan 100% Klimaschutz umsetzen.

### **Empfehlung für Frankfurt**

Die zu beauftragenden Studien sollten wenn möglich in Kooperation mit den anderen Masterplan-Kommunen geschehen. Auch eine Kooperation mit den Städtenetzwerken „Deutscher Städtetag“ oder „Klimabündnis“ ist anzustreben, damit die finanzielle Last klein gehalten werden kann. Weiterhin ist zu prüfen, ob Fördergelder genutzt werden können.

## 7.8 Zusammenfassung

Neben den derzeitigen Ausgaben für Energie zeigen die Beispielrechnungen, dass Ausgaben in jedem Bereich ob Haushalte oder Gewerbe reduziert werden können. Auch der weitere Anstieg dezentraler Erzeugung aus erneuerbaren Energien hilft nicht nur Kosten zu reduzieren sondern auch einen hohen Anteil der Wertschöpfung in der Stadt zu halten. Bestehende und neue innovative Finanzierungsinstrumente wie Crowdfunding helfen dabei nicht nur bei der Energieerzeugung die regionale Wertschöpfung zu steigern sondern auch bei der Finanzierung, da die Investoren ebenfalls dezentral und lokal angesiedelt sind.

## 8 Entwicklung der Szenarien der Stadt Frankfurt am Main bis 2050

### 8.1 Demographische Entwicklung und Flächenentwicklung

#### 8.1.1 Haushaltssektor

Die Entwicklung der Haushalte bis 2050 wurde anhand der prognostizierten Bevölkerungs- (Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, 2010) und Haushaltsgrößenentwicklung (Institut für Wohnen und Umwelt, 2013) bis 2050 abgeschätzt. In Abbildung 160 wird die Entwicklung der Haushalte bis 2050 dargestellt. Im Jahr 2050 verteilen sich die rund 720.000 Einwohner Frankfurts auf ca. 405.000 Wohneinheiten. Die durchschnittliche Haushaltsgröße beträgt 1,78 Personen pro Haushalt.

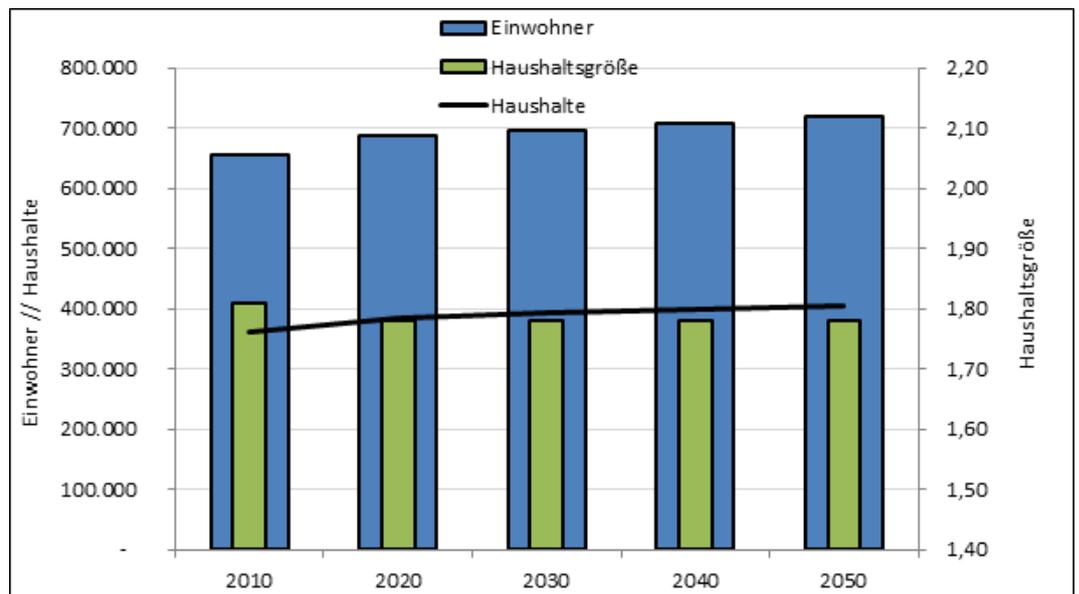


Abbildung 160: Entwicklung der Einwohner und Haushalte bis 2050, eigene Darstellung (IBP) nach (Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, 2010) und (Institut für Wohnen und Umwelt, 2013).

#### 8.1.2 Gewerbe, Handel und Dienstleistungssektor (GHD)

Für die Abschätzung der Flächenentwicklung im GHD Sektor kann nur beschränkt auf historische Daten der letzten zehn Jahre zurückgegriffen werden. Eine Weiterführung des historischen Trends ist lediglich bei den büroähnlichen Betrieben (NAI Apollo Group, 2013) und dem Einzelhandel möglich (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2012). Zu dem „HoReCa“-Gewerbe, den Rechenzentren und „Sonstige“ gibt es keine Veröffentlichungen zu den Flächenentwicklungen. Die Abschätzung der Flächenentwicklung erfolgt nach allgemeinen Einschätzungen aus durchgeführten Workshops. Aus diesem Grund unterliegen die Flächenentwicklungen dieser Branchen einer höheren Unsicherheit. Generell besteht die Möglichkeit, dass Flächenprognosen und die Beurteilung von Trends auf Grund ihrer Unwägbarkeiten

und Annahmen in anderen Fachkonzepten der Stadt Frankfurt am Main anders ausfallen können.

In Abbildung 161 wird die angenommene relative Flächenentwicklung der Branchen im GHD Sektor dargestellt.

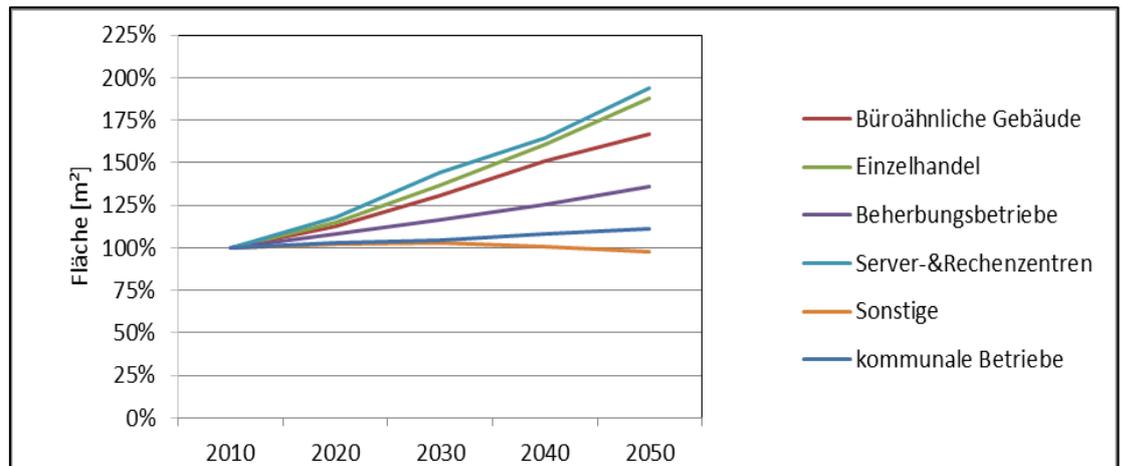


Abbildung 161: prognostizierte Flächenentwicklung im GHD-Sektor nach Branchen, eigene Darstellung (IBP).

Demnach verdoppelt sich nahezu die Fläche der Server- und Rechenzentren. Weiter nehmen die Flächen des Einzelhandels und der büroähnlichen Betriebe deutlich zu. Bei der Flächenentwicklung der Beherbergungsbetriebe wurde ein Flächenzuwachs von rund zehn Prozent bis 2050 angenommen. Den Gebäuden die unter die Kategorie „Sonstige“ fallen wird eine konstant bleibende Fläche bis 2050 unterstellt. In absoluten Zahlen ausgedrückt steigt der Flächenbedarf des GHD-Sektors von ca. 22,8 Mio. m<sup>2</sup> im Jahr 2010 um 33 Prozent auf 30,3 Mio. m<sup>2</sup> im Jahr 2050 an.

## 8.2 Szenario des Frankfurter Stromsektors

### 8.2.1 Referenzszenario – Strombedarf

Im Referenzszenario wird von einer langsameren, nicht in voller Konsequenz durchgeführten Umsetzung der Maßnahmen ausgegangen. Im Gewerbe, Handel und Dienstleistungssektor werden lediglich 50 Prozent der möglichen Stromeinsparpotentiale genutzt. Weiter wird von keiner Sensibilisierung der Mitarbeiter am Arbeitsplatz ausgegangen. Ein reduzierter Strombedarf aufgrund von Suffizienz wird hier nicht berücksichtigt. In den Haushalten erfolgt zwar der komplette Austausch der Haushaltsgeräte bis 2050 jedoch nicht durch A+++ Geräte. Viele der neu angeschafften Geräte verfügen noch über einen alten Standard, sodass die tatsächliche Austauschrate deutlich niedriger ist. Weiter wird von keinen Stromeinsparungen durch ein verändertes Nutzerverhalten in den Haushalten ausgegangen. Dem Industriesektor wird ein konstant bleibender Strombedarf unterstellt.

Bei den Haushalten betragen die Stromeinsparungen insgesamt 18 Prozent. Dort kann der Stromeinsatz von 1.028 GWh im Jahr 2010 um 185 GWh auf 843 GWh im Jahr 2050 gesenkt werden. In der Industrie kann lediglich das Verbrauchsniveau von 2010 gehalten, jedoch nicht signifikant gesenkt werden. Damit bleibt der Strombedarf über den Zeitraum von 2010 bis 2050 nahezu konstant bei 2.582 GWh. Aufgrund der „halbherzigen“ Umsetzung der Maßnahmen im Gewerbe, Handel und Dienstleistungssektor bis 2050 liegen die Stromeinsparungen gegenüber 2010 lediglich bei rund zehn Prozent. Dementsprechend reduziert sich der Strombedarf von 2.970 GWh (2010) auf 2.673 GWh (2050).

Über alle Sektoren sinkt der Strombedarf um **7,3 Prozent** (482 GWh). Bezogen auf den Gesamtenergieverbrauch des Jahres 2010 (18.292 GWh; Haushalte, GHD, Industrie, kein Verkehr) können rund **2,6 Prozent** an Endenergie durch Stromanwendungen eingespart werden.

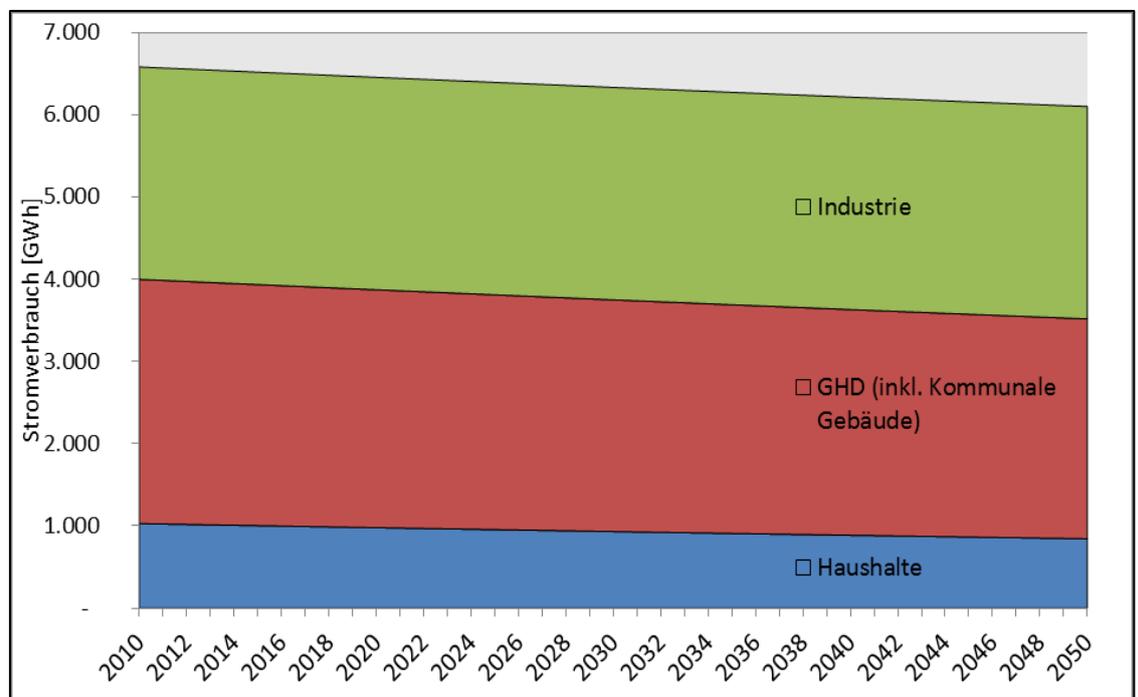


Abbildung 162: Entwicklung des Strombedarfs in den Sektoren Haushalt, HD und Industrie im Referenzszenario, eigene Darstellung (IBP).

### 8.2.2 Maßnahmenzenario - Strombedarf

Im Maßnahmenzenario werden die vorgestellten Maßnahmen konsequent umgesetzt und die Stromeinsparpotentiale des Gewerbes, Handel und Dienstleistungssektors voll ausgeschöpft. Weiter können rund zehn Prozent der Endenergie durch ein verändertes Nutzerverhalten am Arbeitsplatz eingespart werden. Im Haushaltssektor wird von einem vollständigen Austausch des Haushaltgerätebestands gegen neuwertige A+++ Geräte ausgegangen. Neben dem Geräteaustausch sind die Einwohner hinsichtlich des rationellen Umgangs mit Strom im Wohnungsbereich sensibilisiert. Somit kann der

Strombedarf der Haushalte im Jahr 2050 um weitere zehn Prozent gesenkt werden. In der Industrie wird von einem technischen Einsparpotential von rund 20 Prozent bis 2050 ausgegangen.

Im Maßnahmenzenario kann der Gesamtstrombedarf (6.580 GWh in Industrie, Haushalte, GHD inkl. kommunaler Gebäude) von 2010 bis 2050 um 37 Prozent durch die Umsetzung der im Stromteil vorgestellten Maßnahmen auf 4.114 GWh gesenkt werden.

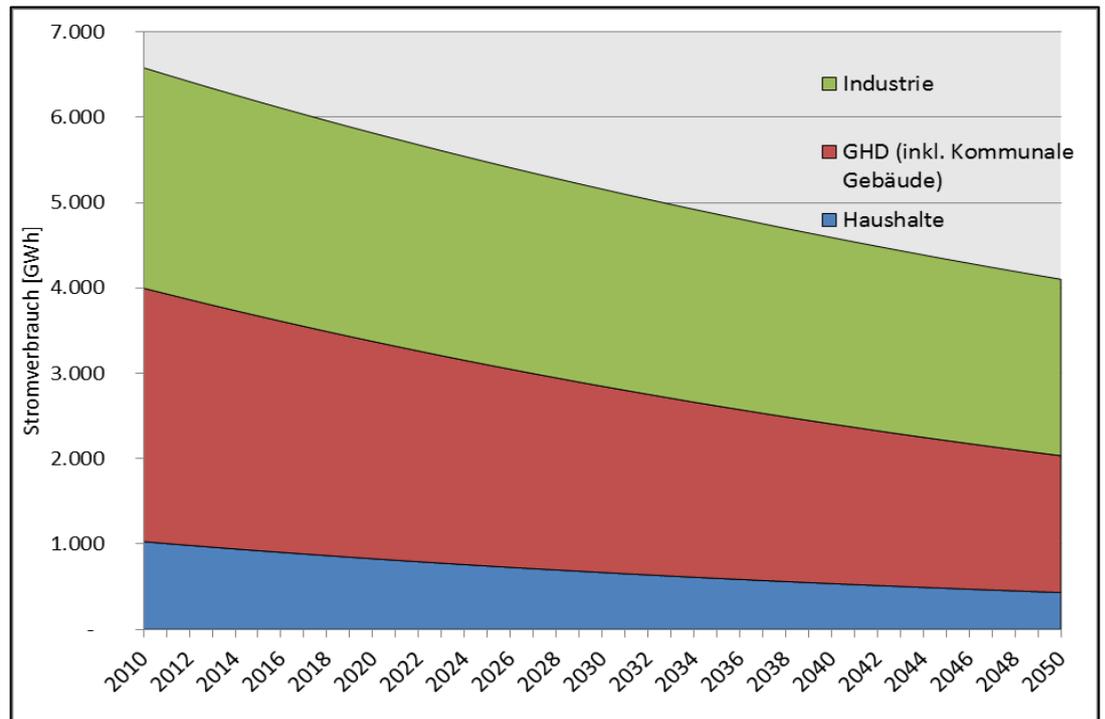


Abbildung 163: :Strombedarfsentwicklung in den Sektoren Haushalte, Industrie und GHD inkl. Anstieg des Strombedarfs für WP, eigene Berechnung (IBP 2014).

In den Haushalten können rund 57 Prozent des Strombedarfs durch die Umsetzung der Maßnahmen eingespart werden. Damit sinkt die Stromnachfrage von 1.028 GWh (2010) auf 445 GWh im Jahr 2050. Im GHD-Sektor liegen die Stromeinsparungen bis 2050 bei 46 Prozent. Der Strombedarf im Ausgangsjahr 2010 (2.970 GWh) kann somit um 1.367 GWh auf 1.603 GWh im Jahr 2050 reduziert werden. Mit der Umsetzung der Maßnahmen im Industriesektor reduziert sich die Stromnachfrage von 2.582 GWh (2010) auf 2.066 GWh (2050). Mit einem Anteil am Strombedarf ist der Industriesektor im Jahr 2050 der Bereich mit der größten Nachfrage an elektrischer Energie. Der GHD-Sektor hat im Jahr 2050 die zweithöchste Nachfrage an Strom. Dort werden rund 39 Prozent des Strombedarfes nachgefragt. Den geringsten Anteil an Strom ist im Jahr 2050 den Haushalten mit rund 11 Prozent zuzuordnen.

Durch die wachsende Bedeutung von Strom im Wärmemarkt und im Verkehrssektor erhöht sich die Stromnachfrage. Im Wärmesektor erhöht sich der Strombedarf aufgrund des Einsatzes von Wärmepumpen bis 2050 um rund 212 GWh auf 260 GWh. Im Verkehrssektor dominieren Elektroautos, -busse und E11lektro- bzw. Wasserstoff-Lkw/-LNF den Mobilitätsbereich. Weiter erhöht sich der Strombedarf durch den Ausbau der U-, S-, Regional- und Straßenbahnflotte. Der damit verbundene Strombedarf erhöht sich um rund 626 GWh und beträgt in 2050 850 GWh im Sektor Verkehr. In Summe führt der gewollte Strukturwandel in den Sektoren Verkehr und Wärme einen Anstieg des Strombedarfes von insgesamt 838 GWh. Die Gegenüberstellung von Stromeinsparungen und zusätzlichen Strombedarf ergibt einen negativen Saldo (-1.628 GWh). Demnach liegt der Strombedarf im Jahr 2050 rund 24 Prozent niedriger als im Ausgangsjahr 2010 (6.580 GWh + 48 GWh WP + 219 GWh Verkehr). Der absolute Strombedarf beträgt somit rund 5.224 GWh.

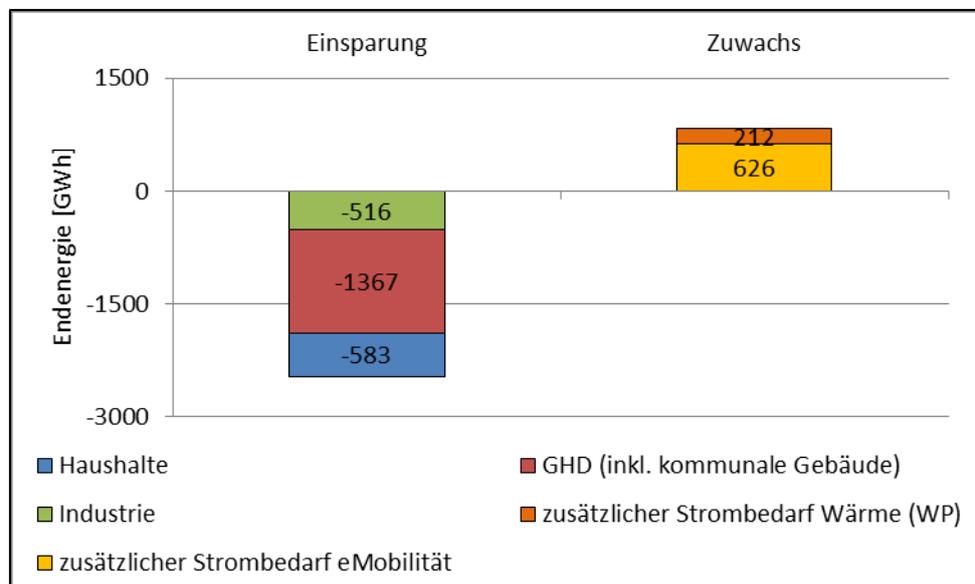


Abbildung 164: Stromanstieg und Stromeinsparungen nach Sektoren, nach Berechnungen des IBP.

Wird der Verkehr aus der Betrachtung ausgeschlossen, kann der Strombedarf bis 2050 um rund 34 Prozent gesenkt werden. Damit würden im Stromsektor rund neun Prozent des gesamten Endenergieverbrauchs von 2010 (exklusive Verkehr) eingespart werden.

## 8.3 Szenario des Frankfurter Wärmesektors

### 8.3.1 Referenzszenario – Wärmebedarf

Im Referenzszenario wird von einer unvollständigen Sanierung der Wohn- und Nichtwohngebäude in Frankfurt ausgegangen. Im GHD-Sektor liegt die Sanierungsquote der Gebäude bei 50 Prozent. Das bedeutet, dass lediglich 50 Prozent des Gebäudebestands bis 2050 energetisch saniert werden. Zusätzlich zu den Dämmmaßnahmen wird im GHD-Sektor der Austausch von zentralen Umwälzpumpen gegen dezentrale drehzahlgeregelte Pumpen gegenüber dem Maßnahmenzenario nicht vorgenommen. Bei den Wohngebäuden werden ebenfalls lediglich 50 Prozent der sanierungsfähigen Gebäude bis zum Jahr 2050 energetisch saniert. Die restlichen 50 Prozent bleiben bis 2050 unsaniert. Der Flächenzuwachs der Wohngebäude beträgt bis 2050 rund 13 Prozent. In der Industrie werden lediglich kleinere Effizienzmaßnahmen durchgeführt. Unabhängig von den technischen Maßnahmen kommt es aufgrund steigender Außentemperaturen bedingt durch den Klimawandel zu einer Reduktion des Heizwärmebedarfs. Gleichzeitig steigt in den Sommermonaten der Klimatisierungsbedarf.

Im Referenzszenario beträgt die Gesamtreduktion des Wärmebedarfs 25 Prozent. Damit sinkt der Wärmebedarfs von 11.713 GWh auf 8.801 GWh. Bezogen auf den Gesamtendenergieverbrauch aus dem Jahr 2010 sinkt die Endenergie aufgrund der Maßnahmen im Wärmesektor um rund 16 Prozent.

Bei den Haushalten stellt sich bis 2050 eine Reduktion des Heizwärmebedarfs von 35 Prozent ein. Der ursprüngliche Heizwärmebedarfs von 3.830 GWh kann somit bis 2050 um 1.302 GWh auf 2.528 GWh gesenkt werden. Im GHD Bereich kann der Wärmebedarf bis 2050 gegenüber 2010 aufgrund der oben beschriebenen Maßnahmen um insgesamt 45 Prozent reduziert werden. In absoluten Zahlen ausgedrückt bedeutet dies eine Einsparung von insgesamt 1.609 GWh. Somit beträgt der Wärmebedarf im Jahr 2050 noch 1.967 GWh. In der Industrie kann durch die Umsetzung von Effizienzmaßnahmen der Wärmebedarf (4.306 GWh) von 2010 bis 2050 konstant auf einem ähnlichen Niveau gehalten werden.

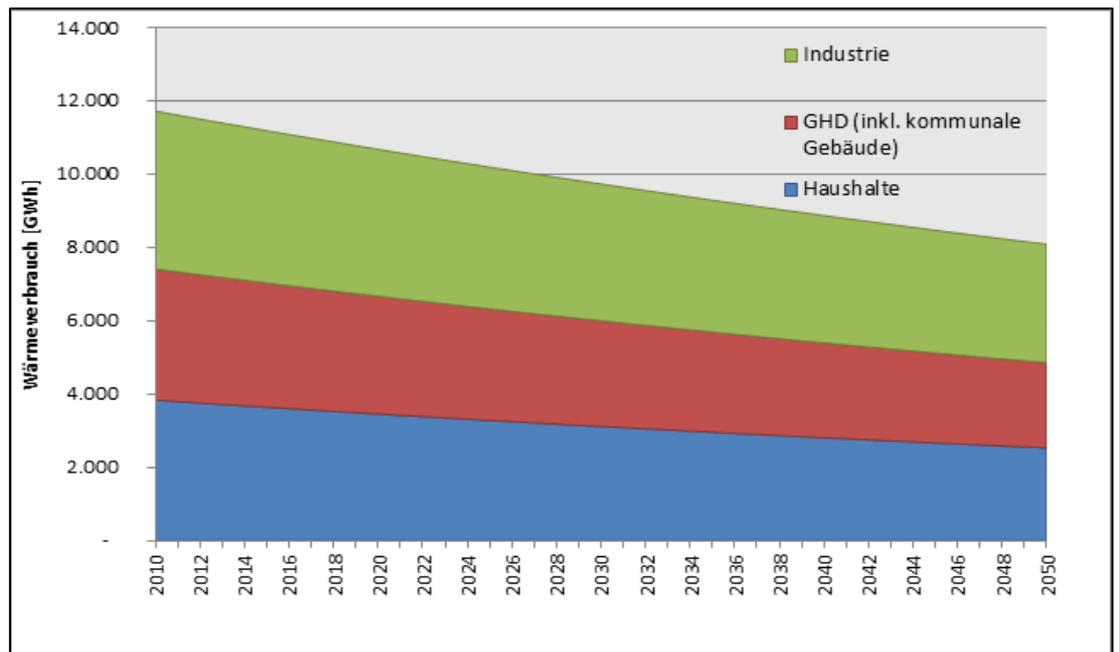


Abbildung 165: Entwicklung des Wärmebedarfs im Referenzszenario, eigene Darstellung (Fraunhofer IBP).

### 8.3.2 Maßnahmenzenario – Wärmebedarfs

Im Maßnahmenzenario wird von einer vollständigen energetischen Modernisierung der Wohn- und Nichtwohngebäude in Frankfurt ausgegangen. Demnach verdoppeln sich die Einsparungen gegenüber dem Referenzszenario. Der Austausch von Umwälzpumpen wird im Maßnahmenzenario sowohl im GHD-Sektor und den Haushalten durchgeführt. Damit erhöhen sich die Wärmeeinsparungen nochmals gegenüber dem Referenzszenario. Neben den Austausch der Umwälzpumpen werden analog zu den Haushalten auch im GHD-Sektor 100 Prozent der sanierungsfähigen Gebäude bis 2050 saniert. Der Anstieg der Außentemperatur bedingt durch den Klimawandel führt dazu, dass sich die Heizperioden verkürzen und der Heizwärmebedarf weiter sinkt. In der Industrie verringert sich durch eine effizientere Strukturierung der Produktion und die Nutzung von Abwärmepotentialen bis 2050 der Wärmeeinsatz (Prozesswärme). Gegenüber dem Jahr 2010 sinkt der Wärmebedarf bis zum Jahr 2050 um 55 Prozent auf 5.219 GWh. Damit können im Zeitraum von 2010 bis 2050 rund 6.483 GWh Wärme eingespart werden. Im GHD Sektor liegen die größten Einsparungen. Dort wird durch die oben beschriebenen Maßnahmen (vollständige energetische Modernisierung, Austausch Umwälzpumpen, Klimawandel etc.) der Wärmebedarf von 2010 (3.576 GWh) um ca. 73 Prozent auf 955 GWh reduziert. Weiter werden im Haushaltssektor ebenfalls 73 Prozent des Wärmebedarfs eingespart. Absolut bedeutet dies eine Reduktion der Heizwärme von 3.830 GWh auf 1.034 GWh. Im Industrie Sektor liegen die Einsparungen bis 2050 bei rund 25 Prozent. Damit verringert sich der Wärmebedarf um 1.077 GWh bis zum Jahr 2050 auf 3.230 GWh. Im Ausgangsjahr 2010 verteilt sich der Wärmebedarf fast gleichmäßig zu je einem Drittel auf die drei Sektoren. Nach der Umsetzung der Effizienzmaßnah-

men ergibt sich für das Jahr 2050 eine neue Verteilung. Der Industriesektor dominiert im Jahr 2050 mit 62 Prozent den Wärmebedarf von Frankfurt. In den Haushalten und dem GHD-Sektor werden lediglich 20 Prozent bzw. 18 Prozent der Wärme von Frankfurt nachgefragt.

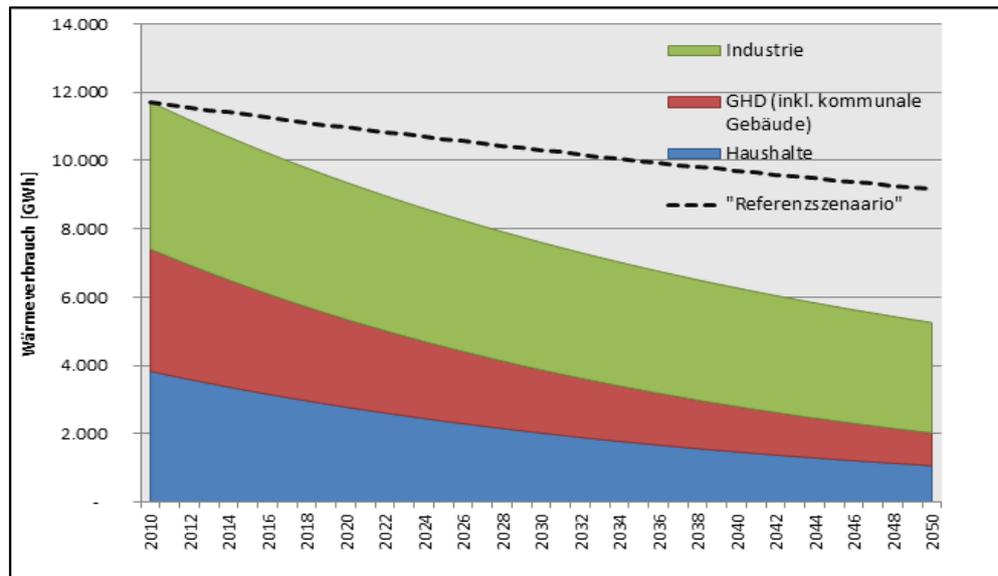


Abbildung 166: Entwicklung des Wärmebedarfs im Maßnahmenszenario, Quelle: Fraunhofer IBP

## 8.4 Verkehrssektor

In den nachfolgend dargestellten Szenarien konnten nicht alle in Kapitel 6 mit in die Berechnung einfließen. Bei vielen Maßnahmen war eine quantifizierte Abschätzung der Wirkung nicht möglich. Weiter stehen verschiedene Maßnahmen in Wechselwirkung zueinander. D.h. die Umsetzung der einen Maßnahme nimmt Einfluss auf das Ergebnis der Anderen. Dort wo möglich wurde Abschätzungen getroffen und Rechnungen durchgeführt. Die untenstehenden Graphen stellen damit eher Tendenzen als konkrete Zielwerte dar.

### 8.4.1 Referenzszenario – Endenergie Verkehr

In Abbildung 167 wird die Entwicklung des Endenergiebedarfs im Sektor Verkehr für die Nutzergruppen MIV, ÖPNV und LNF/Lkw dargestellt. Insgesamt kann der Endenergiebedarf von 2010 bis 2050 um ca. 29 Prozent, dies entspricht 1.252 GWh gesenkt werden. Das größte Einsparpotential (ca. 47 Prozent) liegt im motorisierten Individualverkehr. Aufgrund der moderaten Anteile alternativer Antriebe können rund 1.344 GWh eingespart werden. Im ÖPNV sind die Endenergieeinsparpotentiale vergleichsweise gering. Hier können lediglich 20 Prozent (57 GWh) der Endenergie bis 2050 gegenüber 2010 eingespart werden. Dadurch, dass der Großteil des ÖPNV schon mit Strom angetrieben wird, kann lediglich durch die Elektrifizierung der Busflotte und die immer effizienter werdenden Motoren Endenergie eingespart werden. Der Endenergieverbrauch der LNF und Lkw steigt bis 2050 um 13 Prozent aufgrund der steigenden Kilometerleistung im Transportsektor an. Insgesamt wird im Jahr 2050 die Hälfte des Endenergiebedarfs durch den Motorisierten Individualverkehr, 43 Prozent durch den Straßentransportsektor und lediglich sieben Prozent aufgrund des öffentlichen Personennahverkehrs verursacht.

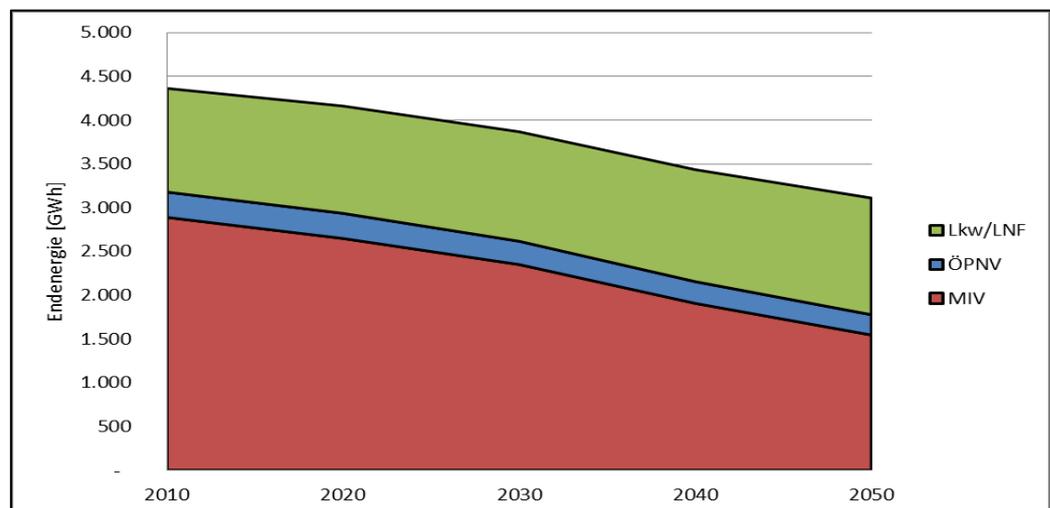


Abbildung 167: Entwicklung des Endenergieverbrauchs Nutzergruppen (Referenzszenario), eigene Darstellung (IBP).

Im Zeitraum von 2010 bis 2050 steigt der Strombedarf um 84 Prozent an. Waren es 2010 noch 224 GWh, sind es im Jahr 2050 rund 413 GWh Strom,

die insbesondere im MIV und ÖPNV eingesetzt werden. Der Dieserverbrauch bleibt von 2010 (1.973 GWh) bis 2050 (1.979 GWh) nahezu konstant. Der Einsatz von Benzin im Verkehrssektor reduziert sich um 67 Prozent (1.447 GWh). Die Anteile der Endenergieträger Strom, Diesel und Benzin verändern sich gegenüber 2010 wie folgt. Betrug der Anteil an Strom am Endenergieverbrauch im Jahr 2010 noch fünf Prozent steigt er bis 2050 auf 13 Prozent an. Beim Diesel ist ebenfalls ein Anstieg des Anteils am Endenergieverbrauch von 45 Prozent auf 64 Prozent auszumachen. Allein der Anteil an Benzin sinkt von 50 Prozent im Jahr 2010 auf 23 Prozent im Jahr 2050.

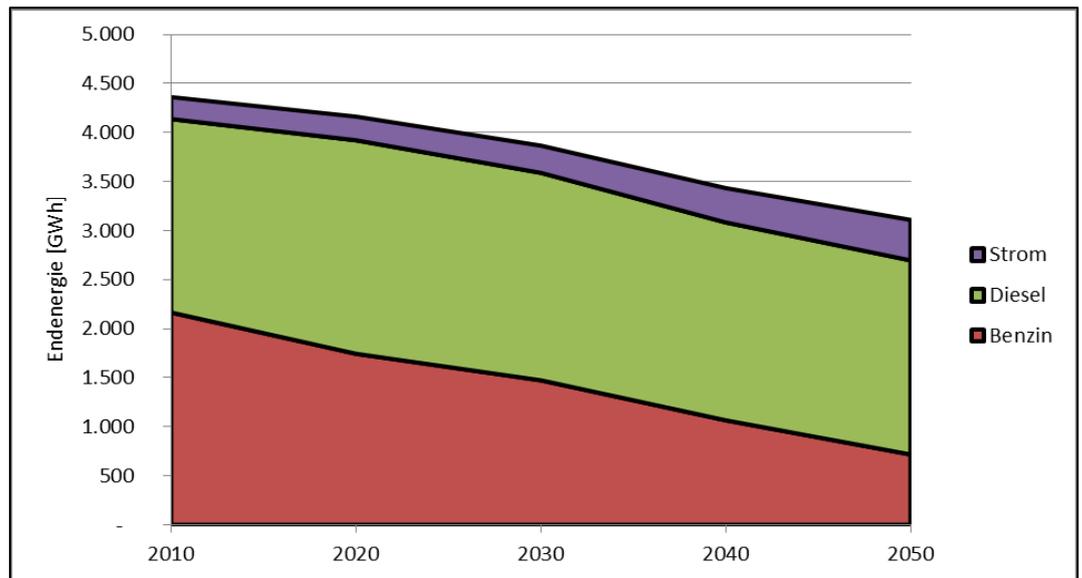


Abbildung 168: Entwicklung des Einsatzes an Endenergie nach Endenergieträger bis 2050, eigene Darstellung (IBP).

#### 8.4.2 Maßnahmenzenario - Endenergie Verkehr

Bis 2050 reduziert sich der Endenergieeinsatz im Verkehrssektor um insgesamt 75 Prozent gegenüber dem Basisjahr 2010 (Abbildung 169). Dies bedeutet eine Reduktion von 4.362 GWh (2010) auf 1.086 GWh (2050). Der Löwenanteil der Einsparungen wird beim MIV realisiert. Dort betragen die Einsparungen aufgrund der Umstellung von Benzin- und Diesel-Pkw auf Elektroautos und den Umstieg der Pkw-Nutzer auf Verkehrsmittel des ÖPNV rund 2.475 GWh. Weitere 90 GWh werden im ÖPNV durch effizientere Antriebstechnik und die Einführung von Fahrerassistenten eingespart. Die Einsparungen im Straßentransportsektor betragen 711 GWh. Die Anteile der Sektoren MIV, LNF & Lkw und ÖPNV am Endenergieverbrauch verändern sich im Vergleich zu 2010 wie folgt:

Mit einem Anteil von 44 Prozent (711 GWh) ist der Straßentransportsektor (Lkw & LNF) nun größter Nachfrager. Im Jahr 2010 (1.185 GWh) lag der Anteil dieser noch bei rund 27 Prozent. Der Anteil am Endenergiebedarf vom motorisierten Individualverkehr reduziert sich von 66 Prozent (2.888 GWh) auf ca. 38 Prozent (413 GWh). Umgekehrt verhält es sich beim ÖPNV, dessen An-

teil sich von knapp sechseineinhalb Prozent (289 GWh) auf über 18 Prozent (199 GWh) mehr als verdoppelt (Abbildung 169).

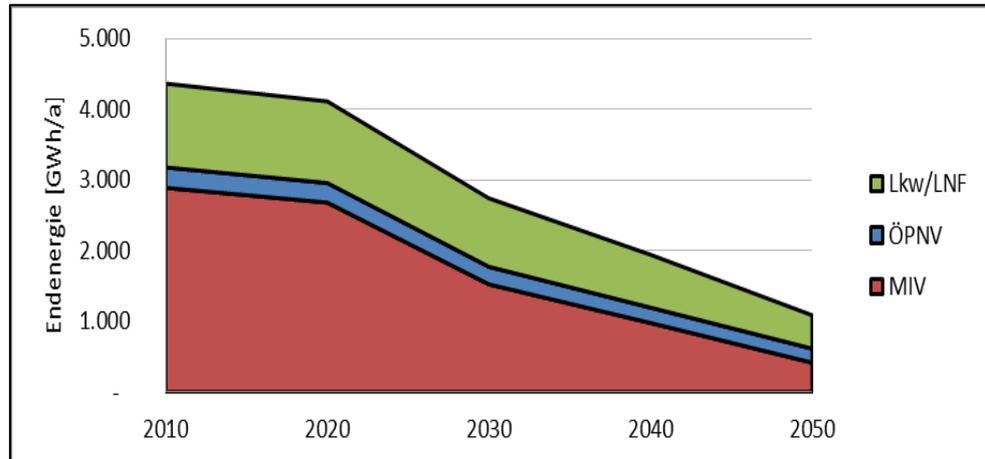


Abbildung 169: Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Sektoren (Maßnahmenszenario), eigene Darstellung (IBP).

Die Bedeutung von Strom nimmt bis 2050 im Verkehrssektor stark zu. So steigt der Strombedarf um den Faktor 3,88 an. Dies bedeutet einen zusätzlichen Strombedarf von 626 GWh. Am Endenergiebedarf des Verkehrssektors im Jahr 2050 beträgt Strom rund 78 Prozent. Zum Vergleich; im Jahr 2010 waren es noch fünf Prozent. Beim Diesel- und Benzinverbrauch bzw. -bedarf lässt sich eine umgekehrte Entwicklung feststellen. Insgesamt konnte der Einsatz von Diesel um 1.811 GWh reduziert werden. Damit können rund 92 Prozent des Diesels gegenüber 2010 eingespart werden. Der Anteil von Diesel am Endenergieeinsatz reduziert sich von 2010 mit ca. 45 Prozent auf 15 Prozent im Jahr 2050. Benzin war im Jahr 2010 mit einem Anteil von rund 50 Prozent der meist nachgefragteste Treibstoff im Verkehrssektor. Bis zum Jahr 2050 reduziert sich der Anteil auf ca. sieben Prozent. Insgesamt kann der Benzinverbrauch um 2.091 GWh (97 Prozent) gesenkt werden. Im Jahr 2050 befindet sich somit kaum konventioneller Diesel und Benzin im Einsatz. Die Hybrid-Fahrzeuge im MIV, die Busse des ÖPNV und die Lkw und LNF im Transportsektor werden mit Biotreibstoffen (Biodiesel, Bioethanol) betrieben.

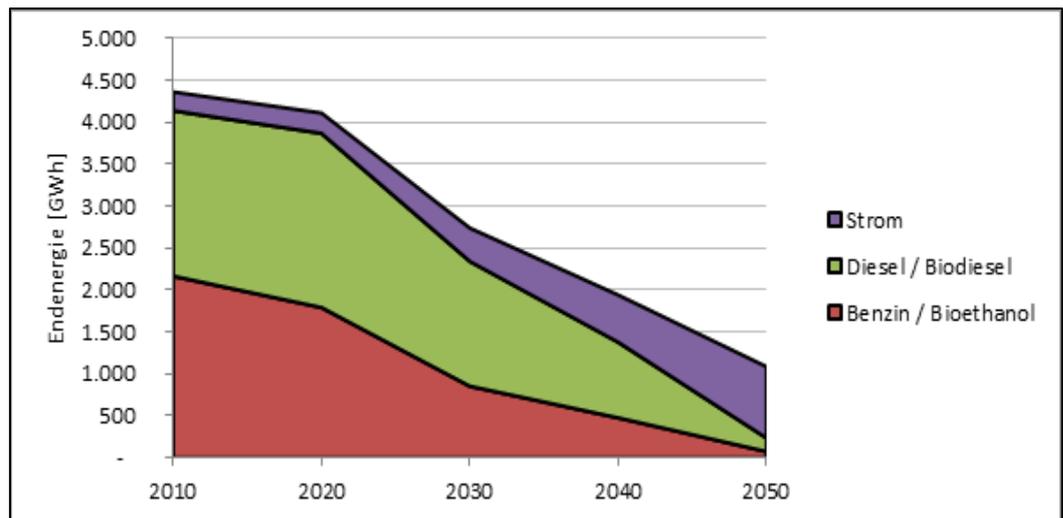


Abbildung 170: Entwicklung des Einsatzes an Endenergie nach Endenergieträger bis 2050, eigene Darstellung (IBP).

## 8.5 Energieszenarien für eine 100% erneuerbare Energieversorgung der Stadt Frankfurt am Main (KomMod) (Fraunhofer ISE)

Dieses Kapitel wurde nahezu unverändert aus dem Ergebnisbericht des Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, 2014) entnommen.

### 8.5.1 Betrachtungsraum und Datengrundlage

Die Durchführung von Optimierungsrechnungen erfordert eine klare Definition der Bilanzgrenzen. **Bezüglich des Energieverbrauchs wurde in dieser Studie das Stadtgebiet von Frankfurt betrachtet.** Berücksichtigt wurde dabei der Verbrauch von Strom und Wärme sowie den Energieverbrauch für den lokalen Verkehr von Privatverbrauchern, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und Industrie. Berücksichtigt ist der Strom- und Wärmebedarf für den Betrieb des Flughafens Frankfurt, allerdings wurde der Treibstoffbedarf für die Flugzeuge nicht berücksichtigt.

**Bezüglich der Einzugsgebiete für die Bereitstellung von erneuerbaren Energien wurden drei Varianten betrachtet,** die sich auf das Gebiet der Stadt Frankfurt, den Regionalverband FrankfurtRheinMain und das »Stadt mit Bundesland« Hessen beziehen.

Als Bezugsjahr wurde das Jahr 2013 verwendet. Hierfür wurden die Erzeugungs- und Verbrauchsstrukturen und –profile möglichst genau erfasst. Soweit Daten für 2013 nicht vorlagen wurde auf Vorjahrsdaten zurückgegriffen, was dann entsprechend vermerkt wurde. Einige Datenlücken konnten nicht geschlossen werden, so dass in diesen Fällen auf Durchschnittswerte oder Annahmen zurückgegriffen wurde.

Die Eingangsdaten der Simulationsrechnungen für das Zieljahr 2050 sind Prognosen über Veränderungen des Energiebedarfs gegenüber dem Bezugsjahr 2013, die im Wesentlichen dem Maßnahmenzenario des Generalkonzeptes des Fraunhofer IBP entnommen wurden. Für die für das Jahr 2050 erwarteten Parameter der Energiekomponenten wie z.B. die Wirkungsgrade von Kraftwerken sowie deren Kosten wurden entsprechende Annahmen auf Basis von vorliegenden Studien getroffen.

Im Generalkonzept wurde in mehreren Szenarien untersucht, wie der Masterplan 100% Klimaschutz für die Stadt Frankfurt umgesetzt werden kann. Für unterschiedliche Annahmen bezüglich der energetischen Gebäudesanierung, der Suffizienz, des Einsatzes neuer Techniken etc. ergeben sich verschiedene Pfade für die Entwicklung der Strom- und Wärmeverbrauchswerte bis zum Jahr 2050. Außerdem wurde berechnet, mit welcher Erzeugungsstruktur diese Verbräuche gedeckt werden können. Als Grundlage für die Berechnungen

dieser Studie wurden die Annahmen und Ergebnisse des Maßnahmen szenarios verwendet.

Die Angaben über die technischen Potenziale der erneuerbaren Energiequellen wurden aus einer aktuellen Studie der Klima und Energieeffizienz Agentur (KEEA) in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES entnommen, die für die Stadt Frankfurt am Main und den Regionalverband FrankfurtRheinMain ermittelt wurden (KEEA, Fraunhofer-Institut für Wind- und Energiesysteme, 2014). In der Studie wurde außerdem das Konzept für ein Energiemonitoring erarbeitet (Klima- und Energieeffizienz Agentur (KEEA), 2014), welches zusammen mit den erfassten Potenzialen eine Grundlage für die Erstellung von regionsweiten Energiebilanzen darstellt.

## 8.5.2 Methodisches Vorgehen und Szenarien

Die Optimierungsrechnungen wurden mit dem am Fraunhofer ISE entwickelten kommunalen Energiesystemmodell »KomMod« durchgeführt, das als techno-ökonomisches Bottom-Up-Modell das Energiesystem eines Stadtteils, einer Kommune oder einer Region mit den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr abbildet. KomMod optimiert die Struktur, identifiziert also die optimale Konfiguration von Erzeugungsanlagen und Speichern, die es ermöglicht unter den vorgegebenen Randbedingungen den Energiebedarf zu jeder Stunde im Jahr zu decken und dabei insgesamt die geringsten Kosten aufweist. Gleichzeitig werden auch die Betriebsweisen der installierten Energieversorgungsanlagen optimiert. Der Bedarf an Strom, Wärme und Mobilitätsenergie ist dabei als Eingangsgröße vorgegeben in Bezug auf die Jahresmengen als auch auf ihre Profile, also die zeitliche Verteilung übers Jahr in Stundenschritten.

Alle Berechnungen erfolgen für ein beliebiges Zieljahr, für diese Studie ist dies das Jahr 2050. Das Zieljahr ist definiert durch die Eingangsdaten und Randbedingungen, die im Rahmen der Vorbereitung aufbereitet werden. D.h. es werden auf Basis von Annahmen für die Energieverbrauchsänderungen die Lastprofile für das Zieljahr berechnet (z.B. der erwartete Heizwärmebedarf für die Gebäude nach Durchführung von Sanierungsmaßnahmen unter Annahmen von Sanierungsraten), Annahmen über die Entwicklung von technischen und ökonomischen Kennwerten für die technischen Anlagen getroffen (z.B. der typische Wirkungsgrad und die Kosten für eine Photovoltaikanlage im Zieljahr auf Basis von Lernkurven) und Annahmen für veränderte Randbedingungen erarbeitet (z.B. Entwicklung der Einwohnerzahl und die industriellen Aktivitäten).

**Die Optimierung mit KomMod ist keine Prognose, sondern die mathematisch optimale Lösung für die vorgegebenen Eingangsdaten und Randbedingungen.** Das Ergebnis der Optimierungsrechnungen hängt stark von den getroffenen Annahmen ab, weshalb diese sorgfältig erarbeitet wer-

den müssen. Darüber hinaus ist es wichtig, Variantenrechnungen für unterschiedliche Annahmen durchzuführen, um die Robustheit der Ergebnisse zu prüfen. Die Unsicherheiten stecken in den Annahmen, die sowohl Prognosen sein können oder Zielvorgaben des Auftraggebers.

Die mathematische Optimierung ist sinnvoll, weil umfassende Energiesystemprognosen angesichts der zunehmenden Komplexität des Energiesystems ohne detaillierte Modellierung nicht fundiert zu erstellen sind. Die Entwicklung von Prognosen für die Eingangsdaten der Simulationen, d.h. für einzelne Anlagen, Komponenten oder Verbrauchsstrukturen sind dagegen möglich. Die Vorgehensweise ermöglicht es auch, durch Variation von Eingangsdaten und Randbedingungen den Einfluss von Unsicherheiten in den Prognosen auf das Gesamtsystem und damit die Robustheit von gewählten Lösungen zu überprüfen oder Zielsetzungen und Randbedingungen vorzugeben und deren Konsequenz auf das Gesamtsystem zu überprüfen.

Die Optimierung des Zielenergiesystems, in dieser Studie für das Jahr 2050, stellt den ersten Schritt dar. Darauf aufbauend muss in einem zweiten Schritt ein Transformationspfad für das Energiesystem, also einem Weg vom heutigen zum Zielenergiesystem entwickelt werden. Für den Transformationspfad hin zu einem Zielenergiesystem gibt es verschiedene Wege, deshalb müssen die möglichen Maßnahmen in Bezug auf ihre Umsetzbarkeit, gegenseitige Abhängigkeit (z.B. muss eine Infrastruktur wie ein Nahwärmenetz zuerst gebaut werden, bevor die Wärmezeugung darauf umgestellt werden kann), Akzeptanz, Finanzierbarkeit etc. bewertet werden und daraus dann eine zeitliche Abfolge der Maßnahmen entwickelt werden. Die Entwicklung eines Transformationspfades ist nicht Teil dieser Studie. Allerdings wurden im Rahmen des Generalkonzeptes bereits Maßnahmen identifiziert, auf deren Basis die nächsten Schritte geplant werden können.

In dieser Studie wird das Energiesystem der Stadt Frankfurt am Main ohne räumliche Auflösung betrachtet, d.h. dass Effekte, die durch die räumliche Verteilung von Anlagen und Verbrauchern verursacht werden, in der Optimierung nicht direkt berücksichtigt werden. In vereinfachter Art und Weise haben sie jedoch trotzdem Eingang gefunden, indem beispielsweise der mögliche Ausbau von Nahwärmenetzen durch die Limitierung der Zahl möglicher Nahwärmeanschlüssen abgebildet wurde. Grundsätzlich ist eine räumliche Auflösung mit KomMod möglich, im Rahmen dieser Studie wurde sie aber aus Zeitgründen nicht umgesetzt.

## Kommunales Energiesystem auf Basis erneuerbarer Energien

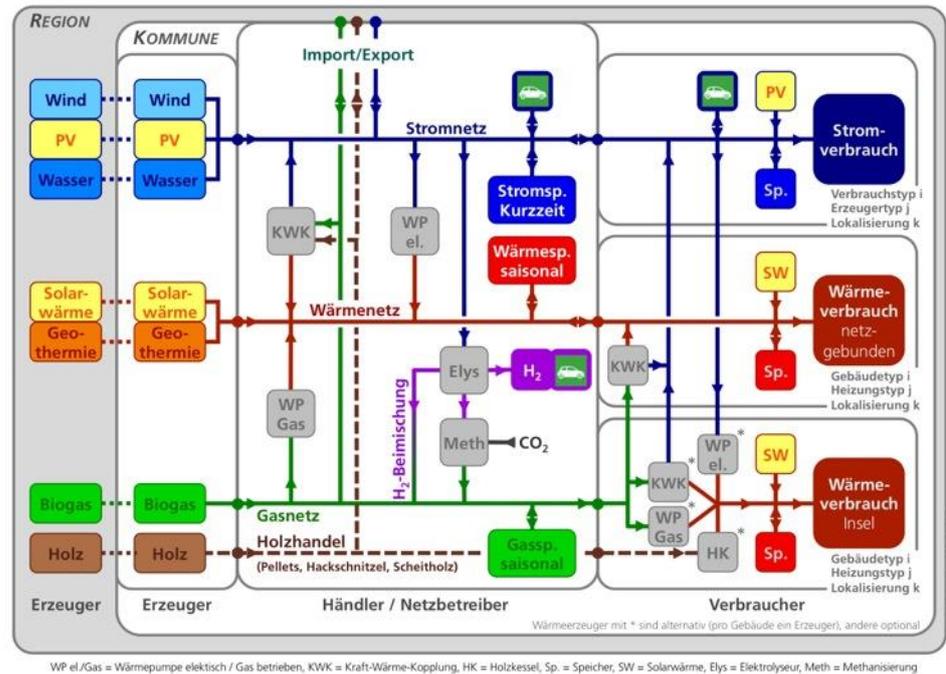


Abbildung 171: Energiesystemmodell für eine Vollversorgung mit erneuerbaren Energien mit Verknüpfung der Energiesektoren Strom, Wärme, Gas, Verkehr

Als Ergebnis der Optimierungsrechnungen liefert KomMod alle relevanten Kenndaten des kostenoptimalen Energiesystems, u.a. die Leistungen und sonstigen Kenndaten des installierten Kraftwerksparks, die installierte Speicherkapazität, die von den einzelnen Anlagen produzierten Energiemengen, deren Volllaststundenzahlen, den Flächenbedarf für die installierten Solaranlagen und die Kosten des Energiesystems. Die Kostenoptimierung beruht auf einem ökonomisch optimierten Betrieb jeder Anlage, als Ergebnis werden somit auch die Lastzeitreihen (Fahrpläne) für die einzelnen Erzeuger ausgegeben. Darüber hinaus wird ausgegeben, wann wie viel Energie importiert und exportiert wurde und welche Kosten damit verbunden sind. Die Struktur eines kommunalen Energiesystems auf Basis erneuerbarer Energien mit allen möglichen Verbindungen zwischen den einzelnen Energiesektoren ist vereinfacht in Abbildung 171 dargestellt.

### 8.5.3 Betrachtete Szenarien

Im Rahmen der Studie wurden Energieszenarien für die Stadt Frankfurt für das Jahr 2050 berechnet. Durch Variation der betrachteten Einzugsgebiete für die Nutzung erneuerbarer Energien wurden **drei Potenzialvarianten** definiert, die in Tabelle 9 im Überblick dargestellt und im Folgenden beschrieben sind. Das Gebiet der Regionalverbands FrankfurtRheinMain ist in der Abbildung 172 dargestellt.

### Potenzialvariante 1: »Stadt«

Es werden nur die Potenziale der erneuerbaren Energien (EE) genutzt, die sich innerhalb des Frankfurter Stadtgebiets befinden. Die Nutzung der Solarthermie ist nur auf Dachflächen, die von 50° Ost über Süd nach 50° West orientiert sind zugelassen, die Photovoltaik dagegen auf allen Dachflächen von 100° Ost über Süd nach 100° West sowie an Fassaden und auf Freiflächen.

### Potenzialvariante 2 »Stadt mit Region«

Zusätzlich zu den EE-Potenzialen in der Stadt werden 50% des Biomasse- und 50% des Windpotenzials des Regionalverbands FrankfurtRheinMain für die Deckung des Frankfurter Energiebedarfs genutzt. In Bezug auf Haushaltsabfälle wird angenommen, dass das gesamte Potenzial des Regionalverbands im Müllheizkraftwerk Frankfurt verbrannt wird, da sich in Frankfurt das einzige Müllheizkraftwerk im Regionalverband befindet. Bezüglich Wasserkraft ist in der Region kein nennenswertes Potenzial vorhanden.

Es werden nur erneuerbarer Strom, Biomasse und Hausabfälle nach Frankfurt importiert, ein Transport von Wärme aus der Region in die Stadt ist nicht vorgesehen.

### Potenzialvariante 3 »Stadt mit Bundesland«

In dieser Variante wird angenommen, dass bezüglich Biomasse und Windenergie ein dem Bevölkerungsanteil von Frankfurt proportionaler Anteil der hessischen Potenziale zur Verfügung steht. Dementsprechend wird 11,6% des gesamten hessischen Potenzials angesetzt, da der Bevölkerungsanteil 11,6% ausmacht.

Tabelle 9: Berücksichtigte Einzugsgebiete der verschiedenen erneuerbaren Energiequellen in den 3 Potenzialvarianten

Potenzial-variante ↓	Photo-voltaik	Wind	Biomasse	Wasser-kraft, Solar-thermie	Abfall
Stadt	Stadt*	Stadt	Stadt	Stadt	Stadt
Stadt und Region	Stadt* +50% RV	Stadt +50% RV	Stadt +50% RV	Stadt	Stadt + RV
Stadt und Bundesland	Stadt* +50% RV	11,6% BL	11,6% BL	Stadt	Stadt + RV

RV = Regionalverband, BL = »Stadt mit Bundesland« (Hessen)

\* Dächer + Fassaden + Freiflächen



## 8.6 Ergebnisse Szenarien 2050

Im Folgenden ist jeweils die kostengünstigste Energiesystemstruktur zur Deckung des Wärme- und Strombedarfs inklusive des Strombedarfs für die lokale Mobilität für drei Potenziale und andere Varianten von Randbedingungen dargestellt.

Eine wichtige Randbedingung mit großem Einfluss ist der Preis für Importstrom. Wird dieser niedriger angesetzt als eigenerzeugter Strom, wird dieser bevorzugt. Deshalb wird in den Rechnungen zunächst der Importstrom mit hohem Preis festgesetzt (24 €/kWh<sup>26</sup>), um eine hohe Eigenstromerzeugung zu erreichen. So wird eine Präferenz für die Eigenenerzeugung in Stadt, Region und »Stadt mit Bundesland« (soweit vorgesehen) erreicht. Um trotzdem keine Kostenverzerrung in den Gesamtkosten zu erhalten, werden in einem zweiten Schritt die Importkosten auf die internen Stromgestehungskosten gesetzt. Im Folgenden sind die daraus resultierenden Gesamtpreise angegeben.

Exportierter Strom wird grundsätzlich nicht vergütet. Damit wird verhindert, dass Strom verkauft wird, obwohl er intern genutzt werden könnte. Diese Annahme ist auch dahingehend realitätsnah, da davon auszugehen ist, dass der Export von Strom nur dann möglich ist, wenn große Mengen Solar- oder Windstrom zur Verfügung stehen. Das ist dann aber auch zeitgleich in anderen Regionen der Fall, so dass mit dem exportierten Strom kein oder nur ein geringes Einkommen Erlöst werden kann.

Vereinfachend wird weiterhin angenommen, dass der Ausgleich des Über- und Unterangebots von Strom durch das übergeordnete Netz zu jeder Zeit möglich ist, d.h. dass ausreichende Stromerzeugungskapazitäten bereitstehen.

### 8.6.1 Empfohlenes Szenario: »Stadt mit Bundesland, 10% Stromimport«

Die Berechnungen haben gezeigt, dass unter den geschilderten Annahmen das Ziel einer Vollversorgung der Stadt Frankfurt mit erneuerbaren Energien aus der Stadt und der Region FrankfurtRheinMain (50% des Regionalpotenzials) nur unter Installation einer unrealistisch großen Kapazität an Stromspeichern möglich ist, was zu sehr hohen Kosten führt. Da Windenergie und Biomasse vor allem im ländlichen Raum erzeugt werden, wo ein relativ geringer

---

<sup>26</sup> Alle Kostenangaben in dieser Studie sind – soweit nicht anders angegeben – Kosten in 2013er Werten, so dass sie mit heutigen Preisen vergleichbar sind.

Energiebedarf besteht, ist es sinnvoll, für diese Ressourcen ein größeres Einzugsgebiet zu wählen. Unter dem Szenario »Stadt mit Bundesland« wurde das Biomasse- und Windpotenzial des Bundeslandes Hessen mit einbezogen und ein Anteil proportional zum Bevölkerungsanteil von Frankfurt an der Gesamtbevölkerung von Hessen (11,6%).

Mit der Potenzialvariante »Stadt mit Bundesland« ist eine Vollversorgung zu jeder Stunde im Jahr möglich (Autarkie), doch auch sie erfordert relativ große elektrische Speicherkapazitäten, die zu relativ hohen Energiekosten führen. Da davon auszugehen ist, dass im künftigen Energiesystem auch über die Bundesländergrenzen hinaus ein Austausch von Strom stattfinden wird, **wird als Ergebnis der Optimierungsrechnungen die Variante »Stadt mit Bundesland« mit 10% Stromimport als Zielenergieszenario empfohlen**, da sie einen guten Kompromiss für einen hohen Selbstversorgungsanteil durch vor Ort erzeugter erneuerbarer Energien und noch akzeptablen Energiekosten durch die limitierte elektrische Speicherkapazität darstellt. **Die durchschnittlichen Stromgestehungskosten betragen 12 €/kWh**. In diesen Kosten sind die Kosten für die Speicher schon eingerechnet. Da die Wärmeversorgung vollständig aus eigenen erneuerbaren Energien erfolgt und der Wärme- und Stromverbrauch fast gleich hoch sind, beträgt der **Importanteil am Gesamtenergieverbrauch 5% und der Selbstversorgungsgrad 95%**.

In diesem Szenario wird der Strom zu 34% durch Windenergie und zu 32% durch PV erzeugt. Biomasse deckt 15% des Strombedarfs und Abfall 9%. Der Wärmebedarf wird zu 21% durch Wärmepumpen gedeckt, zu 22% durch Solarthermie und zu 11% durch Kessel. Die Biomassekraftwerke nehmen einen Anteil von 13% ein, während der Abfall im Wärmebereich mit 31% eine größere Rolle spielt als im Strombereich.

Durch den hohen Anteil an volatilen Stromerzeugern sind zum Erreichen dieses hohen Deckungsgrades elektrische Speicherkapazitäten von 2036 MWh nötig. Die thermischen Speicher befinden sich mit 2594 MWh in einer ähnlichen Größenordnung. Die Potenziale der verschiedenen Energieträger werden in diesem Szenario vollständig ausgenutzt bis auf die PV, deren Potenzial nur zu 31,9% genutzt wird. Dies bedeutet, dass zum Beispiel bei der Wahl der Freiflächen große Freiheiten bestehen, welche Flächen genutzt werden sollen. Damit ermöglicht die PV auch einen Ausgleich bei den Erzeugungstechnologien, falls beispielsweise das Wind- oder Biomassepotenzial geringer ausfällt als erwartet.

In allen Szenarien außer dem Szenario »Ohne Restriktionen« ist vorgegeben, dass das Solarthermiepotenzial vollständig genutzt wird. Da die Vergleichs-

rechnungen nur geringe Kostenunterschiede mit und ohne dieser Vorgabe gezeigt haben und davon ausgegangen wird, dass das Energiesystem am robustesten und realistischsten ist, wenn der Erzeugungsmix so divers wie möglich ist, erscheint diese Vorgabe sinnvoll zu sein. Wie in 8.6.2 zu sehen ist, wird aber auch bei der Potentialvariante »Stadt mit Bundesland« im Szenario »Ohne Restriktionen« schon 77% des Solarthermiepotenzials aus ökonomischen Gründen ausgeschöpft.

Tabelle 10: Ergebnisse »Stadt mit Bundesland, 10% Stromimport«

Elektrischer Gesamtenergiebedarf ohne WP [GWh]	4.964
Elektrischer Gesamtenergiebedarf mit WP [GWh]	5.224
Thermischer Gesamtenergiebedarf [GWh]	5.267
Strombereitstellung in der Stadt bzw. Region [GWh]	5.579
<b>Stromeigenerzeugungsanteil [%]</b>	<b>90%</b>
Kum. Stromimport [GWh]	522
abgeregelte Strommenge[GWh]	877
Nivellierte Gesamtkosten [Mio € <sub>2013</sub> /a]	1.086
Gesamtimportkosten [Mio € <sub>2013</sub> /a]	63
<b>Durchschnittliche Stromgestehungskosten [€ct/kWh]</b>	<b>12,0</b>

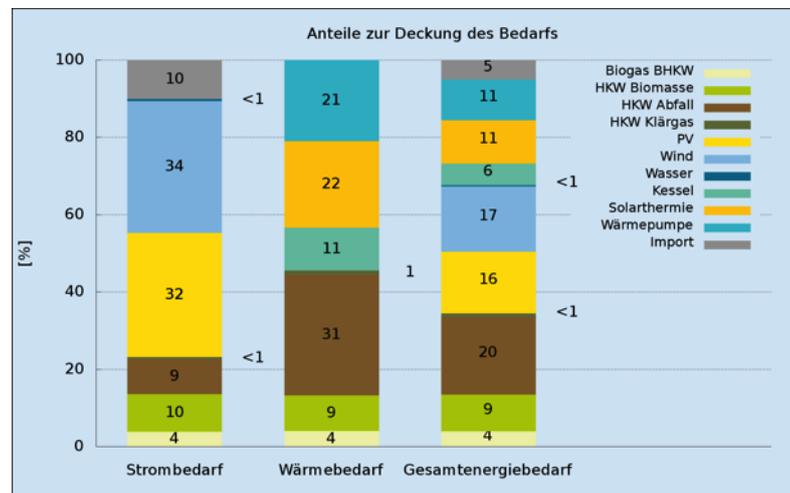


Abbildung 173: Anteile der Energiequellen am Energiebedarf

Variante »Stadt mit Bundesland, 10% Stromimport« (Strom, Wärme, gesamt)

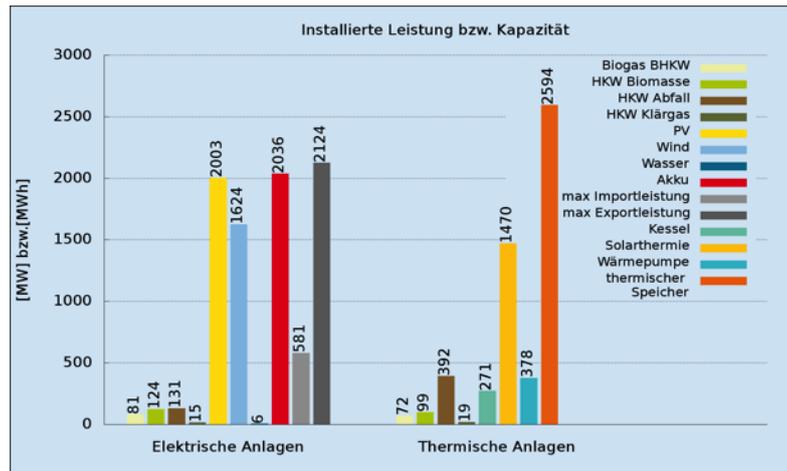


Abbildung 174: Installierte elektrische und thermische Leistung Variante »Stadt mit Bundesland, 10% Stromimport«

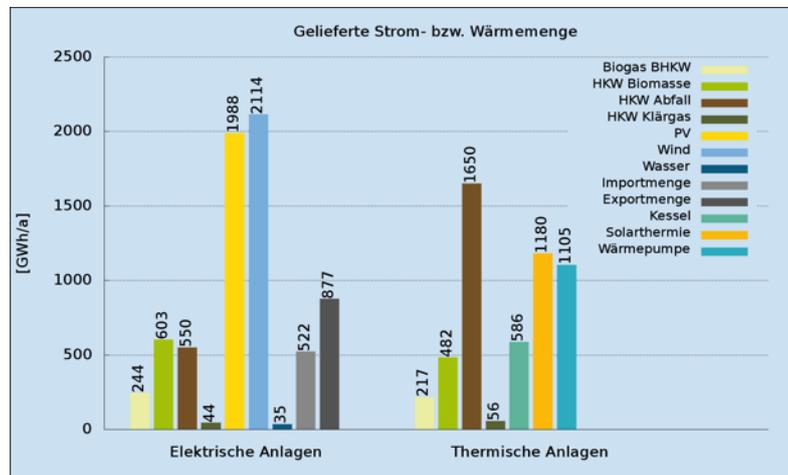


Abbildung 175: Gelieferte elektrische und thermische Energie Variante »Stadt mit Bundesland, 10% Stromimport«

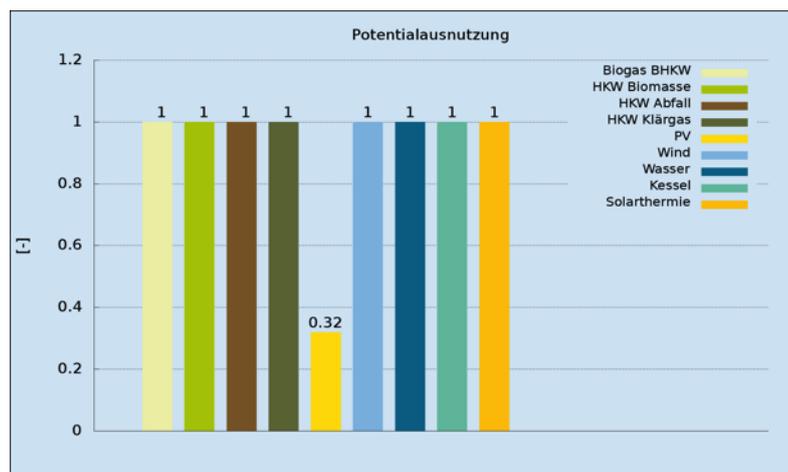


Abbildung 176: Potentialausnutzung Variante »Stadt mit Bundesland, 10% Stromimport«

Das empfohlene Zielenergieszenario ist in Abbildung 177 zusammenfassend dargestellt. Daraus ist auch ersichtlich, welche Anteile der verschiedenen Energiequellen aus welchem Gebiet stammen (Stadt, Region, Bundesland) und wie sich der Strom- und Wärmeverbrauch auf die Sektoren Privathaushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD), Industrie und lokale Mobilität aufteilt.

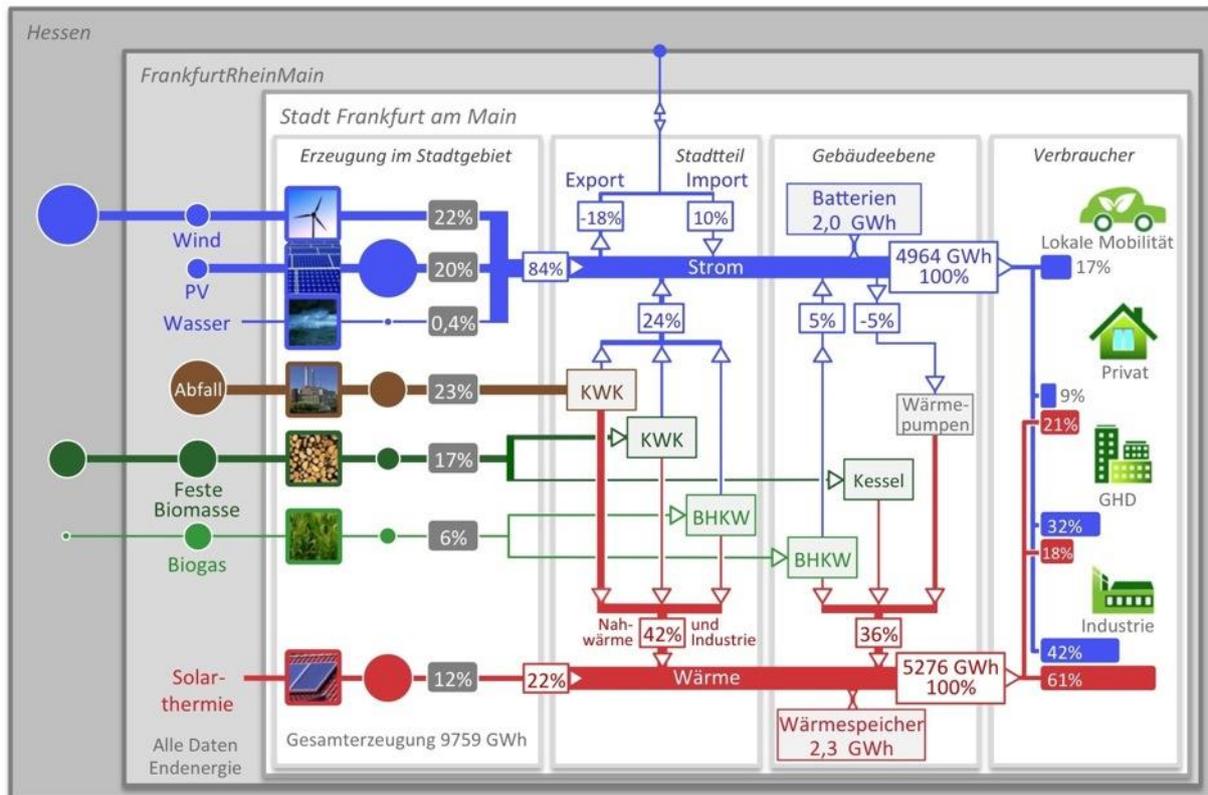


Abbildung 177: Energiesystemstruktur der Variante »Stadt mit Bundesland, 10% Stromimport« mit Darstellung der Energieerzeuger, -verbraucher und der Energieströme, die Kreisflächen der Ressourcen entsprechen den Beiträgen der Energieerzeuger

## 8.6.2 Szenarien der Potenzialvariante »Stadt mit Bundesland«

Für die Potenzialvariante »Stadt mit Bundesland« wurden zum Vergleich des Szenarios »10% Stromimport« noch das Szenario »Ohne Restriktionen«, in dem keine Vorgaben bezüglich eines Mindestdeckungsgrades gemacht wurden, sowie das Szenario »Autarkie«, in dem jeglicher Stromimport verboten ist, berechnet. Stromexport ist bei »Autarkie« erlaubt, da damit keine Erlöse erzielt werden, entspricht dieser einer Abregelung der PV- und Windkraftanlagen, die so zu Zeiten eines großen Wind- oder Sonnenangebots in Teillast gefahren werden können.

Im »Ohne Restriktionen« Szenario ergibt sich ein Deckungsgrad bei der Stromerzeugung von 75%. Elektrische Speicher werden keine installiert, weshalb die Stromgestehungskosten geringer als im präferierten Szenario ausfallen, sie betragen 8,7 €ct/kWh. Wind nimmt mit 33% den größten Anteil an der Bedarfsdeckung ein, PV macht 18% aus. Das Windpotenzial wird mit 92% fast vollständig, das PV Potenzial wird nur zu 17,4% ausgeschöpft.

Das »Autarkie« Szenario zeigt, dass eine vollständige Deckung des Strom- und Wärmebedarfs mit den vorhandenen Potenzialen möglich ist. Durch den hohen Anteil an volatilen Stromerzeugern von 73% ist eine hohe installierte elektrische Speicherkapazität von 9160 MWh nötig, die viereinhalb mal so hoch ist wie beim Szenario »10% Importstrom«. Dadurch ergeben sich die Stromgestehungskosten zu 22,1 €ct/kWh. Aus diesem Grund wird das »Autarkie« Szenario nicht empfohlen, da durch das Zulassen einer relativ geringen Importstrommenge die Stromgestehungskosten deutlich gesenkt werden können (siehe 8.6.1).

Anmerkung: Trotz der erwarteten deutlichen Kostenreduktion bei elektrischen Speichern ist der Stromimport auch bei hoch angesetzten Importkosten von 24 €ct/kWh immer noch günstiger als die Nutzung von elektrischen Speichern. Deshalb sind im Szenario »Ohne Restriktionen« keine elektrischen Speicher vorgesehen. Dies widerspricht der aktuellen Erfahrung, dass sich eine hohe Eigenerzeugung von Strom mit PV-Anlagen und Batterien heute vielfach schon lohnt, da durch die große Differenz von ca. 10 €ct/kWh Solarstromgestehungskosten zu ca. 28 €ct/kWh Strombezugspreis noch ein großer Puffer für die Speicherfinanzierung vorhanden ist. Allerdings resultiert in diesem Fall der wesentliche Kostenvorteil für Eigenerzeuger aus der Einsparung von Netznutzungsgebühren, Steuern und Umlagen und nicht aus den vermiedenen Stromerzeugungskosten. In den Simulationen wird dieser Effekt nicht berücksichtigt da nur Erzeugungskosten verglichen werden. Es ist davon auszugehen, dass langfristig der reine Kostenvergleich den realen Bedingungen entspricht, da sich das Strommarktdesign in diese Richtung verändern wird.

Tabelle 11: Ergebnisse Variante »Stadt mit Bundesland«,  
Vergleich der Szenarien »Ohne Restriktionen« und »Autarkie«

	Ohne Restriktionen	Autarkie
Elektrischer Gesamtenergiebedarf ohne WP [GWh]	4.964	4.964
Elektrischer Gesamtenergiebedarf mit WP [GWh]	5.264	5.201
Thermischer Gesamtenergiebedarf [GWh]	5.267	5.267
Strombereitstellung in der Stadt bzw. Region [GWh]	4.510	5.652
<b>Stromeigenerzeugungsanteil [%]</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>
Kum. Stromimport [GWh]	1.293	0
Kum. Stromexport [GWh]	539	449
Nivellierte Gesamtkosten [Mio €/a]	839	1.594
Gesamtimportkosten [Mio €/a]	112	0
<b>Durchschnittliche Stromgestehungskosten [€/kWh]</b>	<b>8,7</b>	<b>22,1</b>

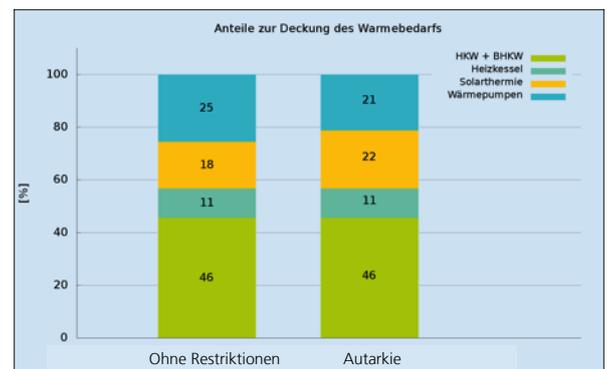
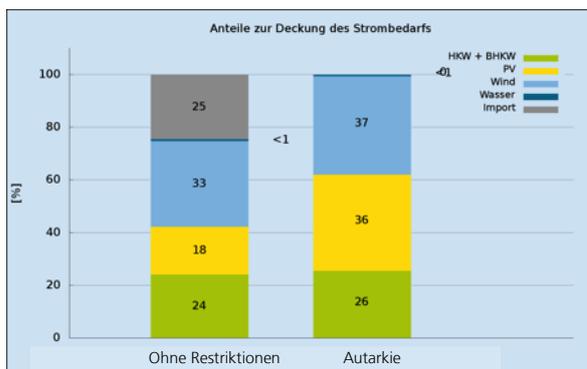
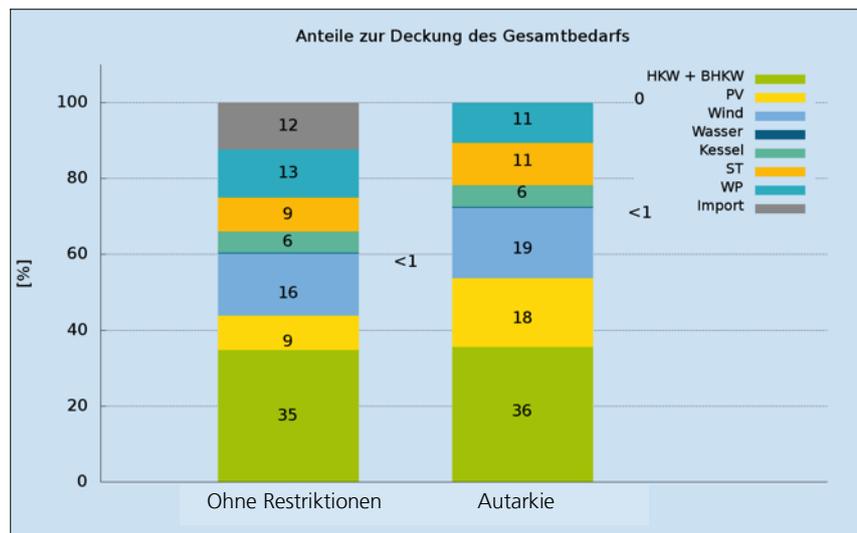


Abbildung 178: Anteile der Energiequellen am Energiebedarf Variante »Stadt mit Bundesland«,  
Vergleich der Szenarien »Ohne Restriktionen« und »Autarkie« (Strom, Wärme, gesamt)

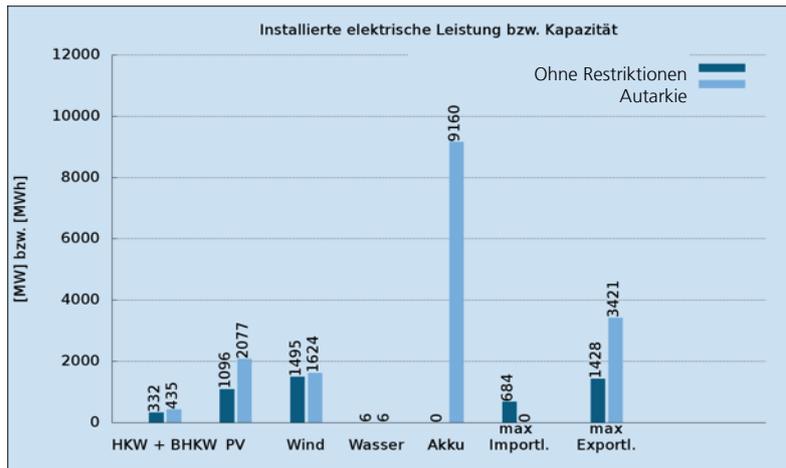


Abbildung 179: Installierte elektrische Leistung Variante »Stadt mit Bundesland«, Vergleich der Szenarien »Ohne Restriktionen« und »Autarkie«

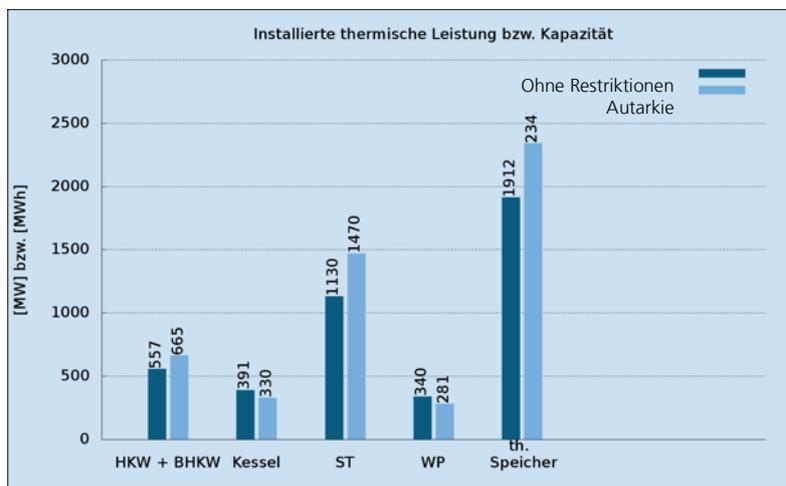


Abbildung 180: Installierte thermische Leistung Variante »Stadt mit Bundesland«, Vergleich der Szenarien »Ohne Restriktionen« und »Autarkie«

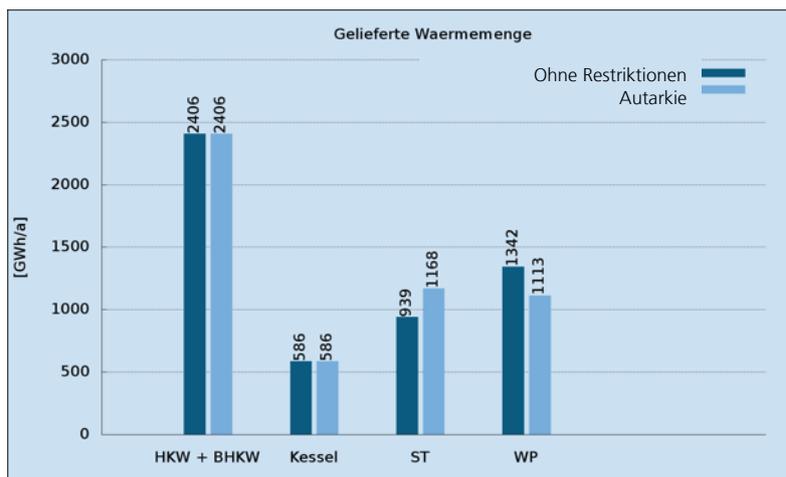


Abbildung 181: Gelieferte elektrische und thermische Energiemenge Variante »Stadt mit Bundesland«, Vergleich der Szenarien »Ohne Restriktionen« und »Autarkie«

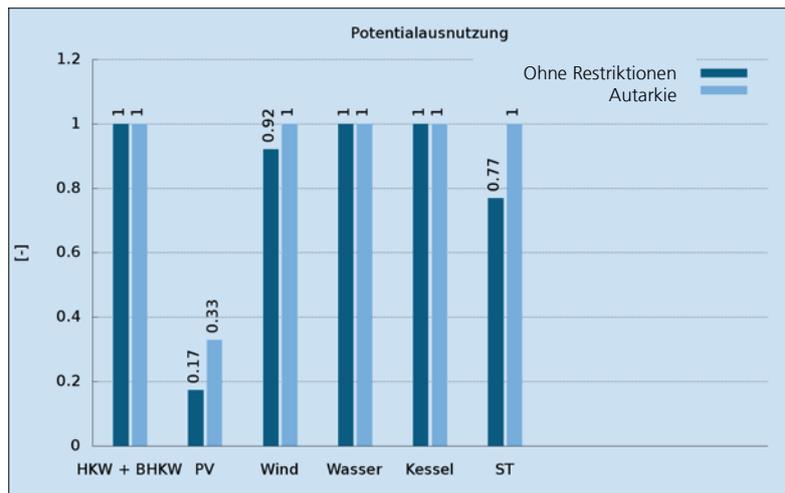


Abbildung 182: Potentialausnutzung Variante »Stadt mit Bundesland«, Vergleich der Szenarien »Ohne Restriktionen« und »Autarkie«

### 8.6.3 Szenarien der Potenzialvariante »Stadt und Region«

Um aufzuzeigen, welche Konsequenzen die Beschränkung auf die erneuerbare Energienpotenziale der Stadt Frankfurt und des Regionalverbands FrankfurtRheinMain hätte, wurden für die Potenzialvariante »Stadt und Region« verschiedene Szenarien berechnet. Dabei wird angenommen, dass die Stadt Frankfurt die Hälfte der Potenziale des Regionalverbands an Wind, Biomasse und PV nutzen kann.

### 8.6.4 Szenario »Ohne Restriktionen«

Im Szenario »Ohne Restriktionen« wird nur ein Deckungsgrad in der Stromerzeugung von 53% erreicht werden. Eine Wärmevollversorgung ist wie in allen anderen Szenarien vorgegeben. Die Stromgestehungskosten liegen mit bei 8,9 €/ct/kWh ähnlich hoch wie in »Stadt mit Bundesland, Ohne Restriktionen«. Allerdings ist das Potenzial für Windenergie im Regionalverband so gering, dass bei vollständiger Ausnutzung lediglich 5% des Strombedarfs durch Windstrom gedeckt werden. PV deckt mit 25% einen deutlich größeren Anteil des Strombedarfs, dessen Potenzial wird zu 23,6% genutzt.

Tabelle 12: Ergebnisse Variante »Stadt und Region«, Szenario »Ohne Restriktionen«

	Ohne Restriktionen
Elektrischer Gesamtenergiebedarf ohne WP [GWh]	4.964
Elektrischer Gesamtenergiebedarf mit WP [GWh]	5.326
Thermischer Gesamtenergiebedarf [GWh]	5.267
Strombereitstellung in der Stadt bzw. Region [GWh]	2.919
<b>Stromeigenerzeugungsanteil [%]</b>	<b>53%</b>
Kum. Stromimport [GWh]	2.506
Kum. Stromexport [GWh]	98
Nivellierte Gesamtkosten [Mio €/a]	832
Gesamtimportkosten [Mio €/a]	221
<b>Durchschnittliche Stromgestehungskosten [€/kWh]</b>	<b>8,9</b>

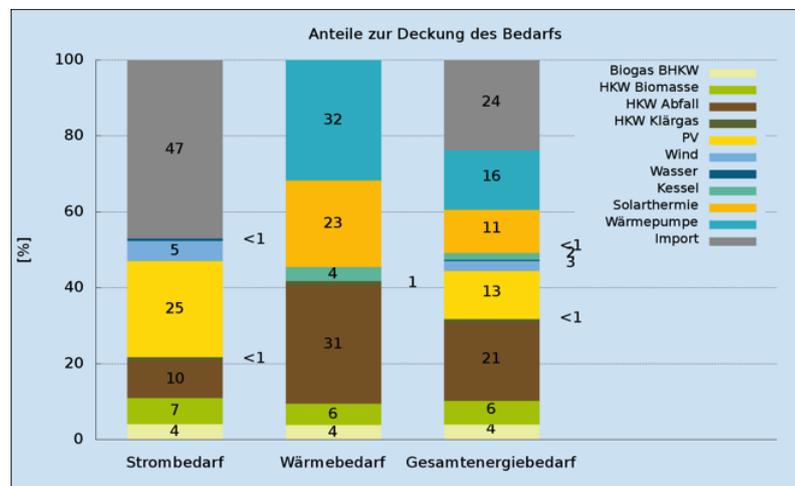


Abbildung 183: Anteile der Energiequellen am Energiebedarf Variante »Stadt und Region«, Szenario »Ohne Restriktionen« (Strom, Wärme, gesamt)

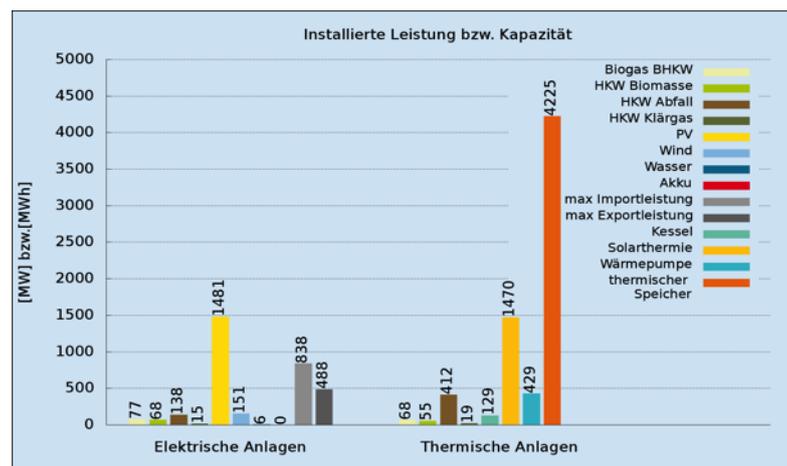


Abbildung 184: Installierte elektrische und thermische Leistung Variante »Stadt und Region«, Szenario »Ohne Restriktionen«

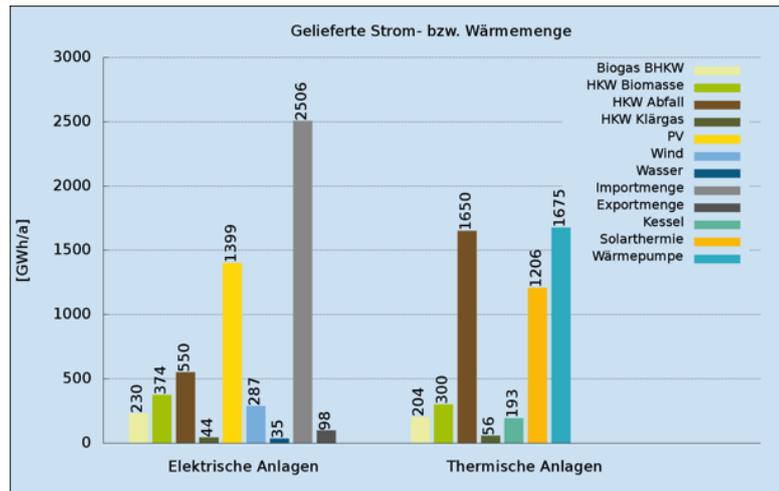


Abbildung 185: Gelieferte elektrische und thermische Energiemenge  
 Variante »Stadt und Region«, Szenario »Ohne Restriktionen«

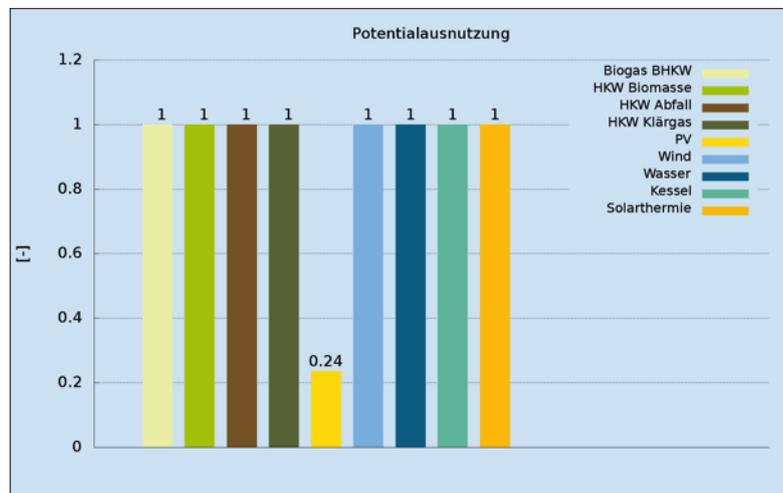


Abbildung 186: Potentialausnutzung Variante »Stadt und Region«,  
 Szenario »Ohne Restriktionen«

### 8.6.5 Szenarien »Begrenzung Stromimport«

Um den Zusammenhang zwischen Speicherbedarf/Energiekosten und Stromeigenerzeugungsanteil zu ermitteln, wurden für die Potenzialvariante »Stadt und Region« drei verschiedene Szenarien berechnet mit der Vorgabe eines Stromeigenerzeugungsanteils von 70%, 80% und 90%.

Da das Windkraft-, das Biomasse-, das Wasserkraft- und das Abfallpotenzial im Szenario »Ohne Restriktionen« bereits vollständig ausgenutzt sind, kann zur Importreduzierung nur der Anteil an PV-Strom erhöht werden. Dies führt dazu, dass bei einer Stromeigenerzeugung von 90% bereits 68% des Strombedarfs durch PV Strom gedeckt werden müssten, was eine installierte elektrische Speicherkapazität von 8037 MWh erfordert und zu Stromgestehungskosten von 20 €/kWh führt. Eine so einseitige Deckung des Strombedarfs

durch PV birgt Risiken, beispielsweise ist der Aufwand zur Sicherstellung der Versorgungssicherheit bei einer längeren Schlechtwetterperiode relativ hoch. Insbesondere die Szenarien 80% und 90% sind deshalb nicht nur wegen der Kosten nicht empfehlenswert.

Tabelle 13: Ergebnisse »Stadt und Region«, »Begrenzung Stromimport«

<b>Stromeigenerzeugungsanteil</b>	<b>70%</b>	<b>80%</b>	<b>90%</b>
Elektrischer Gesamtenergiebedarf ohne WP [GWh]	4.964	4.964	4.964
Elektrischer Gesamtenergiebedarf mit WP [GWh]	5.347	5.347	5.346
Thermischer Gesamtenergiebedarf [GWh]	5.267	5.267	5.267
Strombereitstellung in der Stadt bzw. Region [GWh]	4.681	5.508	6.338
Kum. Stromimport [GWh]	1.604	1.069	535
Kum. Stromexport [GWh]	937	1.229	1.525
Nivellierte Gesamtkosten [Mio €/a]	1.242	1.495	1.733
Gesamtimportkosten [Mio €/a]	226	185	107
<b>Durchschnittliche Stromgestehungskosten [€ct/kWh]</b>	<b>14,1</b>	<b>17,3</b>	<b>20,0</b>

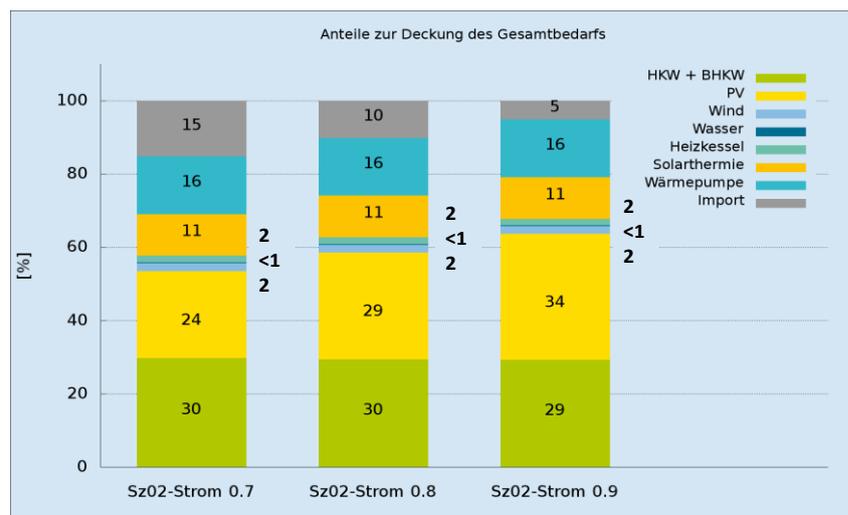


Abbildung 187: Anteile der Energiequellen am Gesamtenergiebedarf Variante »Stadt und Region«, Szenarien »Begrenzung Stromimport«, Vergleich der Eigenstromversorgung zu 70%, 80% und 90%

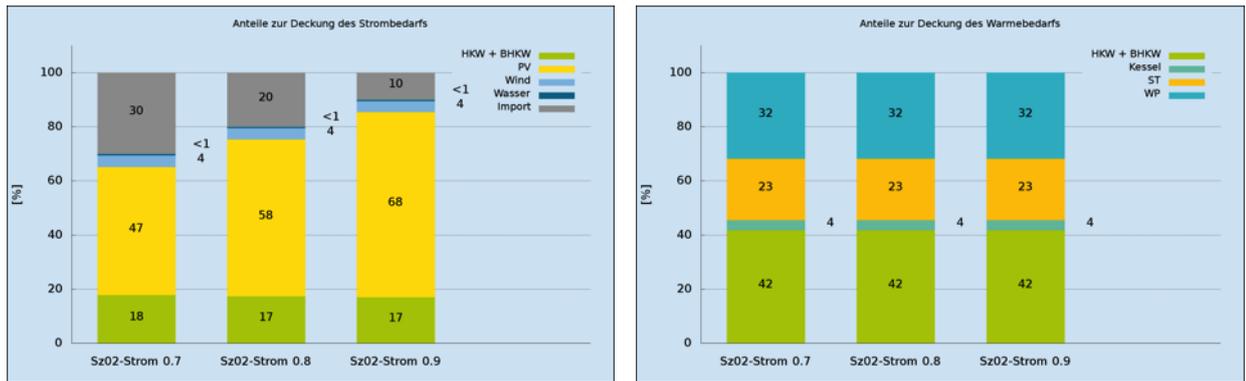


Abbildung 188: Anteile der Energiequellen am Strom- und Wärmebedarf Variante »Stadt und Region«, Szenarien »Begrenzung Stromimport«, Vergleich der Eigenstromversorgung zu 70%, 80% und 90%

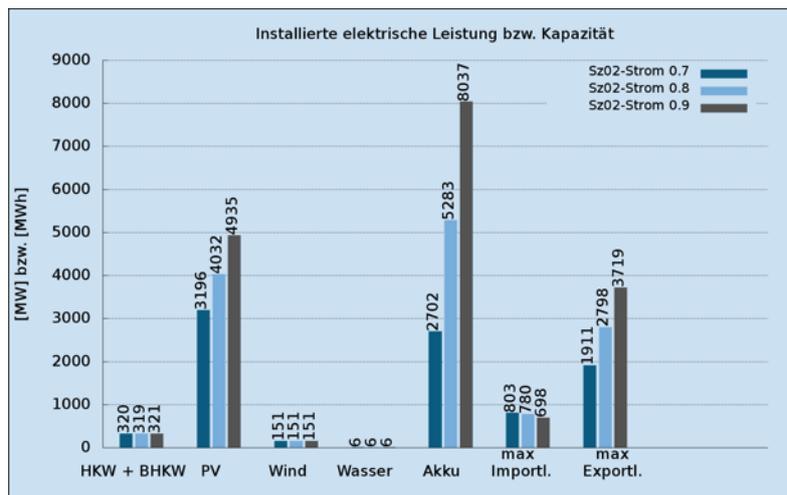


Abbildung 189: Installierte elektrische Leistung Variante »Stadt und Region«, Vergleich der Eigenstromversorgung zu 70%, 80% und 90%

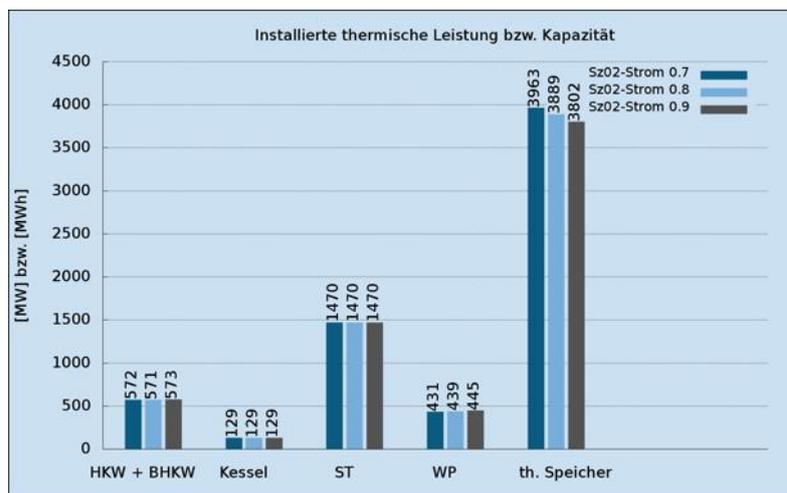


Abbildung 190: Installierte thermische Leistung Variante »Stadt und Region«, Vergleich der Eigenstromversorgung zu 70%, 80% und 90%

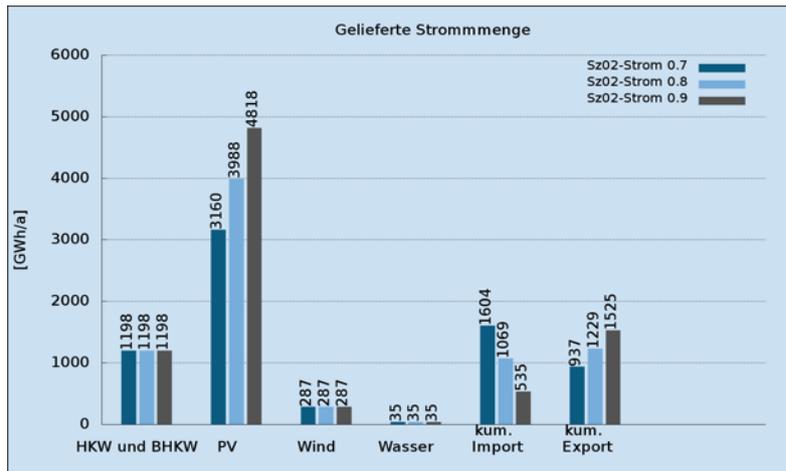


Abbildung 191: Gelieferte Strommenge nach Erzeugern Variante »Stadt und Region«, Vergleich der Eigenstromversorgung zu 70%, 80% und 90%

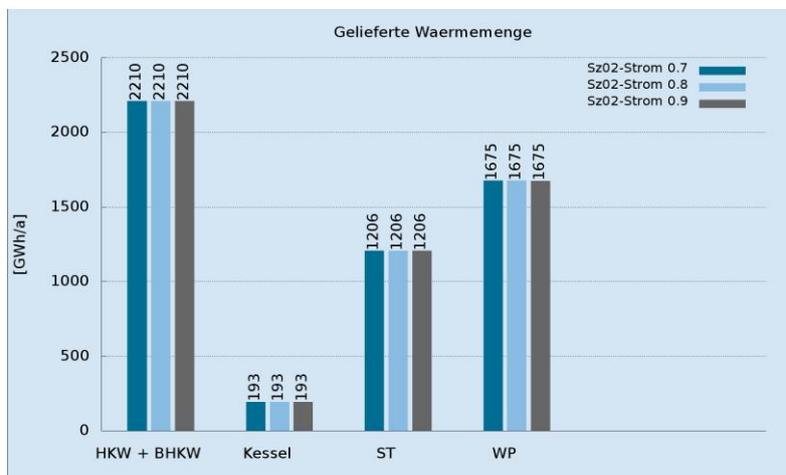


Abbildung 192: Gelieferte Waermemenge nach Erzeugern Variante »Stadt und Region«, Vergleich der Eigenstromversorgung zu 70%, 80% und 90%

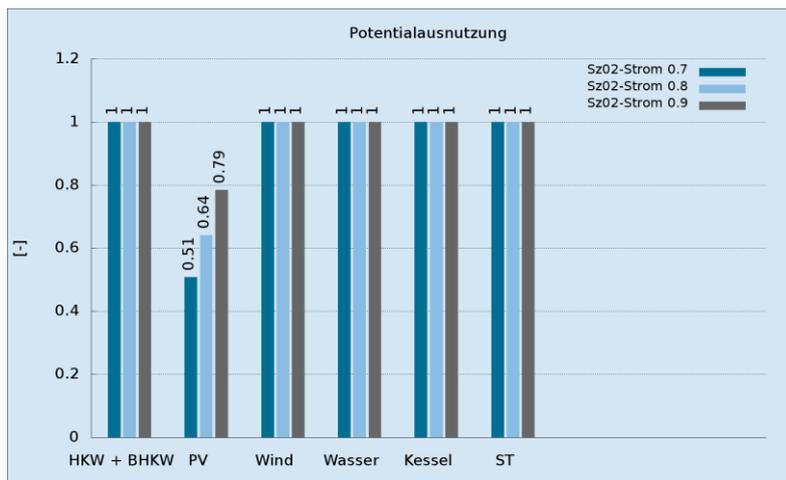


Abbildung 193: Potentialausnutzung Variante »Stadt und Region«, Vergleich der Eigenstromversorgung zu 70%, 80% und 90%

## 8.6.6 Szenarien der Potenzialvariante »Stadt«

Da die Potenziale zur Nutzung erneuerbarer Energien in einer dichtbebauten und –bevölkerten Stadt naturgemäß begrenzt sind, müssen mittlere und größere Städte mit der umliegenden Region kooperieren, um durch den Import von erneuerbaren Energien in Form von Biomasse sowie Strom aus Wasserkraft, Windkraft oder Freiflächen-Photovoltaik eine nachhaltige und klimaneutrale Energieversorgung zu erreichen. Trotzdem stellt sich die Frage, wie weit sich eine Stadt wie Frankfurt aus dem eigenen Potenzial an erneuerbaren Energien versorgen kann. Dies wurde berechnet, die entsprechenden Ergebnisse werden in diesem Kapitel vorgestellt.

Die Nutzung aller erneuerbaren Energienpotenziale führt zu einer Deckung des Strombedarfs von 30% und des Wärmebedarfs von 31%, d.h. im Gesamtenergiebedarf 30%. Da nur Strom importiert werden kann, wird als Berechnungsergebnis der Restwärmebedarf von 69% mit Wärmepumpen gedeckt. Da es sich nur um ein theoretisches Szenario handelt, ist jedoch nur die interne Erzeugung relevant. Hier zeigt sich, dass die Solarenergie mit 23% PV-Strom am Strombedarf und die Solarthermie mit 17% am Wärmebedarf das größte Potenzial in der Stadt aufweist. Der Anteil der Energiebedarfsdeckung durch Abfall liegt bei 6%.

Tabelle 14: Ergebnisse »Stadt-Import/Export«

	Ohne Restriktionen
Elektrischer Gesamtenergiebedarf ohne WP [GWh]	4.964
Elektrischer Gesamtenergiebedarf mit WP [GWh]	5.784
Thermischer Gesamtenergiebedarf [GWh]	5.267
Strombereitstellung in der Stadt bzw. Region [GWh]	1.777
<b>Stromeigenerzeugungsanteil [%]</b>	<b>30%</b>
Kum. Stromimport [GWh]	4.063
Kum. Stromexport [GWh]	56
Nivellierte Gesamtkosten [Mio €/a]	1.090
Gesamtimportkosten [Mio €/a]	435
<b>Durchschnittliche Stromgestehungskosten [€ct/kWh]</b>	<b>10,7</b>

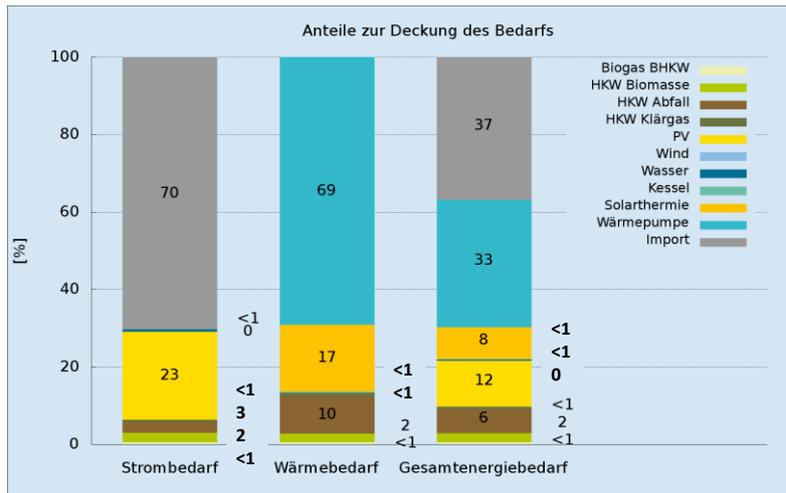


Abbildung 194: Anteile der Energiequellen am Energiebedarf Variante »Stadt«,

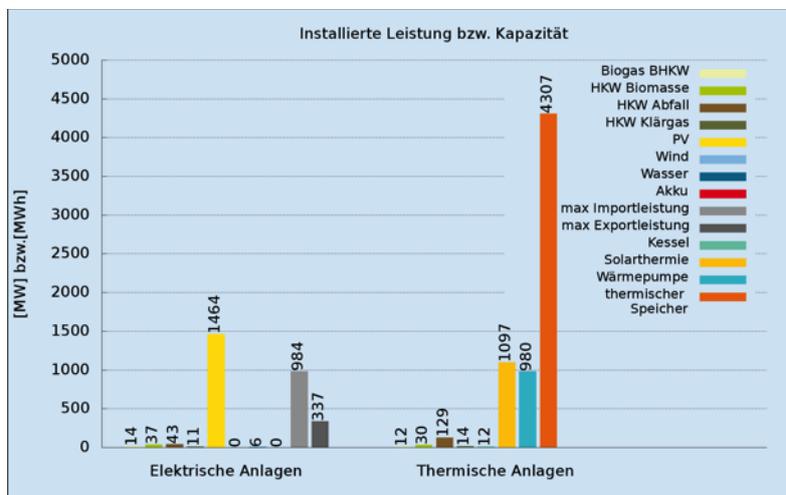


Abbildung 195: Installierte elektrische und thermische Leistung Variante »Stadt«,

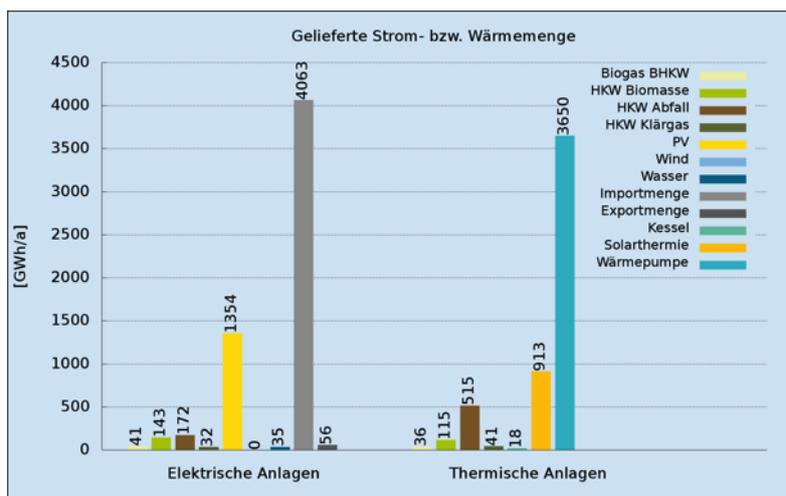


Abbildung 196: Gelieferte elektrische und thermische Energiemenge Variante »Stadt«,

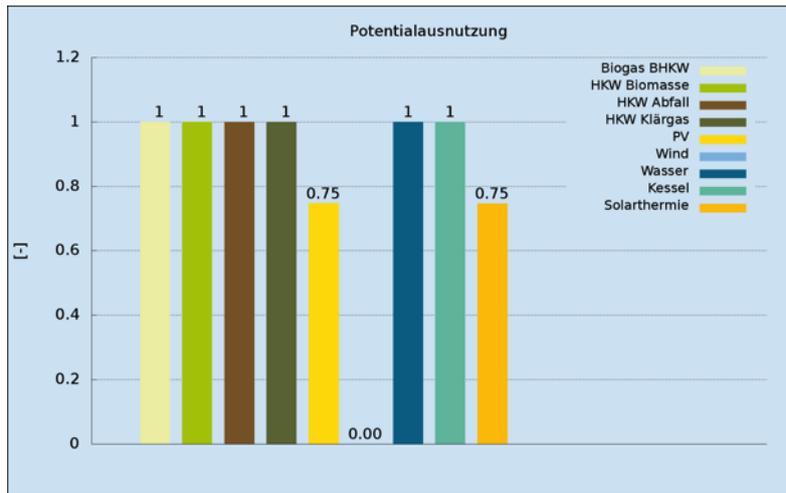


Abbildung 197: Potentialausnutzung Variante »Stadt«, Szenario »Ohne Restriktionen«

## 8.6.7 Zeitlich aufgelöste Detailanalyse

Die KomMod-Berechnungen werden in Stundenauflösung durchgeführt. Dabei wird nicht nur die Struktur des Energiesystems optimiert, sondern auch die kostenoptimale Betriebsweise identifiziert. Die Analyse von zeitlich aufgelösten Detaillergebnissen erlaubt weitere Erkenntnisse für die optimale Ausgestaltung des Energiesystems. In diesem Kapitel werden beispielhaft Detaillergebnisse der Variante »Stadt mit Bundesland«, Szenario »10% Stromimport« in zeitlich hochaufgelösten Diagrammen dargestellt. Diese stellen jeweils eine Woche dar.

Die zeitlichen Verläufe zur Wärmebedarfsdeckung werden im Vergleich einer Frühlings- und einer Herbstwoche dargestellt. Die rote Linie stellt jeweils den Bedarf dar, der von den Wärmeerzeugern gedeckt werden muss, da im Wärmebereich keine Importe oder Exporte erlaubt sind. Die Einspeicherung in thermische Speicher ist in den Diagrammen negativ in orange dargestellt, die Ausspeicherung positiv (siehe Abbildung 198, Abbildung 199).

Im Frühling (und im Sommer) wird um die Mittagszeit der gesamte Wärmebedarf durch die Solarthermie gedeckt (siehe z.B. Stunde 3110). Die Überschusswärme kann in thermischen Speichern eingespeichert werden und einen Teil des Bedarfes in der Nacht decken (siehe z.B. Stunde 3120). Der Bedarf, der nicht über Speicher gedeckt werden kann, wird durch die Heizkraftwerke gedeckt. Im Frühjahr kommen die Wärmepumpen aufgrund des guten Sonnenangebotes nur sehr begrenzt zum Einsatz.

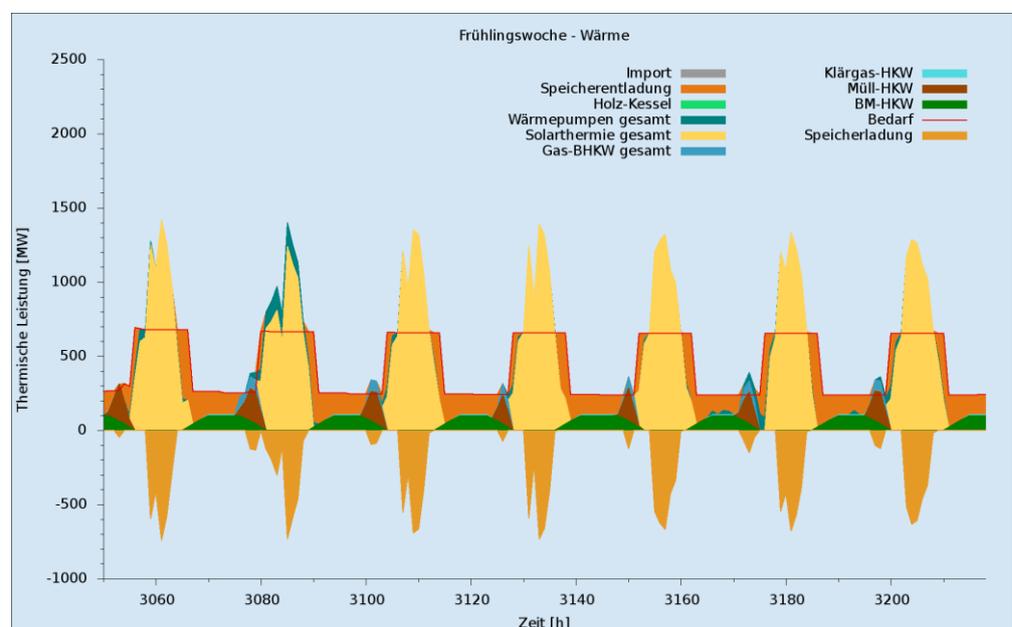


Abbildung 198: Wärmebedarfsdeckung Variante »Stadt mit Bundesland, 10% Stromimport«,

Im Herbst kann, je nach Wetterlage, nur noch an einzelnen Tagen Wärme mit Solarthermieanlagen erzeugt werden. Ein Großteil der Wärme wird nun durch die Heizkraftwerke und die Kessel abgedeckt (siehe Abbildung 199). Auch die Wärmepumpen haben einen größeren Anteil an der Bedarfsdeckung. An Tagen, an denen durch die Solarthermie keine Wärme erzeugt werden kann, laufen die Heizkraftwerke konstant durch und decken so die Grundlast vollständig ab (siehe Stunde 7670). An Tagen, an denen durch Solarthermie ein Teil des Wärmebedarfes gedeckt werden kann, werden die Heizkraftwerke heruntergefahren (siehe Stunde 7690) oder sogar für einen Tag vollständig abgeschaltet (siehe Stunde 7740). Eine Reduzierung der Heizkraftwerksleistung setzt allerdings eine ausreichende Stromerzeugung voraus, ist dies nicht gegeben, kann das dieses auch weiter laufen und die Überschusswärme eingespeichert werden (siehe Stunde 7750).

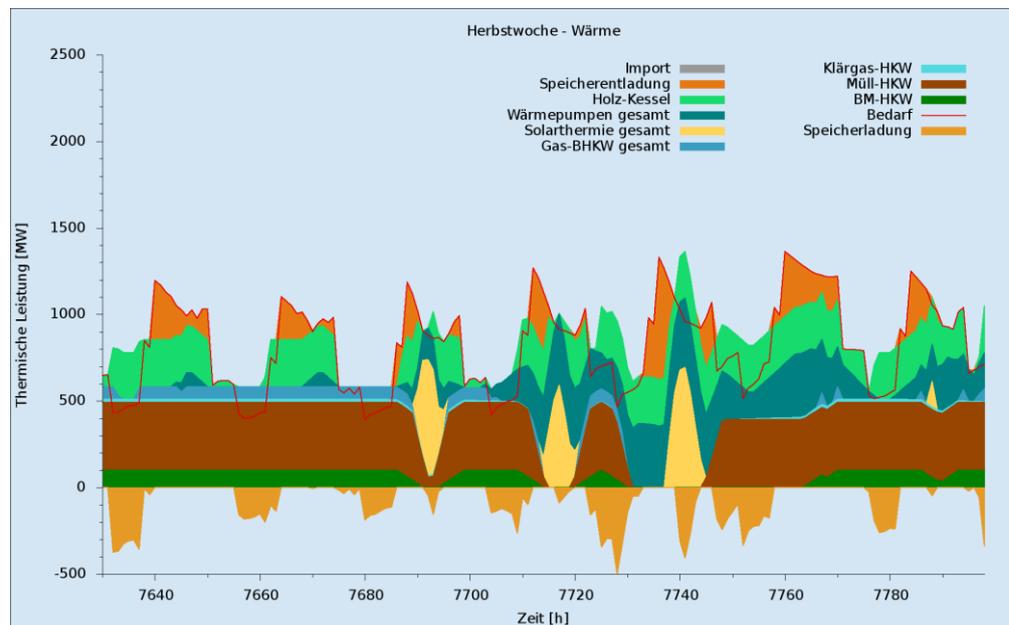


Abbildung 199: Wärmebedarfsdeckung Variante »Stadt mit Bundesland, 10% Stromimport«, beispielhafte Darstellung einer Woche im Herbst

Bei der Betrachtung des Wochenverlaufs der Strombedarfsdeckung ist in den Diagrammen zusätzlich zur roten noch eine blaue Bedarfskurve dargestellt, die über der roten Kurve liegt. Die rote Kurve stellt den Strombedarf ohne Wärmepumpe, die blaue Kurve den Bedarf mit Wärmepumpen dar. Die grauen Felder innerhalb der Bedarfskurve kennzeichnen den Import, unterhalb der Bedarfskurve den Export (siehe Abbildung 200, Abbildung 201).

Im Frühjahr ist zur Mittagszeit die PV Leistung ca. doppelt so hoch wie der Bedarf (siehe Stunde 3060, Abbildung 200). Ein Teil des überschüssigen Stroms kann eingespeichert werden, jedoch wird auch bis zu 1500 MW exportiert, da die Speicherkapazitäten nicht ausreichen, um den gesamten

Überschussstrom einzuspeichern. Wind spielt in der betrachteten Woche nur eine untergeordnete Rolle. Auch die Heizkraftwerke decken nur in der Nacht einen Teil des Bedarfes, tagsüber können sie heruntergefahren werden, auch aufgrund des geringen Wärmebedarfs aus den Heizkraftwerken.

Die betrachtete Herbstwoche hat deutlich bessere Windbedingungen, so dass hier im zweiten Teil der Woche ein Großteil des Bedarfes mit Windstrom gedeckt werden kann. Zur Stunde 7740 ist der produzierte Überschuss so hoch, dass mit einer Leistung von fast 2000 MW Strom exportiert wird. Die Heizkraftwerke können zu dieser Zeit vollständig heruntergefahren werden. Ab Stunde 7730 bis zum Ende des betrachteten Zeitraumes ist kein Import von Strom mehr nötig, da genug Strom durch Windkraftanlagen und Heizkraftwerke produziert werden kann um den gesamten Bedarf zu decken.

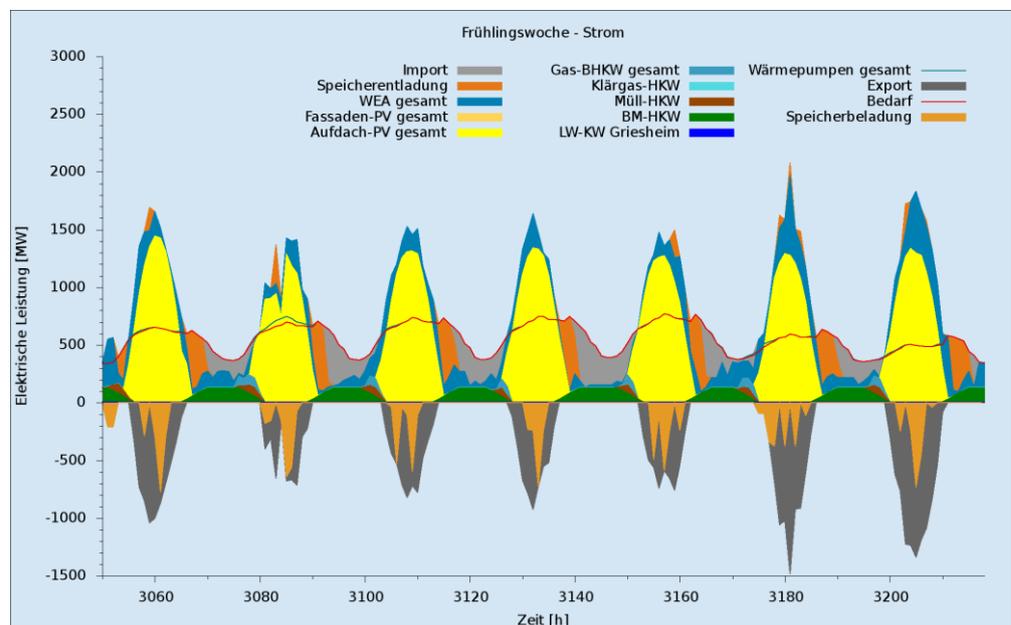


Abbildung 200: Strombedarfsdeckung Variante »Stadt mit Bundesland, 10% Stromimport«, beispielhafte Woche im Frühjahr

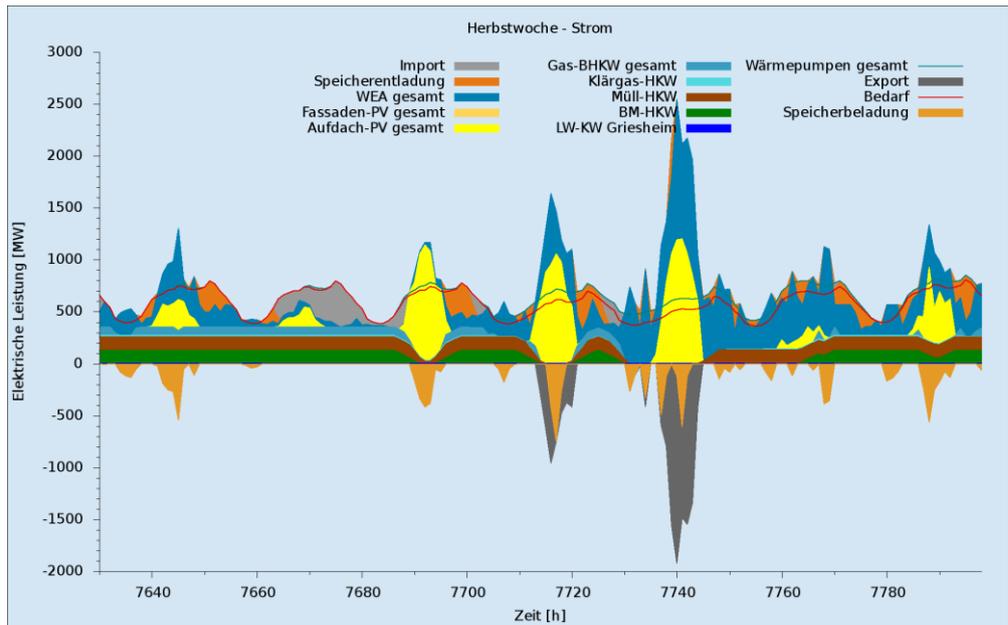


Abbildung 201: Strombedarfsdeckung Variante »Stadt mit Bundesland, 10% Stromimport«, beispielhafte Woche im Herbst

## 8.6.8 Kritische Würdigung der Optimierungsrechnungen

### 8.6.8.1 Mehrwert durch die zeitliche Auflösung gegenüber Jahresbilanzen

Gegenüber der häufig in Energiekonzepten vorgenommenen jahresbilanziellen Betrachtung des Energiesystems bieten die für diese Studie durchgeführten zeitlich aufgelösten Rechnungen eine deutlich größere Realitätsnähe, wie sich an den Aspekten Übereinstimmung von Angebot und Bedarf, Exportüberschuss, Ausschöpfung des PV-Potenzials und Speicherdimensionierung deutlich machen lässt.

Auf der Angebotsseite weisen insbesondere die erneuerbaren Energien Sonne und Wind kurzzeitige Schwankungen (Fluktuation) wie auch eine starke Varianz im Jahresverlauf auf. Gleiches gilt auf der Bedarfsseite für die Nachfrage nach Strom und – noch ausgeprägter – Wärme. Da die zeitlichen Angebots- und Bedarfsprofile nur bedingt übereinstimmen ist eine unterjährige zeitliche Auflösung der durchgeführten Rechnungen erforderlich. Dadurch werden Effekte berücksichtigt, die in jahresbilanziellen Betrachtungen vernachlässigt werden.

In den Rechenergebnissen äußert sich die zeitliche Abweichung zwischen Angebot und Bedarf in der Notwendigkeit, zu einem Zeitpunkt Strom zu exportieren und zu einem anderen Strom zu importieren. So wird in allen Szenarien Strom exportiert, obwohl der Strombedarf in Jahressumme nicht vollständig gedeckt werden kann. In einer jahresbilanziellen Rechnung gäbe es in diesem Fall keinen Export, sondern einen um die Exportmenge verringerten Import, wodurch der Selbstversorgungsgrad bei jahresbilanzieller Betrachtung prinzipiell zu hoch angesetzt wird.

Die Notwendigkeit, temporäre Überschüsse zu exportieren, sofern keine hinreichend großen Speicher vorhanden sind, beeinflusst außerdem die Wahl der installierten Anlagenleistung z.B. von PV, wie am Beispiel des Regionen-Szenarios gezeigt werden kann. Würden die in diesem Szenario vorhandenen PV-Potenziale voll ausgeschöpft, so ergäbe sich in der Jahresbilanz ein Stromertrag von 4756 GWh/a. Die zeitlich aufgelöste Optimierung ergibt demgegenüber, dass im Szenario »Stadt mit Region, Ohne Restriktion« lediglich 1481 GWh Stromertrag aus PV sinnvoll sind, also ca. 1/3 dessen was prinzipiell möglich wäre. Dies liegt daran, dass zusätzliche PV-Anlagen vor allem zu steigenden Exportüberschüssen führen würden, weil der Strom zum Zeitpunkt der Erzeugung nicht genutzt werden kann und auch keine Speicher installiert sind.

Aussagen zu Dimensionierung und Betrieb von Energiespeichern sind ebenfalls nur im Rahmen von zeitlich aufgelösten Rechnungen möglich, da Speicher der zeitlichen Entkopplung von Energieangebot und –bedarf dienen und die Länge eines Be- und Entladezyklus in der Regel deutlich unterhalb eines Jahres liegt.

Folglich kann nur durch Berechnungen mit unterjähriger zeitlicher Auflösung eine realistische Zusammensetzung von Energieerzeugern, eine korrekte Speicherdimensionierung, die erforderliche zu exportierende und importierende Strommenge und die entsprechenden Kosten ermittelt werden.

#### 8.6.8.2 **Einschränkung durch die fehlende räumliche Auflösung**

Aus Zeitgründen wurde ein Modellansatz gewählt, in dem das städtische Energiesystem in je einem Bilanzknoten für Strom und Wärme abgebildet ist. Diese Vorgehensweise stellt eine deutliche Vereinfachung dar, weil die reale Kopplung eines Wärmeerzeugers, z.B. eines Heizkessels oder eines Heizkraftwerks, an einen räumlich begrenzten Versorgungsbereich, z.B. ein Gebäude oder ein Fernwärmenetz, aufgehoben wird. Stattdessen wird der gesamte städtische Wärmebedarf zu einer einzigen Lastkurve zusammengefasst, zu deren Deckung jede Wärmeerzeugungsanlage beitragen kann. Prinzipiell könnte dadurch eine Anlage alleine rechnerisch den Bedarf decken, obwohl in der Realität mehrere Anlagen parallel in Teillast laufen müssten. Da jedoch in große und kleine Erzeuger unterschieden wird und die Restriktionen aufgrund einer begrenzten Ausdehnung der Nahwärmenetze als Randbedingungen vorgegeben sind, ist davon auszugehen, dass sich die Ungenauigkeiten aufgrund mangelnder räumlicher Auflösung in akzeptablen Grenzen halten. Gleichwohl sind bei Maßnahmen zur Wärmeversorgung und zu Wärmenetzen detailliertere, räumlich aufgelöste Betrachtungen anzustellen.

#### 8.6.8.3 **Weitere Einschränkungen**

Eine weitere Vereinfachung liegt in der Vernachlässigung von Temperaturniveaus bei der Wärmenutzung und -bereitstellung. So wird beispielsweise nicht zwischen Wärme für Raumheizung, Brauchwasserbereitstellung oder Prozesswärme unterschieden, die ein unterschiedliches Temperaturniveau aufweisen können. Eine genauere Betrachtung war im Rahmen dieser Studie allerdings schon deshalb nicht möglich, weil keine Angaben zu den im Prozesswärmebereich benötigten Temperaturniveaus vorhanden waren.

In vielen der Diagramme ist zu sehen, dass die Biomassekraftwerke sehr oft an- und abgefahren werden, um zum Beispiel sonnenschwache Zeiten auszu-

gleichen. In der Realität sind An- und Abfahrvorgänge aber mit Materialbelastung, höherem Brennstoffverbrauch und dadurch Kosten und Verlusten behaftet, weshalb häufiges An- und Abfahren von großen Kraftwerken weitgehend vermieden wird. Stattdessen wird eine konstante Fahrweise in der Nähe der Nennleistung angestrebt, die einen guten Wirkungsgrad und eine lange Lebensdauer ermöglicht. Im Gegensatz zu dieser anlagenbezogenen Sichtweise werden die Anlagen hier als Teil des Gesamtsystems gesehen und dessen Kosten minimiert. Dieses Gesamtkostenoptimum unterscheidet sich für die einzelnen Bestandteile häufig vom anlagenbezogenen Optimum. Da minimale Lauf- und Stillstandszeiten sowie An- und Abfahrkosten in den Rechnungen nicht enthalten sind, wird sich in der Realität eine leicht veränderte Betriebsweise der Anlagen einstellen.

#### 8.6.9 Zusammenfassung der Simulationsrechnung KomMod

Die Stadt Frankfurt am Main hat sich das ambitionierte Ziel gesetzt, ihren Energiebedarf in den Sektoren Strom, Wärme und lokaler Verkehr im Jahr 2050 vollständig mit erneuerbarer Energie aus dem Stadtgebiet und der Region FrankfurtRheinMain zu decken. Für die vorliegende Studie wurden Optimierungsrechnungen mit dem kommunalen Energiesystemmodell »KomMod« durchgeführt um zu ermitteln, unter welchen Bedingungen dies möglich ist.

»KomMod« berechnet die Energiesysteme, die für jede Stunde im Jahr den Bedarf an Strom und Wärme abdecken können und innerhalb dieser Möglichkeiten die kostengünstigste Variante. Somit werden nur Lösungen ermittelt, die eine Versorgungssicherheit über das ganze Jahr gewährleisten. Das ist wichtig, weil beispielsweise die Solarenergie nur tagsüber und hauptsächlich im Sommerhalbjahr zur Verfügung steht, privater Strombedarf jedoch vor allem in den Abendstunden und der größte Wärmebedarf im Winterhalbjahr besteht. Durch die Stundenauflösung kann auch die Speicherkapazität ermittelt werden, die für eine bestimmte Lösung erforderlich ist.

»KomMod« berücksichtigt bei der Optimierung des Gesamtenergiesystems alle gegenseitigen Abhängigkeiten der Sektoren Strom, Wärme und lokaler Verkehr, was notwendig ist, da aufgrund von Kraft-Wärme-Kopplung, Wärmepumpen und Elektromobilität die Sektoren zunehmend verknüpft sind. Unter den möglichen Lösungen für eine Variante von Randbedingungen wird stets die kostengünstigste Lösung identifiziert.

**Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass sich das Ziel einer vollständigen und sicheren Versorgung der Stadt Frankfurt am Main mit erneuerbaren Energien erreichen lässt,** wenn das Potenzial an erneuerbaren Energien aus der Stadt Frankfurt und zur Hälfte aus der Region Frankfur-

tRheinMain sowie in Bezug auf Windkraft und Biomasse auch teilweise aus dem Bundesland Hessen genutzt wird. Doch da auch in dieser Variante die Installation einer hohen Kapazität an elektrischen Speichern notwendig ist, **wird allerdings empfohlen, eine 95%-Selbstversorgung in Bezug auf den Gesamtenergiebedarf anzustreben, die einen guten Kompromiss zwischen weitgehender Selbstversorgung und akzeptablen Energiekosten darstellt.**

Wesentliche Erkenntnisse aus den Simulationsrechnungen sind:

- Die Vollversorgung der Stadt Frankfurt am Main mit erneuerbaren Energien ist im Jahr 2050 möglich unter der Voraussetzung, dass Wind- und Biomassepotenziale des Bundeslandes Hessen teilweise genutzt werden. Es wird dabei der Anteil des Potenziale des Bundeslandes für Frankfurt angesetzt, das dem Anteil der Einwohnerzahl Frankfurts an der des Bundeslandes entspricht.
- Dieses Szenario wird jedoch nicht zur Umsetzung empfohlen, da eine Speicherkapazität von 9.160 MWh nötig ist um die Vollversorgung zu erreichen. Hierdurch ergeben sich hohe Stromgestehungskosten von 22 €/ct/kWh.
- Zur Umsetzung empfohlen wird ein Szenario, welches ebenfalls die anteiligen Potenziale des Bundeslandes nutzt, aber eine Eigenerzeugung (inklusive der genutzten Potenziale in der Region und in Hessen) von 90% am Strombedarf und 95% am Gesamtenergiebedarf aufweist.
- Durch das Erlauben von 10% Stromimport betragen die installierte elektrische Speicherkapazität 2.036 MWh und die Stromgestehungskosten auf 12 €/ct/kWh.
- Werden bei der anteiligen Nutzung der Potenziale des Bundeslandes keine Speicher vorgesehen, kann ein Stromeigenerzeugungsanteil von 75% erreicht werden. Ohne den Zubau von elektrischen Speichern ergeben sich Stromgestehungskosten von 8,7 €/ct/kWh.
- Werden nur die Potenziale der Stadt und zu 50% des Regionalverbandes genutzt, kann ein Stromeigenerzeugungsanteil von 53% erreicht werden.
- Vor allem bei den Windpotenzialen ist eine Nutzung der anteiligen Potenziale des Bundeslandes sehr hilfreich, da diese bei Nutzung von 50% des Regionalverbandes nur 151 MW installierte Leistung betragen, bei Nutzung von 11,6% des hessischen Potenzials jedoch 1.624 MW.
- Im Bereich der Biomasse ist das Potenzial im Regionalverband bereits vergleichsweise hoch, einzig beim Energieholz kann das Potenzial durch die Nutzung der anteiligen hessischen Potenziale verdoppelt werden.
- Durch die Installation von elektrischen Speichern kann auch im Szenario »Stadt und Region« der Stromeigenerzeugungsanteil gesteigert

werden. Aufgrund der geringen Windpotenziale muss die PV jedoch beispielsweise bei einem 80%igen Deckungsgrad den Strombedarf zu 58% decken. Dies bedeutet, dass dieses Szenario für die Praxis nicht relevant ist, sondern nur die theoretischen Möglichkeiten aufzeigt.

- Mit den eigenen erneuerbaren Energien-Potenzialen in der Stadt kann diese ca. 30% des Strombedarfs und ca. 31% des Wärmebedarfs decken.
- Das Ziel der CO<sub>2</sub>-Neutralität bedeutet nicht, dass das Energiesystem der Stadt vom Strom- und Gasversorgungsnetz abgekoppelt wird, sondern dass zuerst die Potenziale in der Stadt genutzt werden und nur die Lücken durch den Austausch von Strom und Gas gedeckt werden. Die Berechnungsergebnisse zeigen auf der einen Seite, dass und wie eine Autarkie möglich ist und wie hoch die Selbstversorgung bei möglichem Import und Export von Strom sein würde. Da sich nicht vorhersagen lässt, wie sich die deutschen Versorgungsstrukturen im Rahmen der Energiewende weiter entwickeln werden und welche Bedingungen langfristig für den Stromimport gelten (Leistungsbeschränkungen, Kosten, Marktmechanismen,...), kann heute nicht festgestellt werden, welche Randbedingungen sich genau einstellen und damit welches Energiesystem optimal sein wird. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass eine Lösung zwischen Autarkie und maximaler Nutzung eigener Ressourcen bei erlaubtem Import und Export von Strom bei Realisierung eines nachhaltigen Energiesystems einstellen wird. Deshalb wurde die Variante einer 95%-igen Selbstversorgung als Zielenergieszenario empfohlen.

Voraussetzung für die berechneten Lösungen ist ein deutlich geringerer Energiebedarf durch Energieeinsparung und Effizienzsteigerung gegenüber der heutigen Situation. Hierbei wurde auf die Annahmen des Generalkonzeptes zurückgegriffen, die dort nachzulesen sind.

## 9 Zusammenfassung der Ergebnisse

In den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr ist es möglich, rund 50 Prozent der Endenergie bis 2050 einzusparen. Ob dies tatsächlich erreicht wird, ist von einer Vielzahl von Maßnahmen und Einflüssen abhängig. Neben dem politischen Willen ist es die Akzeptanz bei den Bürgern und den in Frankfurt am Main ansässigen Unternehmen, die die Umsetzung und somit den Erfolg maßgeblich beeinflussen. In Abbildung 202 werden die Einsparpotenziale (berücksichtigt den Anstieg von Strom im Wärme- und Verkehrssektor) für die einzelnen Sektoren zusammenfassend dargestellt.

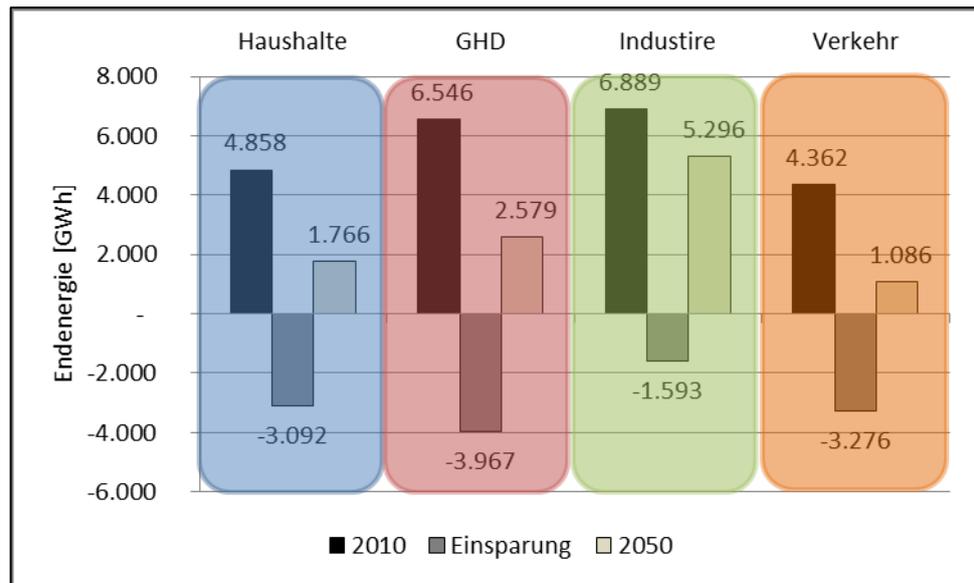


Abbildung 202: Einsparpotenziale nach Sektoren, eigene Berechnung nach Maßnahmenzenario, IBP.

Wenn Frankfurt am Main allein die eigenen Potenziale nutzt, ist es nicht möglich, die benötigte Energie auf Basis von erneuerbaren Energien bereitzustellen. Werden Potenziale aus den Kommunen des Regionalverbandes einbezogen, so kann der Anteil an erneuerbaren Energien maximiert werden. Ohne den Einsatz elektrischer Speicher liegt der Stromeigenerzeugungsanteil bei rund 53 Prozent. Dieser Anteil kann durch Speicher auf rund 90 Prozent erhöht werden, wodurch jedoch die Stromgestehungskosten überproportional ansteigen würden (auf 20 €/ct/kWh).

Aus diesen Gründen werden die Bilanzgrenzen auf das Bundesland Hessen erweitert. Durch das erhöhte Angebot an Windstrom und Biomasse aus Hessen kann ein Stromeigenerzeugungsanteil von rund 90 Prozent (berücksichtigt einen Zubau von Speichern) zu Stromgestehungskosten von rund 12 €/ct/kWh gewährleistet werden. Somit müssen lediglich knapp 10 Prozent der Elektrizität über das vorgelagerte Verbundnetz bezogen werden. Eine vollständige Versorgung aus dem Bundesland, die theoretisch/technisch möglich wäre, ist unter ökonomischen Gesichtspunkten nicht zu empfehlen (Abbildung 193).

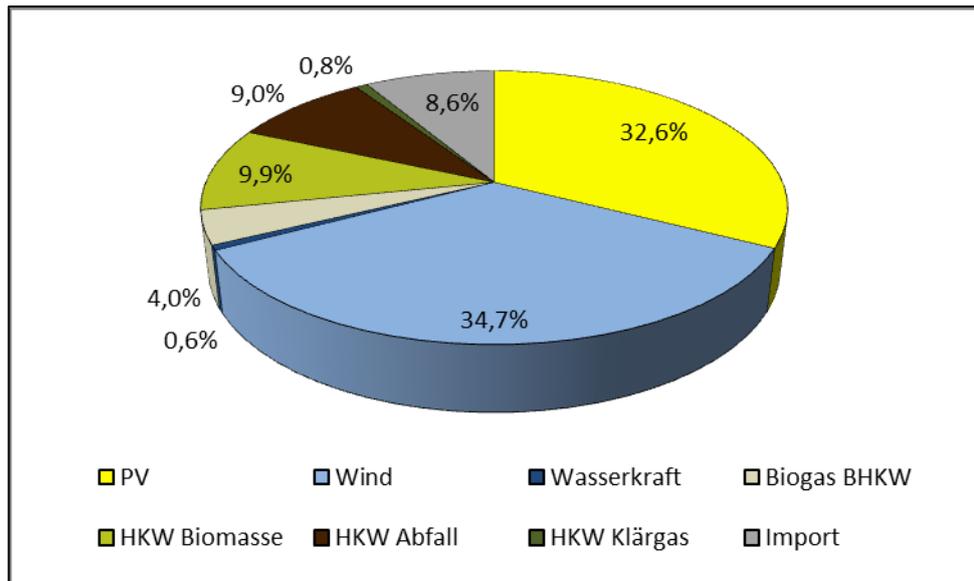


Abbildung 203: Stromerzeugungsstruktur im Jahr 2050, eigene Darstellung auf Basis Szenario A „Stadt mit Bundesland“ aus Kommod des Fraunhofer ISE.

Im Wärmesektor erhöht sich durch den Einbezug des hessischen Potenzials die zur Verfügung stehende Biomasse. Die Struktur der Wärmeversorgung im Jahr 2050 wird in Abbildung 204 dargestellt.

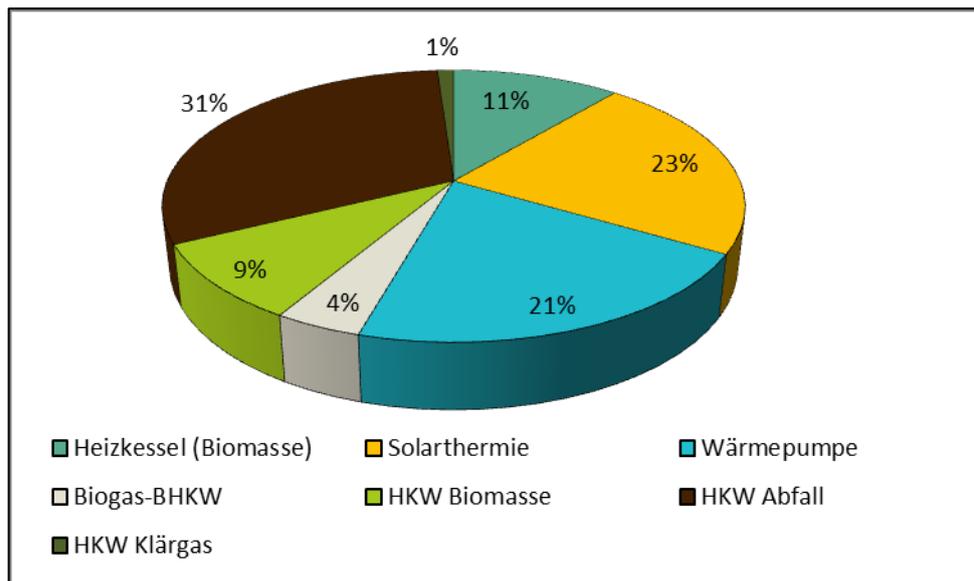


Abbildung 204: Wärmeversorgungsstruktur im Jahr 2050, eigene Darstellung auf Basis Szenario A „Stadt mit Bundesland“ aus Kommod des Fraunhofer ISE.

Auch wenn es theoretisch möglich wäre, dass sich Frankfurt am Main mithilfe der hessischen Potenziale vollständig autark mit erneuerbaren Energien versorgt, wurde aus ökonomischen Gesichtspunkten bewusst ein Szenario mit Stromimport gewählt. Das ausgewählte Szenario stellt eine kostenoptimale Lösung bei einer höchstmöglichen Eigenversorgung dar.

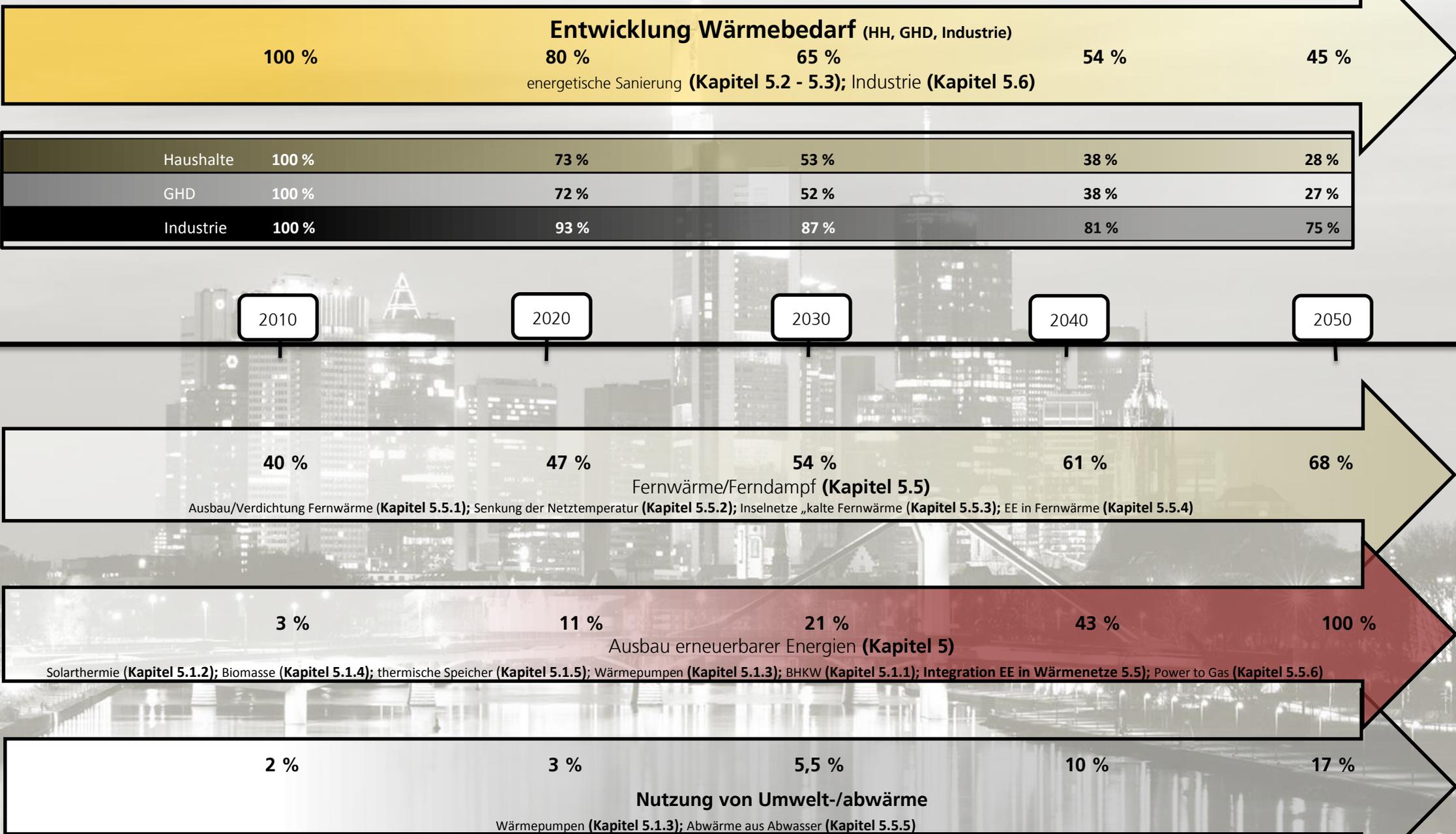
Um das Szenario umzusetzen, kommt es auf den Mut der handelnden Akteure an, die vor der Aufgabe stehen, historisch bedeutsame Entscheidungen zu treffen. Wichtig ist auch die Akzeptanz des Projekts bei Bürgern und Unternehmen; die am Gestaltungsprozess partizipieren sollten. Zahlreiche weitere Faktoren spielen für das Gelingen eine Rolle. Doch der „Masterplan 100% Klimaschutz“ zeigt, dass Frankfurt seine ambitionierten Ziele erreichen und eine visionäre und vorbildhafte Stadtentwicklung umsetzen kann.

## 1 0 Anhang

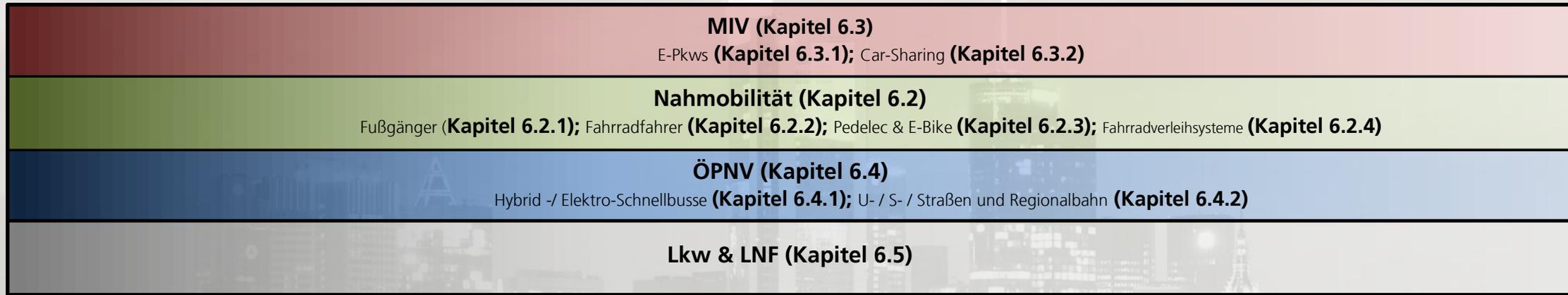
### 10.1 Anhang A: Roadmaps

Die hier dargestellten Roadmaps für die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr stellen mögliche Entwicklungspfade dar bzw. sind als Orientierungshilfen gedacht. Ein Abweichen von diesen ist aufgrund von technologischen Entwicklungen wie auch politischen Änderungen der Rahmenbedingungen durchaus möglich. Die Roadmaps sollen in erster Linie als Übersicht hinsichtlich der Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Maßnahmenszenario sowie dem Ausbau der erneuerbaren Energien im Szenario A Stadt mit Freiflächen des Fraunhofer ISE dienen.





<b>Endenergie</b> (Basis 2010)	100 %	94 %	63 %	45 %	25 %
<b>MIV</b> (Basis 2010)	100 %	93 %	53 %	34 %	14 %
<b>ÖPNV</b> (Basis 2010)	100 %	96 %	86 %	75 %	68 %
<b>Lkw/LNF</b> (Basis 2010)	100 %	97 %	82 %	63 %	40 %



**Meilensteine**

**Meilensteine auf nationaler Ebene**

Erstes elektrisches Lastenfahrrad in Deutschland (2007)

Pilot-Projekt 18 Tonnen Elektro-Lkw (2013)

BEP Elektromobilität (2020)

Marktreife: Autonomer Pkw (2030)

2010

2020

2030

2040

2050

1,6 Millionen verkaufte Pedelec in der BRD (2013)

UPS: Einsatz von E-LNF

ABG Nova Ladeinfrastruktur Stromtanks am Parkscheinautomaten (2011)

Einführung des Mietertickets in Frankfurt

Anteil E-Pkw > Diesel/Benzin-Pkw

Halbierung des Pkw-Bestands in FFM

Bike + buisness (2003)

Pilotprojekt: Induktives Laden von E-Pkw am Frankfurter Flughafen (2011)

Eröffnung des ersten Bike Towers

Fahrerassistenz in 50 % der Bahnen

70 Prozent der Arbeitnehmer in FFM besitzen ein Jobticket oder Mieterticket

über 12.000 Carsharing Pkw in FFM

Einweihung Schnellradweg DA- FFM (ca. 2016)

100 % der Fahrzeugflotte der Stadt Frankfurt, sowie 50 % der Busse im ÖPNV werden elektrisch betrieben

**Meilensteine auf städtischer Ebene**

10.2 Anhang B: Maßnahmenkatalog

Nr.	Ziel	Maßnahme	Kurzbeschreibung	Abschnitt Masterplan	Energie-sektor	Fokus	Mögliche durchführender Akteure	Einspa-rung im Energie-sektor	Zeit-horiz-ont	Investiti-ons-kosten
[1]	<b>Energieein-sparung</b>	<b>Grafische Auf-bereitung und TOP10-Effizienzlisten für Energie-kostenabrech-nungen</b>	Die Energiekostenabrech-nung wird transparenter und verständlicher. Beigefügte Effizienzlisten helfen strom-sparende Geräte zu finden. Service durch die Energiever-sorger. Grafische Aufberei-tung hilft Stromverbräuche zu vergleichen.	<b>Kapitel 4.2.1</b>	<b>Strom</b>	<b>Haushalte</b>	Energieversorger	gering	mittelfristig	mittel
[2]	<b>Verbreitung der Ziele des Master-plans</b>	<b>Erweiterung der Neubür-gerberatung in Frankfurt</b>	Informationspakt zu den bestehenden Energiebera-tungsmöglichkeiten in Rich-tung Energieeffizienz. Infor-mationen speziell zu den Energie-, Klima- und Um-weltschutzzielen, den lau-fenden Energieprojekten in Frankfurt und den Möglich-keiten, sich selbst einzubrin-gen.	<b>Kapitel 4.2.1</b>	<b>Strom</b>	<b>Haushalte</b>	Energierreferat	gering	langfristig	gering

[3]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Wettbewerb: „1.000 X 1.000 kWh Stromsparkampagne“</b>	Bei der „1.000 X 1.000 kWh“ Stromsparkampagne gilt es rund 1.000 Haushalte davon zu überzeugen, dass eine Stromeinsparung von rund 1.000 kWh pro Haushalt durchaus möglich ist. Die Kampagne richtet sich besonders an alle zwei bis vier Personen Haushalte. Ziel sind 1000 mitmachende Haushalte.	<b>Kapitel 4.2.1</b>	<b>Strom</b>	<b>Haushalte</b>	Energierreferat	hoch	mittelfristig	gering
[4]	<b>Verbreitung der Ziele des Masterplans</b>	<b>Informationskampagne „100 % Klimaschutz Frankfurt“ an öffentlichen Gebäuden</b>	Sensibilisierung der Einwohner mit dem Thema Energie und insbesondere dem Masterplan. Wechselnde Plakate zeigen die Maßnahmen die das Stadtbild von Frankfurt bis 2050 verändern.	<b>Kapitel 4.2.1</b>	<b>Endenergie</b>	<b>Haushalte/GHD</b>	Energierreferat	-	kurzfristig	gering
[5]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Beratung für sozial schwächer gestellte Haushalte</b>	Aktivierung einkommensschwacher Bevölkerungsschichten.	<b>Kapitel 4.2.1</b>	<b>Endenergie</b>	<b>Haushalte</b>	Caritas	gering	kurzfristig	gering
[6]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Ausbildung von Energieeinspar-Detektiven</b>	Benennung von sogenannten Energieeinspar-Detektiven und Sensitivitätsbildung für Energiethemen an Schulen.	<b>Kapitel 4.2.1</b>	<b>Endenergie</b>	<b>Haushalte</b>	Energierreferat	gering	kurzfristig	gering
[7]	<b>EE-Anteil erhöhen</b>	<b>Förderung von Demand-Side Management Ansätzen</b>	Erhöhung des eigenerzeugten Stroms der PV-Anlage durch Smart-Meter oder Home-Manager. Insgesamt steigt der erneuerbare Energieanteil in der Stadt und reduziert Netzengpässe und Speicherbedarf.	<b>Kapitel 4.2.2</b>	<b>Erneuerbare Energien</b>	<b>Haushalte/GHD</b>	Energieversorger/ Forschung/ Wohnungswirtschaft	hoch	langfristig	mittel

[8]	<b>EE-Anteil erhöhen</b>	<b>Einsatz von Speichersystemen</b>	Erhöhung des erneuerbaren Energieanteils durch elektrische Speicher. Anstieg der Eigenstromquote auf ca. 60 bis 70 Prozent möglich. Reduzierung von Netzengpässen.	<b>Kapitel 4.2.2</b>	<b>Erneuerbare Energien</b>	<b>Haushalte/GHD</b>	Energieversorger/ Forschung/ Wohnungswirtschaft	hoch	langfristig	hoch
[9]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Einsatz von hoch effizienten Leuchtmitteln und Tageslichtnutzung</b>	Der Anteil für Beleuchtungszwecke GHD-Sektor beträgt rund 38 Prozent. Durch effizientere Beleuchtungstechniken und -systeme sind weitere Einsparungen möglich.	<b>Kapitel 4.3.1</b>	<b>Strom</b>	<b>GHD</b>	Stadt/Gewerbe selbst	hoch	mittelfristig	mittel
[10]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Einsatz von effizienten Motoren und Pumpen</b>	Förderung zum Austausch älteren Motoren für Pumpen und Ventilatoren sind einfach umzusetzen. Richtige Dimensionierung der Leistungsgröße und die bedarfsabhängige Steuerung des Motors können den Stromverbrauch weiter reduziert werden.	<b>Kapitel 4.3.1</b>	<b>Strom</b>	<b>GHD</b>	Stadt/Gewerbe selbst	hoch	mittelfristig	mittel
[11]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Einsatz von Energiemanagementsystemen im GHD und Industrie Sektor</b>	Mit Hilfe von Energiemanagementsystemen können Energieflüsse bzw. Energiekosten visualisiert, analysiert, gesteuert und somit Energieeffizienzmaßnahmen eingeleitet werden. Der Fokus bei kleineren und mittleren Unternehmen.	<b>Kapitel 4.3.1</b>	<b>Strom</b>	<b>GHD</b>	Stadt/Gewerbe selbst	mittel	kurzfristig	mittel

[12]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Effizienzmaßnahmen zur Reduzierung des Raumkältebedarfs</b>	In Zukunft wird der Strombedarf für Klimakälte insbesondere im Bürobereich weiter ansteigen. Durch thermische Isolierung durch Dachbegrünung, energiesparende Geräte reduzieren interne Wärmequellen und eine freie Nachtlüftung (passive Kühlung) kann der Strombedarf einer zusätzlichen Klimaanlage stark reduziert werden oder ganz auf eine mechanische Kühlung verzichtet werden. Demonstrationsobjekte helfen zur Verbreitung.	<b>Kapitel 4.3.1</b>	<b>Strom</b>	<b>GHD</b>	Stadt/Gewerbe selbst	mittel	kurzfristig	mittel
[13]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Der Austausch veralteter IT-Geräte, Nutzung von Standby-Knöpfen und Thin-Client Lösungen</b>	Der Austausch veralteter Geräte sowie der Einsatz von intelligenten Standby-Knöpfen, welche bei Betätigung direkt den Computer und seine Peripherie auf Standby schaltet. Thin-Client Lösungen bzw. Terminalarbeitsplätze oder der Austausch von Desktop-Rechnern durch Laptops können den Stromverbrauch deutlich zu senken.	<b>Kapitel 4.3.1</b>	<b>Strom</b>	<b>GHD</b>	Gewerbe selbst	mittel	kurzfristig	gering
[14]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Effiziente Rechenzentren</b>	Zur Reduzierung des stark ansteigenden Strombedarfs für Rechenzentren sind unterschiedliche Maßnahmen zu betrachten. Von der IT-Hardware, über die eine effiziente Kühlung, der effizienten USV bis zum Gebäude	<b>Kapitel 4.3.2</b>	<b>Strom</b>	<b>GHD</b>	Stadt/Gewerbe selbst	hoch	mittelfristig	hoch

			de sind Maßnahmen zu ergreifen.							
[15]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Intelligente Wärmenutzung aus Rechenzentren</b>	Die Gesamteffizienz eines Rechenzentrums wird durch die Nutzung der sonst ungenutzten Abwärme angehoben. Hierbei kann die Nutzung innerhalb des Rechenzentrums wie auch eine objektübergreifende Nutzung zielführend sein.	<b>Kapitel 4.3.2</b>	<b>Strom</b>	<b>GHD</b>	Gewerbe/Forschung/Wohnungswirtschaft/Energieversorger	mittel	langfristig	hoch
[16]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Prüfung der Energieverbräuche von IT in Frankfurter Schulen</b>	Als erste Maßnahme gilt es die Stromverbräuche der IT-Infrastruktur der öffentlichen Gebäude zu erfassen. Durch ein darauf aufbauenden Kenngrößenvergleich („Power Usage Effectiveness“ (PU-E), „Carbon Usage Effectiveness“ (CUE), „Data Center Infrastructure Efficiency“ (DCIE) können Schwachstellen in der IT-Infrastruktur erkannt werden.	<b>Kapitel 4.3.2</b>	<b>Strom</b>	<b>Stadt</b>	Stadt	mittel	kurzfristig	gering
[17]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Zentralisierung der IT-Infrastruktur öffentlicher Gebäude</b>	Durch die Zentralisierung der IT-Infrastruktur der öffentlichen Gebäude können durch Synergieeffekte (bessere Auslastung etc.) weitere Betriebskosten eingespart werden.	<b>Kapitel 4.3.2</b>	<b>Strom</b>	<b>Stadt</b>	Stadt	mittel	kurzfristig	mittel

[18]	<b>EE-Anteil erhöhen</b>	<b>Eigenstromlösungen im GHD Sektor</b>	Anderes wie bei den Haushalten liegen die Lastspitzen des GHD Betriebes deckungsgleich mit den Einstrahlungsspitzen. Somit könnte bei büroähnlichen Gebäuden der PV-Eigenstromanteil mit relativ einfachen Maßnahmen deutlich erhöht werden.	<b>Kapitel 4.3.3</b>	<b>Strom</b>	<b>GHD</b>	Gewerbe/Forschung/Wohnungswirtschaft/Energieversorger	mittel	mittelfristig	mittel
[19]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Effizienzmaßnahmen Straßenbeleuchtung</b>	Umstellung ineffizienter Leuchten auf moderne LED Beleuchtung.	<b>Kapitel 4.3.4</b>	<b>Strom</b>	<b>Stadt</b>	Stadt/Energieversorger	mittel	kurzfristig	mittel
[20]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Förderung eines Nullemissions-Gewerbeparks</b>	Die Gestaltung neuer Gewerbeparks und Gebäude als Nullemissions-Neubauten sind zu gestalten.	<b>Kapitel 4.3.4</b>	<b>Endenergie</b>	<b>GHD</b>	Stadt/Gewerbe/Dritte	hoch	mittelfristig	mittel
[21]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Gewerbepark-Energie-Manager &amp; Wissensdatenbank</b>	Beratungsprogramm bei Immobilienerwerb oder Coaching durch Energieexperten. Umfassende Betrachtung der drei Sektoren Strom, Wärme und Mobilität um sämtliche Aspekte des Gewerbeparks zu berücksichtigen.	<b>Kapitel 4.3.4</b>	<b>Endenergie</b>	<b>GHD</b>	Energierferat/Energieversorger/Dritter/Stadt	mittel	langfristig	mittel
[22]	<b>EE-Anteil erhöhen</b>	<b>Förderung von solarüberdachten Ladestationen im Einzelhandel</b>	Als Fördermaßnahme gilt es Handelsgeschäfte und deren Parkplätze mit solarüberdachten Ladestationen auszustatten. Neben einem E-Fahrzeug sollte die Ladestation und deren Überdachung Platz für 1-2 Pedelecs und einem Lastenfahrzeug haben.	<b>Kapitel 4.3.4</b>	<b>Strom</b>	<b>GHD</b>	Energierferat/Energieversorger/Dritter/Stadt	mittel	langfristig	hoch

[23]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Förderung: Projekt Analyse der Energieverbräuche durch Smart Metering als neues Geschäftsfeld</b>	Demonstrationsprojekt an dem diversen Unternehmen und der lokale Energieversorger beteiligt sind, anschließen.	<b>Kapitel 4.3.4</b>	<b>Endenergie</b>	<b>GHD</b>	Gewerbe/Forschung/Wohnungswirtschaft/Energieversorger	mittel	mittelfristig	hoch
[24]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Aktivierung von GHD-Vertretern</b>	Um die Aktivität hinsichtlich der Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen in dem Sektor GHD zu erhöhen, bedarf es einer gezieltere Ansprache der Akteure.	<b>Kapitel 4.3.4</b>	<b>Endenergie</b>	<b>GHD</b>	Energierferat/Energieversorger/Dritter/Stadt	mittel	mittelfristig	gering
[25]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Abwrackprämie für ineffiziente Motoren in der Industrie</b>	Als Maßnahme sollten nicht nur in neuen Betrieben hocheffiziente Motoren der neusten Effizienzklasse eingesetzt werden, sondern auch bestehende Betriebe zum Einsatz von effizienteren Motoren bewegt werden. Dabei kann eine Informationskampagne zu Stromverbräuchen von Motoren helfen. Weiter wird als Maßnahme vorgeschlagen eine Abwrackprämie für ineffiziente Motoren in Frankfurt einzuführen.	<b>Kapitel 4.4.1</b>	<b>Strom</b>	<b>Industrie</b>	Energierferat/Dritte/Stadt	hoch	langfristig	mittel
[26]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Netzwerke Energieeffizienz Industrie in Frankfurt etablieren</b>	Hierbei gilt es in den Austausch zu intensivieren und Best Practice Projekte aus Frankfurt und von außerhalb vorzustellen, um die Unternehmen zu motivieren den eigenen Energieverbrauch zu analysieren und Maßnahmen	<b>Kapitel 4.4.1</b>	<b>Strom</b>	<b>Industrie</b>	Energierferat/Dritte/Stadt	hoch	langfristig	mittel

			zur Reduzierung umzusetzen.							
[27]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Förderung des BHKW-Ausbaus</b>	Weiterführung des schon 1990 beschlossenen Ausbaus „Blockheizkraftwerke für Frankfurt“.	<b>Kapitel 5.1.1</b>	<b>Wärme</b>	<b>Stadt</b>	Energierferat/ Energieversorger/ Dritte/ Stadt	hoch	langfristig	hoch
[28]	<b>EE-Anteil erhöhen</b>	<b>Ausbau der Förderprogramme für Solarthermie</b>	Neben der Solarpotentialanalyse sollte ein breit aufgestelltes Förderprogramm sich auf die Kostenreduktion und einen angepassten Zubau konzentrieren.	<b>Kapitel 5.1.2</b>	<b>Wärme</b>	<b>Stadt</b>	Energierferat/ Energieversorger/ Dritte/Stadt	hoch	langfristig	hoch
[29]	<b>EE-Anteil erhöhen</b>	<b>Förderung zum Einsatz von Wärmepumpen im Neubau und Bestand</b>	Schaffung von Anreizen zum vermehrten Einsatz von Wärmepumpen im Gebäudebestand und im Neubau. Auch der Einsatz von Hybridheizungen ist sinnvoll.	<b>Kapitel 5.1.3</b>	<b>Wärme</b>	<b>Stadt</b>	Energierferat/ Energieversorger/ Dritte/ Stadt	hoch	langfristig	hoch
[30]	<b>EE-Anteil erhöhen</b>	<b>Förderprojekt: Wärmepumpen im Lastmanagement/Erhöhung des Eigenverbrauchs</b>	Wärmepumpen lassen sich als schalt- und steuerbare dezentrale Verbraucher in ein intelligentes Stromnetz einbinden. Dadurch kann der erneuerbare Energieanteil weiter erhöht werden und Gebäude und Warmwasserspeicher als thermischer Speicher genutzt werden.	<b>Kapitel 5.1.3</b>	<b>Wärme</b>	<b>Stadt</b>	Forschung/ Wohnungswirtschaft/ Energieversorger/ Dritte	mittel	mittelfristig	mittel
[31]	<b>EE-Anteil erhöhen</b>	<b>Fördermittel / vergünstigte Tarife für WP mit hohem COP</b>	Informationskampagnen auf Förderangebote der BAFA für Wärmepumpen aufmerksam machen. Eine andere Möglichkeit bestünde in einem weiterentwickelten differenzierten Wärmepum-	<b>Kapitel 5.1.3</b>	<b>Wärme</b>	<b>Haushalte</b>	Stadt/Energieversorger	hoch	langfristig	mittel

			pentarif der Energieversorger, dessen Höhe sich an der Wärmepumpenquelle (Luft/Wasser, Wasser/Wasser, Sol-e/Wasser) und somit am COP der WP orientiert.							
[32]	<b>EE-Anteil erhöhen</b>	<b>Priorisierung des Biomasseeinsatzes</b>	Bioenergie ist zwar ein regenerativer Energieträger dennoch begrenzt verfügbar. Deshalb sollte mittel- bis langfristig eine Priorisierung hinsichtlich des Einsatzes vorgenommen werden. Neben der Nutzung im Industriebereich ist der Einsatz von Biomasse in der Fernwärme in schwer substituierbar. Biomasse sollte möglichst dort eingesetzt werden, wo die Netztemperaturen nicht weiter reduziert werden können.	<b>Kapitel 5.1.4</b>	<b>Wärme</b>	<b>Stadt</b>	Stadt/Energieversorger	hoch	langfristig	mittel
[33]	<b>EE-Anteil erhöhen</b>	<b>Förderung zum Einsatz von thermischen Speichern</b>	Zur Erhöhung des regenerativen Wärmeanteils ist der Ausbau von thermischen Speichern notwendig. Mit dem Ausbau großer saisonaler Wärmespeicher kann der solare Deckungsgrad in Straßenzügen und Quartieren von solarthermischen Großanlagen auf über 50 Prozent angehoben werden. Es gilt durch weitere Demonstrationsprojekte Kosten thermischer zu reduzieren und besonders für Städte	<b>Kapitel 5.1.5</b>	<b>Wärme</b>	<b>Stadt</b>	Forschung/Stadt/Wohnungswirtschaft/Energieversorger/Dritte	mittel	langfristig	hoch

			effiziente Lösungen größerer thermischer Speicher zu finden.							
[34]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Mindestens Passivhausstandard bei Neubauten</b>	Fortführung des Passivhausstandards bei sämtlichen städtischen Neubauten und ab 2020 für alle anderen Neubauten. Die Stadt sollte sich weiterhin als Vorreiter bei den städtischen Neubauten positionieren.	<b>Kapitel 5.2</b>	<b>Wärme</b>	<b>Stadt</b>	Stadt/ Wohnungswirtschaft/ Bauunternehmen /Dritte	hoch	mittelfristig	gering
[35]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Begehbare Sanierungsprojekte</b>	Durch kostenlose begehbare Modelle für Bewohner können den potentiellen Bauherren bestehende Bedenken genommen werden. Denkbar wäre die Errichtung von zwei Passivhäusern seitens der Stadt, in denen Familien wochenweise das Leben in einem Passivhaus testen können.	<b>Kapitel 5.2</b>	<b>Wärme</b>	<b>Stadt</b>	Stadt/ Wohnungswirtschaft/ Bauunternehmen/ Dritte	mittel	kurzfristig	gering
[36]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Qualitätssicherung im Handwerk</b>	Analog zu der Qualitätssicherung bei energetischen Sanierungen zertifiziert die Handwerkskammer Firmen, die Erfahrung und Qualität beim Bau von Passivhäusern nachweisen können. Diese werden Passivhaus-Interessierten durch den Energiepunkt des Energiere-	<b>Kapitel 5.2</b>	<b>Wärme</b>	<b>Stadt</b>	Energiererat/ Energiepunkt/ Handwerk	mittel	kurzfristig	gering

			ferats weiter empfohlen.							
[37]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Förderung der energetischen Sanierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden</b>	Konsequente Umsetzung der energetischen Sanierung.	<b>Kapitel 5.3</b>	<b>Wärme</b>	<b>Stadt</b>	Energierreferat/ Stadt/ Wohnungswirtschaft	hoch	langfristig	hoch
[38]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Ökologischer Mietspiegel</b>	Durch die Einführung eines ökologischen Mietspiegels kann der Anstieg der Kaltmieten bei Neuvermietungen kontrolliert werden. Durch die ökologische Komponente „wärmetechnische Beschaffenheit des Gebäudes“ in der Kaltmiete können Vermieter mit energetisch modernisierten Gebäuden eine höhere Vergleichsmiete, als Vermieter mit schlecht sanierten Gebäuden einfordern. Bedeutend ist die Kontrolle der wirklich eindeutigen Mehrkosten der energetischen Sanierung.	<b>Kapitel 5.3</b>	<b>Wärme</b>	<b>Stadt</b>	Energierreferat/ Stadt/ Wohnungswirtschaft	gering	mittelfristig	gering
[39]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Modernisierungsarbeiten im Sozialbau</b>	Eine nachhaltige Sanierung der Sozialbauten in Frankfurt führt langfristig zu finanziellen Einsparungen bei der Stadt. Durch die Senkung des Heizenergiebedarfs verringern sich die von der	<b>Kapitel 5.3</b>	<b>Wärme</b>	<b>Stadt</b>	Energierreferat/ Stadt/ Wohnungswirtschaft	hoch	langfristig	hoch

			Stadt Frankfurt am Main bezahlten Sozialzuschüsse. Zudem verdeutlicht die Stadt ihre Vorreiterrolle.							
[40]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Modernisierungsvereinbarung im Mietvertrag</b>	Der Abschluss einer sogenannten Modernisierungsvereinbarung im Mietvertrag verschafft beiden Seiten eine Rechtsicherheit. Damit können Bedenken hinsichtlich des Ablaufs und der Folgen von Sanierungsmaßnahmen im Vorfeld geklärt werden.	<b>Kapitel 5.3</b>	<b>Wärme</b>	<b>Stadt</b>	Energierreferat/ Stadt/ Wohnungswirtschaft	mittel	mittelfristig	mittel
[41]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Grundsteuererleichterungen</b>	Eine weitere Möglichkeit Anreize für energetische Sanierungen durch Eigentümern in Miet- und Nichtmietgebäuden zu setzen, ist eine verminderte Belastung durch die Grundsteuer. Die Reduzierung der Grundsteuer im Falle einer energetischen Modernisierung könnte neben Fördermitteln einen weiteren Anreiz zur energetischen Sanierung bei Hauseigentümern setzen.	<b>Kapitel 5.3</b>	<b>Wärme</b>	<b>Stadt</b>	Energierreferat/ Stadt/ Wohnungswirtschaft	mittel	langfristig	mittel
[42]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Integrierte Quartiersentwicklung (Quartiersmanagement)</b>	Durch ein funktionierendes Quartiersmanagement steigt die Lebensqualität im Quartier. Neben einem energetisch hohen Standard der Gebäude tragen vor allem auf den ersten Augenblick sichtbare Dinge (Sauberkeit, ÖPNV-Anbindung, Spielmög-	<b>Kapitel 5.3</b>	<b>Wärme</b>	<b>Stadt</b>	Stadtplanungsamt/ Mobilitätsreferat/ Wohnungswirtschaft/ Energieversorger/ Dritte	hoch	langfristig	gering

			lichkeiten für Kinder, Verkehrssicherheit etc.) zu einer Gesamtaufwertung des Quartiers bei.							
[43]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Abbau des Sanierungsstaus in von Generation 65+ bewohnten Gebäuden</b>	Durch das Umsteigen auf kleinere altersgerechte Wohnungen in unmittelbarer Umgebung mit guter ÖPNV Anbindung. Als Vermittler passender Wohnungen könnte die Caritas dienen.	<b>Kapitel 5.3</b>	<b>Wärme</b>	<b>Haushalte</b>	Stadt/ Wohnungswirtschaft/ Dritte	gering	mittelfristig	gering
[44]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Ausbau von Beratungsstellen für Bürger</b>	Durch den Ausbau von Beratungsstellen, wie dem Energiepunkt können Ängste und Bedenken bei Wohnungseigentümern, die schlichtweg mit der Sanierungsentscheidung überfordert sind, genommen werden.	<b>Kapitel 5.3</b>	<b>Wärme</b>	<b>Haushalte</b>	Energierferat/ Stadt/Dritte	mittel	mittelfristig	mittel
[45]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Gründung eines Sanierungsfonds</b>	Durch die Gründung eines Sanierungsfonds, dessen Vermögen in Form von Krediten in energetische Sanierungen fließen, entstehen neue Finanzierungsmöglichkeiten.	<b>Kapitel 5.3</b>	<b>Wärme</b>	<b>Haushalte</b>	Energierferat/ Stadt/Dritte	hoch	mittelfristig	hoch
[46]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Demonstrations- und Vorzeigeprojekte</b>	Die Stadt Frankfurt am Main zeigt schon heute für Gründerzeitgebäude (Mehrfamilien- Einfamilien- und Reihenhäuser) mögliche Mustersanierungen auf. Auch ein Monitoring-Konzept zur transparenten Überwachung	<b>Kapitel 5.3</b>	<b>Wärme</b>	<b>Haushalte</b>	Energierferat/ Forschung/Stadt/ Energieversorger/ Dritte	mittel	kurzfristig	mittel

			und als Illustration hilft Bürgern die wirklichen Einsparungen nach der Sanierung zu beurteilen.							
[47]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Schaffung von Anreizen zur energetischen Modernisierung</b>	Unentschlossenen Hauseigentümern sollten einen Anreiz gegeben werden, sich für eine energetische Modernisierung zu entscheiden. Die Stadt Frankfurt am Main hat somit die Möglichkeit über Zugeständnisse und Förderungen den Unentschlossenen zu überzeugen.	<b>Kapitel 5.3</b>	<b>Wärme</b>	<b>Haushalte</b>	Energierreferat/ Stadt	hoch	langfristig	hoch
[48]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Weiterbildung und Qualitätssicherung im Handwerk</b>	Auszubildende Handwerker übernehmen unter Anleitung von zertifizierten Handwerks- und Baufirmen die Sanierung der Demonstrations- und Vorzeigeliegenschaften. Im Rahmen der Sanierung finden Begehungen durch Eigentümer, die über eine Sanierung nachdenken statt.	<b>Kapitel 5.3</b>	<b>Wärme</b>	<b>Haushalte</b>	Handwerk/ Energierreferat/ Dritte	mittel	mittelfristig	mittel
[49]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Übersichtskarte zur Eigentümerstruktur</b>	Mit der Erstellung einer Übersichtskarte zur Eigentümerstruktur in Frankfurt können verschiedenen Eigentümer gezielt angesprochen werden. Aus der Kategorisierung der Eigentümer nach Wohnungsbaugesellschaft, Privateigentümer und Wohnungseigentümergeinschaften (vermietet,	<b>Kapitel 5.3</b>	<b>Wärme</b>	<b>Stadt</b>	Energierreferat/ Wohnungswirtschaft/ Stadt	mittel	kurzfristig	gering

			selbstgenutzt) können „unkomplizierte“ schnell durchführbare Sanierungsobjekte lokalisiert werden.							
[50]	<b>Verbreitung der Ziele des Masterplans</b>	<b>Veranstaltungen mit Bürgerbeteiligung</b>	Neben Informationen hinsichtlich des Fortschritts im Masterplan sollten auch Interessen seitens der Bürger in der Veranstaltung vorgebracht werden. Die Gestaltung des Masterplans als eine Art demokratischer Prozess steigert die Akzeptanz und Aktivität der Bürger langfristig.	<b>Kapitel 5.3</b>	<b>Wärme</b>	<b>Haushalte</b>	Energierreferat	mittel	kurzfristig	gering
[51]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Befragungsbögen bei Wahlzetteln</b>	Damit können wichtige Informationen für die Erstellung der räumlichen Eigentümerstrukturkarte gewonnen werden.	<b>Kapitel 5.3</b>	<b>Wärme</b>	<b>Haushalte</b>	Energierreferat/ Stadt	gering	kurzfristig	gering
[52]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Straßenfeste als Treffen für Multiplikatoren nutzen</b>	Bei Straßenfesten kommen Bürger miteinander in Kontakt. Zuvor bestimmte Multiplikatoren aus den Stadtquartieren können solche Events nutzen, um das Thema Quartierskonzept zu diskutieren und in die Breite zu tragen.	<b>Kapitel 5.3</b>	<b>Wärme</b>	<b>Stadt</b>	Energierreferat/ Stadt	gering	mittelfristig	gering
[53]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Förderung zum Austausch ineffizienter Heizungsanlagen</b>	Als technische Maßnahme zur Reduktion des Energieverbrauchs wird der Austausch alter ineffizienter Heizungsanlagen gegen	<b>Kapitel 5.4</b>	<b>Wärme</b>	<b>Haushalte</b>	Stadt	hoch	langfristig	gering

			neue Effiziente vorgeschlagen. Ein Anreize sollte geschaffen werden besonders ältere Anlagen (>20 Jahre) auszutauschen. Zur Bewilligung der zusätzlichen Förderung sollte ein Mindestanteil aus erneuerbaren Energien erreicht werden.							
[54]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Ausbau von Beratungsstellen</b>	Ziel dieser Maßnahme ist der Aufbau von weiteren „Energiepunkten“ in Frankfurt am Main.	<b>Kapitel 5.4</b>	<b>Wärme</b>	<b>Stadt</b>	Energierreferat/ Stadt	mittel	mittelfristig	mittel
[55]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Entwicklung eines Simulationstool</b>	Ermittlung von differenzierten Sanierungsstandards mittels eines Simulationstools. Mit diesem könnten zentrale Fragestellungen über den notwendigen Sanierungs- bzw. Neubaustandard von verschiedenen Gebäudegruppen, zur Erreichung eines für den Klimaschutz notwendigen Niveaus, beantwortet werden.	<b>Kapitel 5.4</b>	<b>Wärme</b>	<b>Stadt</b>	Energierreferat	gering	kurzfristig	gering
[56]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Einsatz von dezentralen Umwälzpumpen</b>	Der Einsatz von dezentralen Umwälzpumpen reduziert nicht nur Strom sondern auch den Wärmebedarf. Eine mögliche Förderung zur Verbreitung hocheffizienten und dezentralen Umwälzpumpen sollte geprüft werden.	<b>Kapitel 5.4</b>	<b>Wärme</b>	<b>Stadt</b>	Energierreferat/ Stadt	mittel	mittelfristig	mittel

[57]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Einsatz von Niedertemperaturheizungen</b>	Der Einsatz von Niedertemperaturheizungen sollte möglichst mit einem erhöhten Einsatz von Wärmepumpen einhergehen. Eine zusätzliche Förderung für den Einsatz von Flächenheizungen wie Fußbodenheizungen und / oder Deckenheizungen sollte geprüft werden. Auch zur Reduzierung der Fernwärmemetemperaturen sind geringe Systemtemperaturen an den Heizungen nötig.	<b>Kapitel 5.4 / 5.5.3</b>	<b>Wärme</b>	<b>Stadt</b>	Wohnungswirtschaft/ Stadt	hoch	langfristig	mittel
[58]	<b>EE-Anteil erhöhen</b>	<b>Ausbau und Verdichtung der Fernwärmeversorgung</b>	Als Maßnahme gilt es künftig das bestehende Netz weiter zu verdichten und neue Inselnetze zu entwickeln. Dadurch soll der Anteil der Fern-/Nahwärme von derzeit rund 24 Prozent am Wärmebedarf der Wohn- und Nichtwohngebäude (ohne Industrie) auf rund 50 Prozent erhöht werden.	<b>Kapitel 5.5.1</b>	<b>Wärme</b>	<b>Stadt</b>	Energieversorger/ Stadt/ Stadtplanungsamt/ Wohnungswirtschaft	hoch	langfristig	hoch
[59]	<b>EE-Anteil erhöhen</b>	<b>Plattform für geplante Erneuerungen von Leitungen</b>	Als Maßnahme zur Senkung der hohen Kosten bei der Verlegung von Nah- bzw. Fernwärmerohre im Bestand erstellt die Stadt Frankfurt am Main zusammen mit den verantwortlichen Unternehmen eine Kartenübersicht zu Versorgungsleitungen in Frankfurt. In dieser werden neben der Versorgungsart (Telefon, Gas, Wasser etc.) auch das Alter und die quali-	<b>Kapitel 5.5.1</b>	<b>Wärme</b>	<b>Stadt</b>	Energieversorger/ Stadt/Stadtplanungsamt/Wohnungswirtschaft	mittel	kurzfristig	mittel

			tative Beschaffenheit der Leitung erfasst.							
[60]	<b>EE-Anteil erhöhen</b>	<b>Informationskampagnen</b>	Mit Hilfe von Informationskampagnen und Öffentlichkeitsarbeit durch den Energiepunkt können Bedenken und Zweifel bei zukünftigen Nahwärmenetzen reduziert werden. Durch das Ausräumen der Zweifel verschwindet der negative Beigeschmack eines Anschlusszwangs.	<b>Kapitel 5.5.1</b>	<b>Wärme</b>	<b>Stadt</b>	Energieversorger/ Energieferrat/ Stadt/Wohnungswirtschaft	mittel	kurzfristig	gering
[61]	<b>EE-Anteil erhöhen</b>	<b>Gesetzänderung</b>	Durch die Wiederaufnahme des gestrichen §81 der Hessischen Bauordnung (HBO) von 2002 kann in Verbindung mit §19 Abs.2 der hessischen Gemeindeordnung (HGO) die Rechtsgrundlage für einen Anschluss- und Benutzungszwang von Fern- und Nahwärmeversorgungen wieder gefestigt werden.	<b>Kapitel 5.5.1</b>	<b>Wärme</b>	<b>Stadt</b>	Stadt	mittel	kurzfristig	gering
[62]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Absenkung der Netztemperatur</b>	Für den Einsatz von regenerativen Quellen wie Solarthermie und Groß-Wärmepumpen im Nahwärmenetz sind geringe Systemtemperaturen von hoher Bedeutung. Daneben werden durch geringere Vor-	<b>Kapitel 5.5.2</b>	<b>Wärme</b>	<b>Energieversorger</b>	Energieversorger/ Wohnungswirtschaft/ Nutzer	hoch	langfristig	hoch

			und Rücklauftemperaturen auch die Verluste im Netz reduziert.							
[63]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Untersuchung einer Kaskadierung im Fernwärmenetz</b>	Ziel ist eine an den Bedarf angepasste Nutzung von Energiequellen und dadurch eine Reduzierung der Wärmeverluste.	<b>Kapitel 5.5.2</b>	<b>Wärme</b>	<b>Energieversorger</b>	Forschung/ Energieversorger/ Wohnungswirtschaft/ Dritte	mittel	kurzfristig	gering
[64]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Einsatz von kalten Inselnetzen</b>	Als mögliche Maßnahme gilt es Stadtteile auf das Potential von Inselnetzen mit kalter Fernwärme zu untersuchen.	<b>Kapitel 5.5.3</b>	<b>Wärme</b>	<b>Energieversorger</b>	Energieversorger/ Wohnungswirtschaft/ Dritte	hoch	mittelfristig	hoch
[65]	<b>EE-Anteil erhöhen</b>	<b>Festlegung eines Mindestanteils aus erneuerbaren Energien und Abfall</b>	Als Maßnahme wird vorgeschlagen einen Mindestanteil aus erneuerbaren Energien im Fernwärmenetz festzulegen. Die Entscheidung welcher regenerativer Energieträger bzw. Abfall genutzt wird, bleibt dem Energieversorger überlassen. In 5 Jahresschritten sollte das EE-Ziel neu festgelegt werden.	<b>Kapitel 5.5.4</b>	<b>Wärme</b>	<b>Energieversorger</b>	Stadt/ Energierreferat	hoch	langfristig	gering
[66]	<b>EE-Anteil erhöhen</b>	<b>Entwicklung einer möglichen Standortkarte für regenerative Heizkraftanlagen</b>	Die Stadt Frankfurt weißt potentielle Flächen für die Errichtung von Energiezentralen unter Berücksichtigung der in den Hemmnissen genannten Standortfaktoren aus.	<b>Kapitel 5.5.4</b>	<b>Wärme</b>	<b>Energieversorger</b>	Stadtplanungsamt/ Energieversorger/ Wohnungswirtschaft/	mittel	kurzfristig	gering
[67]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Potentialstudie Nutzung von Industrieller Abwärme</b>	Als Maßnahme gilt es in einem ersten Schritt eine Potentialstudie der nutzbaren Abwärme in Abhängigkeit des Temperaturniveaus zu erstellen.	<b>Kapitel 5.5.4</b>	<b>Wärme</b>	<b>Stadt</b>	Forschung/ Energieversorger/ Wohnungswirtschaft/ Stadtplanungsamt/ Industrie/ Handwerkskammer	mittel	kurzfristig	gering

[68]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Finanzielle Anreize zur Nutzung von Abwärmepotentiale</b>	Durch das Aufsetzen und die Erweiterung eines umfangreichen Förderprogramm und finanziellen Anschubförderungen der Stadt wird die Nutzung von Abwärme begünstigt.	<b>Kapitel 5.5.4</b>	<b>Wärme</b>	<b>Stadt</b>	Abwasseramt/ Stadtplanung/ Energieversorger/ Stadt	mittel	langfristig	mittel
[69]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Abwärmequellen- und Senken-Karte für einzelne Quartiere</b>	Die Erstellung einer Abwärmequellen- und -Senkenkarten seitens der Stadt gibt KMU und Gebäudeeigentümer eine Übersicht zu möglichen Abwärmepotentialen im Quartier.	<b>Kapitel 5.5.4</b>	<b>Wärme</b>	<b>Stadt</b>	Abwasseramt/ Stadtplanung/ Energieversorger/ Stadt/Dritte	mittel	kurzfristig	gering
[70]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Ausarbeitung von Musterverträgen für die Nutzung von Abwärme</b>	Um Risiken für Abwärmennutzer und Abwärmeanbieter im Falle einer möglichen Insolvenz einer Seite zu minimieren, ist eine praktikable vertragliche Lösung inklusive eine Lösung über Versicherungen nötig.	<b>Kapitel 5.5.4</b>	<b>Wärme</b>	<b>Stadt</b>	Energieversorger/ Stadt/ Energierferat/ Dritte	gering	kurzfristig	gering
[71]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Schaffung von Anreizen zur Nutzung von Energie aus Abwasser</b>	Finanzielle Anreize oder Pflichten im Neubau sollen Anreize zur Nutzung von Energie aus Abwasser führen.	<b>Kapitel 5.5.5</b>	<b>Wärme</b>	<b>Stadt</b>	Energieversorger/ Stadt/ Energierferat/ Dritte	mittel	kurzfristig	mittel
[72]	<b>EE-Anteil erhöhen</b>	<b>Einsatz von Power-to-Gas</b>	Mit einem verstärkten Ausbau und den damit verbundenen steigenden Anteil erneuerbaren Stroms aus dem Regionalverband Frankfurt Rhein-Main wird bis 2050 Power to Gas wichtiger Bestandteil einer nachhaltigen Energieversorgung sein.	<b>Kapitel 5.5.6</b>	<b>Wärme</b>	<b>Industrie</b>	Energieversorger/ Stadt/Forschung/ Dritte	mittel	langfristig	hoch

[73]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Erstellung eines Maßnahmenkatalogs für den lokalen Industrie-sektor</b>	Da die angesiedelte Industrie in Frankfurt am Main sehr speziell ist sollte neben den aufgeführten Maßnahmen im GK in gezielten Workshops mit den lokalen Vertretern ein Maßnahmenkatalog Industrie erstellt werden.	<b>Kapitel 5.5.6</b>	<b>Endener-gie</b>	<b>Industrie</b>	Forschung/ Energierreferat/ Infraserv	mittel	kurzfristig	mittel
[74]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Einrichtung von Tempo 30-Limit auf Hauptverkehrsstraßen in Frankfurt</b>	Eine weitere Möglichkeit den Verkehr zu beruhigen ist die Einführung eines Tempo 30-Limits auch auf Hauptverkehrsstraßen von Frankfurt.	<b>Kapitel 6.2.1</b>	<b>Mobilität</b>	<b>Stadt</b>	Stadtplanungsamt/ Stadt/ Mobilitätsreferat/ Energierreferat	mittel	mittelfristig	gering
[75]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Aufbau / Ausbau von Fahrradschnellwegen</b>	Die sukzessive Erhöhung des Anteils an Fahrrädern bzw. Pedelecs in Frankfurt geht mit den Auf- und Ausbau von Schnellfahrradwegen einher. Diese ermöglichen Radfahrern schnellere Verbindungsstrecken und steigern somit die Attraktivität der Elektrofahrräder im Straßenverkehr.	<b>Kapitel 6.2.3 (201)</b>	<b>Mobilität</b>	<b>Stadt &amp; Re-gion</b>	Stadt/ Regionale Kommunen/ Stadtplanungsamt/ Mobilitätsreferat/ Straßenverkehrsamt	hoch	langfristig	hoch
[76]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Ausrichtung der Ampelschaltungen an den Fahrradverkehr</b>	Am Radverkehr ausgerichtete Ampelschaltung zu einer effizienten Steuerung des Radverkehrs und erhöht die Attraktivität zum Fahrradfahren.	<b>Kapitel 6.2.3 (203)</b>	<b>Mobilität</b>	<b>Stadt</b>	Stadt/ Stadtplanungsamt/ Mobilitätsreferat/ Straßenverkehrsamt	mittel	kurzfristig	gering
[77]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Einsatz sicherer Fahrrad- und Pedelecs-tellplätze</b>	Neben einem verbesserten Verkehrsfluss ist die Unterbringung und Verfügbarkeit von Leih- und Privatfahrrädern von zentraler Bedeutung.	<b>Kapitel 6.2.3</b>	<b>Mobilität</b>	<b>Stadt</b>	Stadt/ Stadtplanungsamt/ Mobilitätsreferat/ Energieversorger	mittel	langfristig	mittel

[78]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Freigabe zur gemeinsamen Nutzung der Busspuren für Fahrräder (Bussonderfahrstreifen)</b>	Mitbenutzung der Bussonderfahrstreifen eine Möglichkeit den ÖPNV als auch den Fahrradverkehr zu stärken und Kosten für eigene Fahrradwege zu reduzieren.	<b>Kapitel 6.2.3</b>	<b>Mobilität</b>	<b>Stadt</b>	Stadt/ Stadtplanungsamt/ Mobilitätsreferat/ Straßenverkehrsamt	gering	mittelfristig	gering
[79]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Ausbau eines eng flächendeckenden Fahrradverleihsystems</b>	Ausbau der bestehenden Fahrradverleihsysteme hinzu einem eng vermaschten, flächendeckenden Fahrradverleihsystem.	<b>Kapitel 6.2.4</b>	<b>Mobilität</b>	<b>Stadt</b>	Energieversorger/ Mobilitätsreferat/ Straßenverkehrsamt/ Stadt/Dritte	hoch	mittelfristig	hoch
[80]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Städte und Kommunen übergreifende Fahrradverleihsysteme</b>	In der Region Frankfurt, wo Distanzen kleiner 15 km zwischen stadtnahen Gegenden und der Stadt vorhanden sind sollte über das Angebot von Pedelecs und E-Bikes in Städte übergreifenden Verleihsystemen nachgedacht werden.	<b>Kapitel 6.2.4</b>	<b>Mobilität</b>	<b>Stadt &amp; Region</b>	Stadt/ Regionalkommunen/ Stadtplanungsamt/ Mobilitätsreferat/ Straßenverkehrsamt	hoch	mittelfristig	hoch
[81]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Entwicklung eines Strategiekonzeptes ÖPNV &amp; Fahrrad</b>	Rund 82 Prozent des Quell-Ziel-Verkehrs kommen täglich mit dem Auto, somit gilt es den Pendlerverkehr zu reduzieren. Ein Strategiekonzept sollte folgende Maßnahmen berücksichtigen: 1. Förderung von Fahrradstationen an ÖPNV Haltestellen; 2. Verbesserte Kopplung der öffentlichen Fahrradverleihsysteme (ÖFVS); 3. Gemeinsame Nutzung der Busspuren für Fahrräder und Busse (Bussonderfahrstreifen);	<b>Kapitel 6.2.4</b>	<b>Mobilität</b>	<b>Stadt &amp; Region</b>	Verkehrsbetriebe/ Stadt/ Regionale Kommunen/ Stadtplanungsamt/ Mobilitätsreferat/ Straßenverkehrsamt/ Dritte/Forschung	hoch	mittelfristig	mittel

[82]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Verbesserte Kopplung der öffentlichen Fahrradverleihsysteme (ÖFVS) und des ÖPNV der 4. Generation</b>	Die Kooperation zwischen ÖPNV und ÖFVS-Anbietern sollte gestärkt werden.	<b>Kapitel 6.2.4</b>	<b>Mobilität</b>	<b>Stadt</b>	Verkehrsbetriebe/ Stadt/ Regionale Kommunen/ Stadtplanungsamt/ Mobilitätsreferat/ Straßenverkehrsamt/ Dritte	mittel	mittelfristig	hoch
[83]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Ladestationen in innerstädtischen Bereichen für Anwohner errichten</b>	Eine Maßnahme zur Verbreitung der E-Fahrzeuge ist die Förderung von Abstellplätzen zur Aufladung der Elektrofahrzeuge. Quartiersgaragen und Parkhäuser bieten hierfür eine sichere und in der Regel kostengünstige Möglichkeit E-Fahrzeuge aufzuladen.	<b>Kapitel 6.3.1</b>	<b>Mobilität</b>	<b>Gebäude</b>	Energieversorger/ Wohnungswirtschaft/ Stadtplanungsamt/ Stadt/ Mobilitätsreferat/ Dritte	mittel	mittelfristig	hoch
[84]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Vergünstigungen für E-Pkws im öffentlichen Verkehr</b>	Eine weitere Möglichkeit der Förderung ist das Angebot von vergünstigten Parkplätzen für Carsharing und Elektrofahrzeuge. Denkbar sind Parkplatzausweisungen ähnlich wie bei den Frauen- und Behindertenparkplätzen sowie die Nutzung der Busspur für Elektrofahrzeuge im Berufsverkehr.	<b>Kapitel 6.3.1</b>	<b>Mobilität</b>	<b>Stadt</b>	Stadtplanungsamt/ Straßenverkehrsamt/ Stadt/Mobilitätsreferat	mittel	mittelfristig	gering

[85]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Anpassung der Pendlerpauschale auf Bundesebene</b>	Diese ist so zu konzipieren, dass in erster Linie öffentliche Verkehrsmittel genutzt werden und zweitens Nutzern von Elektro-Pkw und Elektrorollern ein monetärer Vorteil gegenüber konventionellen Fahrzeugen entsteht.	<b>Kapitel 6.3.1</b>	<b>Mobilität</b>	<b>Bund</b>	Stadtplanungsamt/ Straßenverkehrsamt/ Stadt/ Mobilitätsreferat/ Energierreferat	gering	mittelfristig	gering
[86]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Marketingkonzept „FrankfurtEmobil“ erstellen</b>	Neue Projekte sollten mit den bisherigen und künftigen Partnern in einem Konzept „FrankfurtEmobil“ gemeinsam dargestellt werden. Angestrebt werden sollte ein jährlich erscheinendes Marketingkonzept mit den schon laufenden und künftigen Aktivitäten zur Elektromobilität als auch zur nachhaltigen Mobilität.	<b>Kapitel 6.3.1</b>	<b>Mobilität</b>	<b>Stadt</b>	Verkehrsbetriebe/ Stadtplanungsamt/ Straßenverkehrsamt/ Stadt/ Mobilitätsreferat/ Energierreferat/ Dritte	gering	kurzfristig	gering
[87]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Städtische Vorgaben für Investoren im Bereich Einfamilienhaus / Mehrfamilienhaus</b>	Die Stadt Frankfurt am Main sollte von ihren künftigen Investoren der Immobilienwirtschaft verstärkt die Berücksichtigung von Pedelec-Ladepunkten und Parkplätzen mit Ladeinfrastruktur für E-Fahrzeuge einfordern, um die Nutzung von E-Fahrzeugen durch Privatpersonen zu fördern.	<b>Kapitel 6.3.1</b>	<b>Mobilität</b>	<b>Stadt</b>	Stadtplanungsamt/ Straßenverkehrsamt/ Stadt/ Mobilitätsreferat/ Energierreferat	gering	mittelfristig	gering
[88]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Ordnungsrechtliche Änderungen zu Gunsten des Carsharing</b>	Der Ausbau des Carsharing Anteils in Frankfurt steht und fällt mit ordnungsrechtlichen Eingriffen sowie Sonderrechten für Carsharing-Fahrzeuge. Dem-nach kann durch die Berücksichti-	<b>Kapitel 6.3.2</b>	<b>Mobilität</b>	<b>Stadt</b>	Stadtplanungsamt/ Straßenverkehrsamt/ Stadt/ Mobilitätsreferat	hoch	kurzfristig	gering

			gung von Abstellplätzen speziell für Carsharing-Fahrzeuge im Bebauungsplan die Verkehrsstruktur an das Carsharing angepasst werden.							
[89]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Vorrang Parkplätze in Wohnvierteln für Carsharing E-Fahrzeuge</b>	Durch Carsharing-Abstellplätze für E-Fahrzeuge soll das E-Fahrzeug seine Alltagstauglichkeit bei unterschiedlichen Nutzergruppen (Fahrten zur Arbeit, Familienfahrten, Besorgungen) zeigen.	<b>Kapitel 6.3.2</b>	<b>Mobilität</b>	<b>Stadt</b>	Stadtplanungsamt/ Straßenverkehrsamt/ Stadt/ Mobilitätsreferat/ Dritte	mittel	kurzfristig	gering
[90]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Umstellung der Busflotte auf elektrische Antriebe + Schnellbuslinien</b>	Im Zuge der Elektromobilitätsstrategie der Bundesregierung ist wie bei Pkws eine Umstellung der Busflotte auf elektrische Antriebe geplant. Im Vergleich zu den Elektro-Pkw können Elektrobusse über Wechselakkusysteme oder direkt über Induktionsspulen an den Haltestellen aufgeladen werden.	<b>Kapitel 6.4.1</b>	<b>Mobilität</b>	<b>Stadt</b>	Verkehrsbetriebe/ Stadtplanungsamt/ Straßenverkehrsamt/ Stadt/ Mobilitätsreferat/ Energieversorger/ Dritte	hoch	langfristig	hoch
[91]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>City Logistik-Konzept auf E-Fahrzeuge erstellen und in die Umsetzung führen</b>	Neben dem von UPS gestarteten Projekt zur City Logistik weitere Paket-Dienstleister für den Einsatz von Elektrozustellfahrzeugen gewonnen werden. Aus der Sammlung der Erfahrungswerte im Rahmen des Projektes soll ein City Logistik-Konzept auf der Basis von Elektrofahrzeugen und Pedelecs/Lastenfahrrädern erstellt werden, um mittelfristig	<b>Kapitel 6.5</b>	<b>Mobilität</b>	<b>Stadt</b>	Logistik-Unternehmen/ Forschung/ Straßenverkehrsamt/ Dritte	mittel	kurzfristig	gering

			Zustellfahrzeuge mit Verbrennungsmotor durch Elektrozustellfahrzeuge im Stadtgebiet zu ersetzen und somit eine weitere Reduzierung von Abgasen zu erreichen.							
[92]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Modellprojekt Logistik-Sharing</b>	Als innovatives Modellprojekt für Frankfurt und seinen vielen Logistikunternehmen sollte erprobt werden, in wie weit bestehende Logistikfirmen in der Region zu einer Kooperation und zum „teilen“ der Transportkapazitäten der Lkws und LNFs bereit wären und wie eine gemeinsame Plattform entstehen könnte. Dabei gilt das Car-sharing-Modell für Pkw als Vorbild.	<b>Kapitel 6.5</b>	<b>Mobilität</b>	<b>Stadt</b>	Logistik-Unternehmen/ Forschung/ Straßenverkehrsamt/ Dritte	mittel	mittelfristig	mittel
[93]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Wettbewerb zu städtischen Fahrradwegen mit den örtlichen Stadt-, Landschafts- und Architekturuniversitäten.</b>	Als Maßnahme gilt es, einen Wettbewerb zu gestalten. Stadtplanungsstudiengänge an den lokalen Universitäten und Fachhochschulen sollen aufgefordert werden, kreative und innovative innerstädtische Fahrradwege zu gestalten.	<b>Kapitel 6.7</b>	<b>Mobilität</b>	<b>Stadt</b>	Energierreferat/ Stadtplanungsamt/ Straßenverkehrsamt/ Mobilitätsreferat/ Energieversorger/Dritte	gering	kurzfristig	gering
[94]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Veranstaltungsreihe: Tag der Nahmobilität</b>	Als Maßnahme gilt es, einen Tag im Jahr der Nahmobilität festzuhalten. Möglichst viele Menschen, ob Alt und Jung, sollen dazu bewegt werden, zu Fuß zu gehen oder das Fahrrad zu nutzen.	<b>Kapitel 6.7</b>	<b>Mobilität</b>	<b>Stadt</b>	Energierreferat/ Mobilitätsreferat/Dritte	gering	kurzfristig	gering

[95]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Mobilitätsrechner online</b>	Zur Kalkulation der eigenen Mobilität kann ein Kostenrechner die unterschiedlichen Mobilitätsformen vergleichen, z.B. MIV vs. ÖPNV + Fahrrad Kombi, und informieren. Mit wenigen Eingaben sollten die jährlichen Kosten für Mobilität dargestellt werden.	<b>Kapitel 6.7</b>	<b>Mobilität</b>	<b>Stadt</b>	Energierreferat/ Mobilitätsreferat/Dritte	gering	mittelfristig	gering
[96]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Wettbewerb „Green Mobility Award“</b>	Ein jährlich stattfindender „Green Mobility Award“ wird an das Unternehmen verliehen, welches seine Mitarbeiter beim Verzicht auf eigene Autonutzung oder der Umstellung des Fuhrparks am erfolgreichsten motiviert hat.	<b>Kapitel 6.7</b>	<b>Mobilität</b>	<b>Stadt</b>	Energierreferat/ Mobilitätsreferat/Dritte	gering	mittelfristig	gering
[97]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Klimahaus</b>	Einrichtung eines Klimahauses als zentraler, praxisnaher Anlaufpunkt für Klima- und Energiethemen. Förderung Austausch, Information, Bildung und Beratung von Bürgerinnen und Bürger, Initiativen und Stadt. Klimaschutz sichtbar und fühlbar machen.	<b>Kapitel 5.3</b>	<b>Endenergie</b>	<b>Stadt</b>	Bürgerinnen und Bürger/ Initiativen/ Dritte	mittel	langfristig	hoch

[98]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Steigerung der Energieeffizienz im kulturellen Bereich</b>	Erarbeitung eines Programmes zur Förderung der Steigerung der Energieeffizienz im kulturellen Bereich: Förderung von Maßnahmen und Erstellung einer Systematik für Energiemanagements-Prozesse.	<b>Kapitel 4.3</b>	<b>Strom</b>	<b>GHD</b>	Energierferats/ Stadt/ Vereine/ Dritte	hoch	mittelfristig	mittel
[99]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Förderung Klimaschutzinitiativen</b>	Klimaschutz- Initiativen gezielt fördern. Förderrichtlinien erlassen werden, Förderung als „Anschubfinanzierung“, Ziel ist langfristige Verstetigung der geförderten Klimaschutzinitiativen	<b>Kapitel 7.7.</b>	<b>Endenergie</b>	<b>Stadt</b>	Unternehmen, Vereine, Privatpersonen	mittel	kurzfristig	gering
[100]	<b>Klimaschutz</b>	<b>Querschnittsaufgabe Klimaschutz in der Stadtverwaltung – Etablierung einer Arbeitsgruppe</b>	Steuerungsgruppe prüft Entscheidungen auf Klimaschutzaspekte und unterstützt Ämter bei diesem Thema. Synergien können genutzt werden, "Ziel gemeinsam leben", Verständnis für die Querschnittsaufgabe Klimaschutz	<b>Kapitel 7.7</b>	<b>Endenergie</b>	<b>Stadt</b>	Ämter/ Politik	hoch	langfristig	gering
[101]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Abbau von Hemmnissen (rechtlich, ökonomisch, technisch, sozial)</b>	Hemmnisse im Energie- und Klimaschutzbereich analysieren, Lösungen erarbeiten und abbauen	<b>Kapitel 7.7</b>	<b>Endenergie</b>	<b>Stadt</b>	Energierferat// /Land/ Bund/ Dritte	hoch	langfristig	mittel

[102]	<b>Energieeinsparung</b>	<b>Sanierungsfahrplan</b>	Darstellung der Sanierungsschritte auf Quartiersebene hinsichtlich der Reduzierung des Energiebedarfs und dem Ausbau der erneuerbaren Energien . Der Sanierungsfahrplan soll als informelles Instrument einen Rahmen für eine energetische Sanierung des Frankfurter Gebäudebestandes bieten.	<b>Kapitel 5.4</b>	<b>Wärme</b>	<b>Haushalte/ GHD</b>	Energierferat/ Stadt/ Wohnungswirtschaft	hoch	mittelfristig	hoch
-------	--------------------------	---------------------------	---	--------------------	--------------	---------------------------	---	------	---------------	------

## **Frankfurter Bürgerinnen und Bürger aktiv im Klimaschutz**

Im Rahmen des Masterplans 100% Klimaschutz fanden zahlreiche Vorträge, Infostände und Bürgerbeteiligungsveranstaltungen mit knapp 900 aktiven Teilnehmern statt. Die Bürgerinnen und Bürger tauschten sich aus, informierten sich und erarbeiteten Ideen für das Ziel: 100% Erneuerbare Energie für die Stadt Frankfurt am Main bis zum Jahr 2050.

Ideen und Maßnahmen, die dem Ziel des Masterplans 100% Klimaschutz entsprachen und eine Mitwirkungsmöglichkeit der Stadt enthielten, befinden sich nun in der vorliegenden Liste. Die Stadt Frankfurt am Main strebt an, möglichst viele der unten aufgeführten Ideen im Laufe der nächsten Jahre umzusetzen bzw. zu unterstützen.

### **Technische Maßnahmen/ Ideen zur Förderung des Klimaschutzes**

Hierunter fallen neben der reinen Technik auch Anschauungsbeispiele, die ein Informieren und Nachahmen der Bürgerinnen und Bürger zur Verbesserung des Klimaschutzes ermöglichen sollen:

- Repair-Cafés gründen und kaputte Elektrogeräte selbst reparieren statt weg zu werfen
- Anreiz schaffen, dass Nebenprodukt Wärme zu nutzen (z.B. von Waschanlage für benachbarte Wohngebäude)
- Stadt vergibt an kommunalen Gebäuden „Bürger-Dächer“ für Bürgersolaranlagen
- Strategie entwickeln um CO<sub>2</sub>-freie Lieferung zu fördern
- Städtisches Lastmanagement ausbauen
- Virtuelle Kraftwerke vermehrt aufbauen
- Energiesparschulen ausbauen (Praxisleitfäden erstellen, Solar-Carports errichten usw.)
- Teilmöblierte, hocheffiziente Wohnungen, in denen Lampen und weiße Geräte vorinstalliert sind; beispielsweise Studentenwohnheime
- Förderung: Kombinieren von Sanierungen (z.B. Dachdämmung) mit der Anbringung von Solarenergieanlagen
- Förderung: Umtauschaktion Glühbirne abgeben – LED erhalten

### **Nicht-technische Maßnahmen/ Ideen zur Förderung des Klimaschutzes**

Nicht nur technische Maßnahmen tragen zum Klimaschutz bei. Oft muss auch ein Anreiz zum „Umdenken“ geschaffen werden. Die Bürgerideen reichten hier von der klassischen Förderung, über Wettbewerbe bis hin zur Imageverbesserung klimaschonenden Verhaltens.

## Strom und Wärme und übergreifende Themen

- Wettbewerb „Wer hat den Ältesten?“ kombiniert mit Austauschprogramm (Abwrackprämie) für Kühlschränke
- „Grüne“ Hausnummern als Beleg für Energieeffizienzmaßnahme vergeben
- Briefkastenaufkleber verschenken – „I love Veggie“ und ähnliches
- Wettbewerbe zum Klimaschutz
- Menschen, die im Klimaschutz positiv arbeiten, auszeichnen
- Energiesparkampagne: Vorgehen anlehnend an die Wassersparkampagne
- Aktiv in der Beratung von Eigentümergemeinschaften werden:
  - Initialzündung über Projekt der Stadt
  - Beispiele verbreiten, wie Hauseigentümergemeinschaften energetische Sanierung geschafft haben: Anleitung erstellen, Infoveranstaltungen für Hauseigentümergemeinschaften, Hausbesitzer, Verwalter, Infobus starten (Energiepunkt goes local)
- Energiewendemaskottchen entwerfen: Banal, einfacher Zugang, Wiedererkennungswert -> Green Attila – gute Isolierung, energiesparende Fortbewegung
- Wettbewerb ins Leben rufen zum Motto „Energiegeiz ist geil!“
- Aufkleber vergeben für Werbung: „Wir sparen Energie“
- Öffnungszeiten der FES verbessern, damit Wertstoffen eingesammelt und recycelt bzw. energetisch genutzt werden können
- Internetseite für Meldungen von Missständen bei Energieverschwendung einrichten
- Öffentliche Dächer als Anlageobjekt für Frankfurter Bürger zur Verfügung stellen
- Heizungsanlagen in Schulen verbessern
- Zusammenschluss aller bestehenden Gremien, Umweltschutz und Vereine, um Energiewende voranzutreiben
- Einen „Peter Postleb“ für die Energie
- Städtische Vermarktung von Öko-Energie: Frankfurt kauft die Energiemengen kleinerer Energieerzeuger auf und vermarktet diese gebündelt.
- Nicht nur einen Energiepunkt in Frankfurt, sondern mehrere lokale Energiepunkte in den Stadtteilen (Themen: Technik, Bildung, Partizipation)
- Die Stadt Frankfurt sollte gemeinsam mit Energievereinen und Genossenschaften konkrete Projekte besprechen
- Unterstützung bei Konzepten zur Speicherung von selbst erzeugter Energie
- Haus der Zukunft: Demonstrationsprojekt als Möglichkeit für Bürger, klimaneutrales Leben in einem Haus im Stadtgebiet hautnah zu erleben und sich zu informieren.
- Vermarktung von Kleinmengen an Öko-Energie durch die Stadt Frankfurt

- Kommunale Abwrackprämie für Ölheizungen und andere ineffiziente Anlagen
- Öffentlichkeitswirksame Kennzeichnung von energiewirtschaftlichen öffentlichen Gebäuden
- CO<sub>2</sub>-Ziele für Wohnungsbaugesellschaften: Städtische Gesellschaften formulieren transparente CO<sub>2</sub>-Ziele und messen die Einhaltung.
- Vermieter zu nachhaltiger Sanierung anregen bzw. verpflichten
- Einsatz von „neutralen Dritten“, die bei Umbaumaßnahmen zwischen Mietern und Vermietern vermitteln
- Publikation von gelungenen Mieter-Projekten im Rahmen eines Printmediums
- Gründung einer Klimawerkstatt
- Bessere Bündelung der Zugänge, Mittel und Unterstützung bei bestehenden Klimaschutzinitiativen, bestehendes Potential nutzen
- Konto für CO<sub>2</sub>-Emissionen und ökologischer Fußabdruck
- Verpflichtung der Stadt Frankfurt am Main, nachhaltige Dienstleister zu beauftragen
- Ökostrom als Regeltarif anbieten
- Energiesparbücher mit Punkten zur Motivation einrichten
- mehr Öffentlichkeitsarbeit über Bildungsveranstaltungen
- Förderung/ Information: Wasser sparen, Regenwasser für Haushalte nutzen
- Beratungspflicht für Wohnungsbaugesellschaften im Bereich Heiz- und Energiekosten
- Spielerische Vermittlung von Klimaschutz, z.B. „Stromspar-Partys“
- Nachhaltigkeitstheater, theaterpädagogische Herangehensweise
- Aufklärungskampagnen in Schulen und Kindergärten, z.B. zur Ökobilanz von Lebensmitteln
- Verstärkte Öffentlichkeitsarbeit rund um das Thema Klimaschutz, auch durch sichtbare Werbemaßnahmen, wie z.B. beklebte Autos

### **Ernährung und Konsum**

- Tausch statt Kauf: Tauschbörsen fördern
- Vegetarisch, Bio, regional fördern: Frankfurter Promi-Kühlschränke vor und nach der Aktion fotografieren
- „unverpackt“ Laden fördern
- Strategie gegen Plastiktütenschwemme entwickeln; Modellregion „plastiktütenfreie Stadt“
- Informationen über nachhaltiges Einkaufen, digitale Infotafel
- Restaurantpartner suchen für vegetarisches bzw. veganes Essen; mit Breitenwirkung z.B. McDonalds

- Auf (Stadt) Festen mehr vegetarisches/veganes Essen anbieten
- Beratungen für energiesparendes Kochen geben
- Energiebilanz der Produkte beim Einkaufen als Information zur Verfügung stellen (z.B. App)
- Förderung durch Beratung mit dem Ziel, den Anteil regionaler Produkte erhöhen in Kantinen und Großküchen zu erhöhen

### **Verkehr**

- Park & Ride mehr bewerben, nutzerfreundlicher machen
- Gefahren abbauen, Fahrrad fahren sicherer machen
- Werbemaßnahme: Rad fahren attraktiv machen – Bauch-Beine-Po-Training -> Rad fahren macht sexy
- Frankfurter Promi wirbt plakativ „Ich fahre für Sie e-Bike“
- Vereinfachung „Mobilitätskonzepte“
- Mehr Fußgängerzonen in den Stadtteilen um Fuß- und Radverkehr zu fördern
- Taxi-Lizenzen vergeben und Vorteile bieten bei E-Auto
- Steuerliche Begünstigung nicht nur von KFZ, Fahrkarten, sondern auch für Fahrradfahrer,
- Bei städtischem Fuhrpark, Feuerwehr, Polizei, und RTH E-Fahrzeuge einsetzen
- Autofreier Tag in Stadtteilen oder Gesamtstadt
- Mehr Fahrradparkplatz anbieten (auch gegen Diebstahl gesicherte -> Thema Pedelecs, e-Bikes)
- Bahnhöfe attraktiver und sicherer gestalten  
Kommunaler finanzieller Anreiz von Elektroautos geben
- Viele Ladestationen für Elektroautos über die Stadt verteilt an Straßenlaternen anbieten
- Tempo 30 ausbauen – spart Kraftstoff und erhöht Verkehrssicherheit des Fuß- und Radverkehrs
- Grüne Welle für Räder
- ÖPNV: Busse kleiner, dafür häufigere Fahrten um Attraktivität des ÖPNV zu erhöhen
- Pedelec-Ausleihstation einrichten
- Radwege zu „Radautobahnen“ (Radschnellwege) ausbauen
- Verkehrsraum für PKW reduzieren, Verkehrsraum für ÖPNV und Radfahrer erhöhen
- City-Maut (->finanziert ÖPNV)
- Stellplatzablösen und erhöhte Parkgebühren
- Elektroautos als städtische Flotte: Bereitstellung von Elektroautos als Energiespeicher und Carsharing
- Subventionen für Carsharing

- Stationen mit gratis Mieträдераusleihe
- Radwegeausbau
- Zentrale Anlaufstelle für Mobilität schaffen: Integrierte Planung, zentraler Ansprechpartner – Ziel: verbesserte Multimodalität
- Leuchtturmprojekte/Bürgerticket, z.B. für E-Bikes, Fahrradinfrastruktur und Bürgertickets
- Bildungsarbeit und Kommunikation zur Mobilität verstärken, z.B. stadtweite Kampagnen
- Verkehrsplanung stärker aus der Sicht älterer Menschen denken angesichts des demografischen Wandels in Deutschland
- Intelligente Lösungen für die Pendler der Stadt schaffen
- Lieferverkehr in der Innenstadt über E-Transportbikes
- Abstellplätze für Fahrräder schaffen
- Elektrobusse im ÖPNV einsetzen
- Mobilitätsberatung: Aufklärungsangebote über umweltfreundliche Mobilität

Abbildung 1: Module und Bestandteile des Generalkonzepts, eigene Darstellung (IBP).....	2
Abbildung 2: Module des Masterplans 100% Klimaschutz .....	12
Abbildung 3: Verteilung der Endenergie nach den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr am Gesamtendenergiebedarf, eigene Darstellung (IBP) nach aktualisierten Daten (ifeu 2011).....	17
Abbildung 4: Aufteilung des Endenergieverbrauchs nach Nutzungsgruppen, IBP nach (ifeu 2013).....	17
Abbildung 5: Energieträger (inkl. Verkehrssektor) im Jahr 2010,eigene Darstellung (IBP) auf Berechnungsgrundlage der Daten von (ifeu 2013) und des Energiereferats Frankfurt 2010. ....	18
Abbildung 6: CO <sub>2</sub> -Emissionen in Frankfurt (exklusive Verkehr), (Energiereferat der Stadt Frankfurt am Main, 2014), (Insitut für Energie- und Umweltforschung, 2011).....	19
Abbildung 7: CO <sub>2</sub> -Emissionen für 2010 in CO <sub>2</sub> Äquivalente inkl. Verkehr, eigene Darstellung auf Datengrundlage von (Energiereferat der Stadt Frankfurt am Main, 2014) und (ifeu 2011). ....	20
Abbildung 8: Stromverbrauch nach Sektoren 2010 in Frankfurt, eigene Darstellung (IBP) nach aktualisierten Daten (Energiereferat der Stadt Frankfurt am Main, 2014), (ifeu 2011).....	22
Abbildung 9: Entwicklung der Stromverbräuche von 1995 bis 2010 nach Sektoren, eigene Darstellung (IBP) nach (Energiereferat Stadt Frankfurt am Main, 2011).....	23
Abbildung 10: Endenergie nach Anwendungen im Haushaltssektor, eigene Darstellung (IBP) nach (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2013). ....	24
Abbildung 11: Endenergieverbrauch Strom im Sektor Haushalte nach Anwendung (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2013). ....	25
Abbildung 12: Entwicklung des Haushaltsstromverbrauchs pro Haushalt in Frankfurt a.M. von 2000 bis 2010, eigene Darstellung (IBP) nach (Stadt Frankfurt, 2011).....	26
Abbildung 13: Vergleich der Entwicklung des Strombedarfs pro Haushalt in Frankfurt und Deutschland, eigene Darstellung (IBP).....	26
Abbildung 14: Strombedarf in GWh und deren Anteile nach Verbrauchergruppen im Sektor GHD in Frankfurt am Main, eigene Berechnung nach (Bluewien Gesa AG, 2011), (Gesellschaft für Markt- und Absatzforschung, 2009), (Mainova AG, 2013).....	27
Abbildung 15: Stromverbrauch nach Anwendung im Sektor GHD im Jahr 2010 in FRANKFURT, eigene Berechnung (IBP). ....	28

Abbildung 16: Gegenüberstellung des Stromverbrauchs nach Anwendung von Frankfurt (IBP) und dem bundesweiten Durchschnitt (Schlomann, Kleeberger, & al., 2011). .....	29
Abbildung 17: Aufschlüsselung des Strombedarfs nach Anwendungszwecken in büroähnlichen Betrieben, eigene Darstellung (IBP) nach (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, 2011). .....	30
Abbildung 18: Aufschlüsselung des Strombedarfs nach Anwendungszwecken im Handel, eigene Darstellung (IBP), nach (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, 2011). .....	30
Abbildung 19: Aufschlüsselung des Strombedarfs nach Anwendungszwecken im Hotel/Horeca-Sektor, eigene Darstellung (IBP), nach (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, 2011). .....	31
Abbildung 20: Aufschlüsselung des Strombedarfs in Rechenzentren nach Anwendungszwecken, eigene Darstellung (IBP), nach (Rasmussen, N., 2011). .....	32
Abbildung 21: Stromverbrauch Sektor Industrie für 1995 bis 2010, Quelle: (Institut für Energie- und Umweltforschung (Ifeu), 2011) .....	34
Abbildung 22: Aufteilung des Endenergieverbrauchs nach Anwendungsfall, eigene Darstellung nach (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2013). ..	34
Abbildung 23: Überblick über die bestehenden Erzeugungsanlagen der Mainova AG im innerstädtischen Bereich, (Mainova AG).....	35
Abbildung 24: Stromerzeugungsmix der Mainova AG, Frankfurt am Main 2010, eigene Darstellung IBP nach (Mainova AG, 2013).....	36
Abbildung 25: Erneuerbarer Strom nach Erzeugungstyp in Frankfurt (links 2010; rechts 2013), eigene Berechnung (IBP), (Energierreferat 2014). .....	38
Abbildung 26: Stromverbrauch versus innerstädtische Stromerzeugung im Jahr 2010, eigene Darstellung (IBP). .....	38
Abbildung 27: Anteile am Wärmeverbrauch nach Sektoren in Frankfurt 2010, Quelle (ifeu 2011). .....	41
Abbildung 28: Anteile der Energieträger im Wärmesektor, Quelle (ifeu 2011). .....	42
Abbildung 29: Wärmeversorgungsstruktur nach Energieträgern bei Wohngebäuden nach KEEA-Daten (Energierreferat 2011).....	42
Abbildung 30: Wärmeverbrauch nach Häusertypen, eigene Darstellung (IBP). .....	43
Abbildung 31: Verteilung des Wärmebedarfs nach Baualtersklassen und Gebäudetypen, eigene Darstellung (IBP).....	43
Abbildung 32: Wohnfläche nach Baualtersklasse und Gebäudetypen, eigene Darstellung (IBP).....	44

Abbildung 33: Wärmebereitstellung nach Energieträgern im Sektor GHD, eigene Darstellung (IBP) nach KEEA-Daten (Energierreferat 2011). .....	45
Abbildung 34: Wärmebereitstellung nach Energieträgern im Sektor Industrie, eigene Darstellung (IBP) nach KEEA-Daten (Energierreferat 2011). .....	46
Abbildung 35: Entwicklung der kumulierten Kollektorfläche von solarthermischen Anlagen, Quelle (Energierreferat 2014). .....	48
Abbildung 36: Wärmeverbrauch versus innerstädtische Wärmezeugung im Jahr 2010, eigene Darstellung (IBP). .....	50
Abbildung 37: Pkw-Dichte pro 1.000 Einwohner in Frankfurt, eigene Darstellung (IBP) auf Basis von (Stadt Frankfurt, 2011). .....	53
Abbildung 38: Verteilung der Kilometerleistung von Pkw nach Verkehrsart, eigene Darstellung (IBP) auf Datengrundlage (Institut für Energie und Umweltforschung, 2010). .....	53
Abbildung 39: Verteilung der Kilometerleistung von MZR nach Verkehrsart, eigene Darstellung (IBP) auf Datengrundlage (Institut für Energie und Umweltforschung, 2010). .....	54
Abbildung 40: Entwicklung der ÖPNV Nutzung in Personen pro Tag von 2007 bis 2011 in Frankfurt am Main, (Stadt Frankfurt, 2011). .....	55
Abbildung 41: Index des Fahrgastaufkommens in den öffentlichen Verkehrsmitteln U-Bahn, Straßenbahn und Bus, (Stadt Frankfurt, 2011). .....	55
Abbildung 42: RMV Liniennetz Frankfurt, (Rhein-Main-Verkehrsbund, 2014). .....	56
Abbildung 43: Verteilung der Pkm auf den Lokal- und Regionalverkehr nach (Stadt Frankfurt, 2011), eigene Darstellung (IBP). .....	57
Abbildung 44: Verteilung der Personenkilometerleistung im Binnen- und Quell- Zielverkehr nach Verkehrsmittel des ÖPNVs, eigene Darstellung (IBP) auf Datengrundlage des (Institut für Energie und Umweltforschung, 2010). ..	57
Abbildung 45: Aufschlüsselung der Fahrzeugkilometer nach Transportmittel und Verkehrsart, eigene Darstellung (IBP) auf Datenbasis (Institut für Energie und Umweltforschung, 2010). .....	58
Abbildung 46: Verteilung CO <sub>2</sub> -Emissionen nach Verkehrsart, eigene Darstellung (IBP) auf Datengrundlage des (Institut für Energie und Umweltforschung, 2010). .....	59
Abbildung 47: CO <sub>2</sub> -Emissionen des ÖPNV nach Verkehrsart, eigene Darstellung (IBP) nach (Institut für Energie und Umweltforschung, 2010). ....	60
Abbildung 48: Aufschlüsselung der CO <sub>2</sub> -Emissionen nach Transportmittel und Verkehrsart, eigene Darstellung (IBP) auf Datenbasis (Institut für Energie und Umweltforschung, 2010). .....	61

Abbildung 49: CO <sub>2</sub> -Bilanz für den Verkehrssektor nach Verkehrsmittel und Verkehrsart im Jahr 2010, eigene Darstellung (IBP) auf Datenbasis (Institut für Energie und Umweltforschung, 2010).....	61
Abbildung 50: Modal Split des lokalen Verkehrs in Frankfurt 2008, eigene Darstellung (IBP) nach (Topp, Skoupil, Kuchler und Partner + Köhler und Taubmann GmbH , 2004) aktualisiert. ....	63
Abbildung 51: Modal Split europäischer Städte, eigene Darstellung (IBP) auf Datenbasis (Management, 2013). ....	63
Abbildung 52: Herkunft bzw. Ziele der Ein- bzw. Auspendler im Jahr 2010, (Regionalverband FrankfurtRheinMain, 2011).....	64
Abbildung 53: Modal Split des Zielverkehrs in Frankfurt am Main 2004, eigene Darstellung (IBP) auf Datenbasis von (Topp, Skoupil, Kuchler und Partner + Köhler und Taubmann GmbH , 2004). ....	64
Abbildung 54: Verteilung der CO <sub>2</sub> -Emissionen im Verkehrssektor nach Verkehrsart, eigene Darstellung (IBP) auf Datenbasis (Institut für Energie und Umweltforschung, 2010).....	65
Abbildung 55: Aufteilung der recycelbaren Abfälle (139.393 t) in Frankfurt im Jahr 2013 .....	67
Abbildung 56: Entwicklung der Abfallmenge (1995 – 2013) zur Verwertung und Beseitigung, sowie die Verwertungs-Quote, Quelle: Frankfurter Entsorgung- und Service GmbH.....	67
Abbildung 57: Zusammensetzung des Pro-Kopf-Abfallaufkommens zur Beseitigung und Verwertung in Frankfurt am Main von 2000 bis 2014 .....	68
Abbildung 58: Müllheizkraftwerk Nordweststadt, Quelle: Müllheizkraftwerk Frankfurt. ....	69
Abbildung 59: Logos der Frankfurter Stromsparförderprogramme „Frankfurt spart Strom!“ und „eClub – Energiesparen in Frankfurt“ .....	73
Abbildung 60: Vergleich des durchschnittlichen Stromverbrauchs pro HH von Deutschland mit Frankfurt, eigene Berechnung (IBP).....	74
Abbildung 61: Stromverbrauch nach Anwendung im Haushalt, eigene Berechnung und Darstellung (IBP).....	76
Abbildung 62: Gesamtstromeinsparungen nach Anwendungen im Haushaltssektor, eigene Darstellung (IBP). ....	77
Abbildung 63: Beispieldarstellung der EcoTopTen Liste für Kühlschränke des Öko-Instituts, Quelle: ecotopten.de/prod_kuehlen_prod.php .....	79
Abbildung 64: Einstrahlung und typischer Stromlastgang eines Haushalts im Sommer/Winter, eigene Darstellung (IBP). ....	84
Abbildung 65: Entwicklung der Einspeisevergütung für Dach-PV-Anlagen < 10 kW vs. Entwicklung des Strompreises, eigene Darstellung (IBP). ....	85

Abbildung 66: Lastspitzenverschiebung im Haushalt durch den Einsatz von „Home Manager“, eigene Darstellung (IBP). .....	86
Abbildung 67: Maßnahmen zu Erhöhung der Eigenstromquote in Haushalten mit PV-Anlage durch Verbraucher, eigene Darstellung (IBP). .....	87
Abbildung 68: Verteilung der Leuchttypen nach Sektoren, (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, 2011). .....	89
Abbildung 69: Einsparpotentiale bei der Innenbeleuchtung, eigene Darstellung (IBP) nach (ZVEI, 2012). .....	90
Abbildung 70: Ablaufschema des PDCA-Zyklus für die erfolgreiche Etablierung eines Energiemanagementsystems, eigene Darstellung (IBP). .....	93
Abbildung 71: Strahlungsbilanz extensiv begrüntes Dach, (Berlin, Berlin, & Neubrandenburg, Gebäudekühlung.de).....	95
Abbildung 72: Strahlungsbilanz Bitumendach, (Berlin, Berlin, & Neubrandenburg, Gebäudekühlung.de).....	96
Abbildung 73: begrünte Fassade Physik-Institut der Humboldt-Universität, (Berlin, Berlin, & Neubrandenburg, Institut für Physik in Berlin-Adlershof Stadtökologisches Modellvorhaben).....	99
Abbildung 74: Entwicklung und Szenarien des Stromverbrauchs von Servern und Rechenzentren in Deutschland, (Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gemeinnützige GmbH, 2012). .....	106
Abbildung 75: Warmgang / Kaltgang Konfiguration, (Bitkom, 2008). .....	108
Abbildung 76: Warmgang / Kaltgang Konfiguration mit unerwünschten Bypassen und Rezirkulationen von Luft, (Bitkom, 2008). .....	108
Abbildung 77: Lastprofil von büroähnlichen Betrieben, eigene Darstellung (IBP).....	113
Abbildung 78: Anwendungsbilanz des Energieverbrauchs in der Industrie, Quelle (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2013).....	122
Abbildung 79: Aufteilung nach Verbrauchsanwendung von Motoren, Quelle. EuP Lot 30: Electric Motors and Drives, Task 2: Economic and Market Analysis, 2013 .....	124
Abbildung 80: Marktanteile effizienter Elektromotoren in Europa, (Waide & Brunner, 2011). .....	125
Abbildung 81: Phasen der Energieeffizienzberatung nach (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, IREES GmbH, TU Berlin, 2013).....	127
Abbildung 82: Hemmnisse zur Hebung von Effizienzpotentialen, Quelle: Jörg Meyer, Siemens AG.....	128
Abbildung 83: Einsparpotential in der Chemieindustrie bis zum Jahr 2020 bzw. 2035, Quelle: (Fleiter, Schломann, & Eichhammer, 2013). .....	128

Abbildung 84: Zusammenfassung Stromverbrauch und Einsparpotential von Haushalten, GHD und Industrie in Frankfurt .....	129
Abbildung 85: Gesamtverbrauchsabschätzung nach Landkreisen/Städte, Quelle IWES/KEEA Daten (2014). .....	130
Abbildung 86: Vergleich zwischen 14 Prozent und 25 Prozent Wirkungsgrad, Quelle IWES/KEEA Daten (2014). .....	132
Abbildung 87: Gesamtpotential Photovoltaik nach Landkreisen, Quelle IWES/KEEA Daten (2014). .....	132
Abbildung 88: Windpotential nach Landkreisen, Quelle IWES/KEEA Daten (2014). .....	133
Abbildung 89: Elektrisches Potential der Biomasse in den Landkreisen, Quelle IWES/KEEA-Daten (2014). .....	134
Abbildung 90: Vergleich der Stromverbräuche 2010 und 2050 für Frankfurt und der Region und deren EE-Potentiale, eigene Darstellung auf Grundlage von KEEA/Iwes Daten (2014). .....	135
Abbildung 91: Auszug des Solarkatasters der Stadt Frankfurt, Bockenheim. ....	138
Abbildung 92: Entwicklung und Verteilung der Fördergelder des BMU für erneuerbare Energien von 2006 bis 2012, (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 2013). .....	140
Abbildung 93: Theoretische Leistungszahl in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke, Quelle (Baumann, 2007). .....	143
Abbildung 94: Hydrogeologische und wasserwirtschaftliche Standortbeurteilung für die Errichtung von Erdwärmesonden in Frankfurt ,Quelle (Geologie, 2012). .....	145
Abbildung 95: Betrieb eines Wärmepumpensystems mit Eispeicher und Solarthermie während der Heizperiode, Bild: Viessmann. ....	146
Abbildung 96: Betrieb eines Wärmepumpensystems mit Eispeicher und Solarthermie während der Sommerperiode, Bild: Viessmann. ....	146
Abbildung 97: Kostenvergleich verschiedener Wärmeerzeuger Quelle (Miara, 2012) .....	149
Abbildung 98: Verdampferplatten zur Wärmegewinnung Quelle (Stadt Bamberg). .....	152
Abbildung 99: Wärmespeicher im Bunker in Hamburg-Wilhelmsburg, Quelle: FAZ. ....	156
Abbildung 100: Entwicklung der jährlich zugebauten und kumulierten Nutzfläche nach Passivhausstandard in Frankfurt am Main, Quelle (Energierferat der Stadt Frankfurt). .....	158

Abbildung 101: Einflussmöglichkeiten und Bedeutung von Barrieren gegen eine energetische Sanierung, eigene Darstellung IBP nach (Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE), Hochschule Lausitz/Senftenberg, 2010). .....	163
Abbildung 102: Einteilung des Heizwärmebedarfs in dämmbare, nicht dämmbare Zonen und Zonen mit Dämmrestriktionen), Quelle: (Jochum & Mellwig, 2012). .....	169
Abbildung 103: Heizungsbestand in Frankfurt am Main, Quelle (Schornsteinfegerdaten FRANKFURT 2010). .....	175
Abbildung 104: Altersstruktur des Heizungsbestands der Frankfurter Haushalte, Quelle (Schornsteinfegerdaten FRANKFURT 2010). .....	175
Abbildung 105: Aufteilung des (a) Fernwärme- und (b) Ferndampfbezugs nach Sektoren für die Jahre 1995, 2005, 2008, 2009 und 2010, eigene Darstellung (IBP) nach (ifeu 2011). .....	181
Abbildung 106: Übersicht Fernwärme-Ausbau in Frankfurt am Main, (Mainova AG 2014). .....	183
Abbildung 107: Definition der Fernwärme der 1. – 4. Generation hinsichtlich ihrer Versorgungstemperaturen (Dalla Rosa, 2012). .....	186
Abbildung 108: Vollkostenvergleich dezentraler Heizsysteme mit der Fernwärme im Neubau, (Stadtwerke Flensburg GmbH, 2012). .....	190
Abbildung 109: Angepasste Energieversorgung mit Quellen unterschiedlicher Qualitätsstufen für ein Gebäude mit Nutzungen in unterschiedlichen Qualitätsstufen, Quelle: (VTT Technical Research Centre of Finland). .....	191
Abbildung 110: Kaskadierung eines Wärmestroms nach einem KWK-Prozess oder Industrieprozess, eigene Darstellung (IBP). .....	191
Abbildung 111: Schematische Darstellung des Kombikraftwerks in Braedstrup, Dänemark, Quelle: (IEA SHC).]. .....	200
Abbildung 112: Temperaturprofil Frankfurt Innenstadt, Quelle: (Rumorh, 2013). .....	202
Abbildung 113: Links: Gelita AG in Göppingen, Deutschland (Gelita AG)]; Rechts: Gasmotor-Wärmepumpe, Quelle: (ASUE). .....	207
Abbildung 114: Nachträgliche Installation von Wärmetauschern in bestehende Kanalsysteme, Quelle (Bundesverband WärmePumpen e.V., 2005). .....	207
Abbildung 115: Integration von Wärmetauschern im Kanal (Neubauten, Erneuerungen), Quelle (Bundesverband WärmePumpen e.V., 2005). .....	208
Abbildung 116: Funktionsprinzip von Power to Gas und Nutzungsmöglichkeiten, Quelle (Deutsche Energie Agentur, 2013). .....	211
Abbildung 117: Potential zur Nutzung solarer Prozesswärme verschiedener Wirtschaftszweige, Quelle: (C. Lauterbach, 2011) .....	215

Abbildung 118: Dämmmaterial aus Meeresgras, Quelle (NeptunTherm 2014). .....	219
Abbildung 119: mögliche Korridore für Radschnellwege nach Frankfurt am Main (Pretsch, 2013). .....	224
Abbildung 120: Entwicklung der Marktanteile elektrischer Fahrräder, (Clausnitzer B. G., 2012). .....	225
Abbildung 121: Potentielles Einzugsgebiet für den Einsatz von Pedelecs und E- Bikes auf Schnellfahrradwegen in Frankfurt, eigene Darstellung (IBP) auf Datenbasis (Regionalverband FrankfurtRheinMain, 2011). .....	226
Abbildung 122: Modell für die Umsetzung eines Bike-towers, (Menn, Kamp, & Busch, 2011). .....	227
Abbildung 123: Fahrradschnellweg in Zwolle, (Falkowski, 2014). .....	228
Abbildung 124: Straßenschild für „Grüne Welle,“ (Bundesministerium für Verkehr und und digitale Infrastruktur, 2013). .....	229
Abbildung 125: Modal Split Lokal-, Quell und Zielverkehr in Frankfurt, eigene Darstellung (IBP) nach (Institut für Energie und Umweltforschung, 2010). ..	233
Abbildung 126: Wachstumsraten , (Bundesverband Carsharing, 2014). .....	240
Abbildung 127: AutoTram® und AutoTram® Extra Grand, (Fraunhofer IVI). .....	244
Abbildung 128: Fahrleitungsloser Elektrobus mit ultra-schnellen Ladestationen, (ABB, 2013). .....	245
Abbildung 129: Velo City von Chris Hardwicke, Bildquellen: Velo City unter Creative Commons Lizenz. .....	250
Abbildung 130: Die Cykleslangen im Kopenhagener Hafen. (Copyright: DISSING+WEITLING architecture a/s) .....	250
Abbildung 131: Entwicklung Pkw- und eMobile- Dichte pro 1.000 Einwohner bis 2050 (Referenzszenario), eigene Darstellung (IBP). .....	255
Abbildung 132: Entwicklung des Fahrzeugmix in Frankfurt bis 2050 (Referenzszenario), eigene Darstellung (IBP). .....	255
Abbildung 133: Entwicklung des Endenergieeinsatzes im MIV bis 2050 (Referenzszenario) nach Energieträger, eigene Darstellung (IBP). .....	257
Abbildung 134: Entwicklung des Busflottenmix bis 2050 (Referenzszenario), eigene Darstellung (IBP). .....	258
Abbildung 135: Entwicklung des Endenergieeinsatzes im ÖPNV (Referenzszenario), eigene Darstellung (IBP). .....	259
Abbildung 136: Entwicklung der Marktanteile von LNF und Lkw in Frankfurt (Referenzszenario), eigene Darstellung (IBP). .....	260

Abbildung 137: Entwicklung des Endenergieverbrauchs der LNF und der Lkw bis 2050 nach Energieträger (Referenzszenario), eigene Darstellung (IBP). ..	260
Abbildung 138: Veränderung des Modal Splits im Referenzszenario 2050 gegenüber 2010, eigene Darstellung (IBP).....	261
Abbildung 139: Modal Split lokaler Personenverkehr im Jahr 2050 (Referenzszenario), eigene Darstellung (IBP). .....	262
Abbildung 140: Modal Split Zielverkehr im Jahr 2050 (Referenzszenario), eigene Darstellung (IBP).....	262
Abbildung 141: Entwicklung Pkw- und E-Mobile- Dichte pro 1.000 Einwohner bis 2050 (Maßnahmenszenario), eigene Darstellung (IBP). .....	263
Abbildung 142: Anstieg der Carsharing-Dichte je 1.000 Einwohner bis 2050 (Maßnahmenszenario), eigene Darstellung (IBP). .....	264
Abbildung 143: Entwicklung des Fahrzeugmix in Frankfurt bis 2050 (Maßnahmenszenario), eigene Darstellung (IBP). .....	265
Abbildung 144: Entwicklung des Endenergieeinsatzes bis 2050 im Sektor MIV nach Energieträger (Maßnahmenszenario), eigene Darstellung (IBP).....	266
Abbildung 145: Entwicklung des Busflottenmix bis 2050 (Maßnahmenszenario), eigene Darstellung (IBP). .....	267
Abbildung 146: Entwicklung des Endenergieeinsatzes im ÖPNV (Maßnahmenszenario), eigene Darstellung (IBP). .....	268
Abbildung 147: Entwicklung der Marktanteile von LNF (links) und Lkw (rechts) in Frankfurt (Referenzszenario), eigene Darstellung (IBP).....	269
Abbildung 148: Entwicklung des Endenergieverbrauchs der LNF und der Lkw bis 2050 nach Energieträger (Maßnahmenszenario), eigene Darstellung (IBP). .....	269
Abbildung 149: Veränderung des Modal Splits im Maßnahmenszenario 2050 gegenüber 2010, eigene Darstellung (IBP).....	270
Abbildung 150: Modal Split lokaler Personenverkehr im Jahr 2050 (Maßnahmenszenario), eigene Darstellung (IBP). .....	271
Abbildung 151: Modal Split des Zielverkehrs in FRANKFURT im Jahr 2050 (Maßnahmenszenario), eigene Darstellung (IBP). .....	272
Abbildung 152: Gegenüberstellung des Modal Split s der Ausgangssituation im Referenz- und Maßnahmenszenario, eigene Darstellung (IBP). .....	272
Abbildung 153: Effekte der regionalen Wertschöpfung in Frankfurt am Main und dem RheinMainVerbund.....	274
Abbildung 154: Vergleich der Energieausgaben der Stadt Frankfurt am Main für 2010 und 2013 .....	277
Abbildung 155: Zusammensetzung des Strompreises nach (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2013).....	279

Abbildung 156: Zusammensetzung des Gaspreises nach (Bundesnetzagentur, 2014), eigene Darstellung IBP.....	280
Abbildung 157: Ausgaben für Gas und Heizöl 2013 und sein Anteil für Beschaffung und Vertrieb.....	281
Abbildung 158: Vergleich der Stromgestehungskosten erneuerbarer und fossiler Kraftwerke, (Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme, 2013). .	283
Abbildung 159: Amortisationszeit und Rendite eines Solar+Speicher Systems in Deutschland.....	284
Abbildung 160: Entwicklung der Einwohner und Haushalte bis 2050, eigene Darstellung (IBP) nach (Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, 2010) und (Institut für Wohnen und Umwelt, 2013)..	297
Abbildung 161: prognostizierte Flächenentwicklung im GHD-Sektor nach Branchen, eigene Darstellung (IBP).....	298
Abbildung 162: Entwicklung des Strombedarfs in den Sektoren Haushalt, HD und Industrie im Referenzszenario, eigene Darstellung (IBP). .....	299
Abbildung 163: :Strombedarfsentwicklung in den Sektoren Haushalte, Industrie und GHD inkl. Anstieg des Strombedarfs für WP, eigene Berechnung (IBP 2014).....	300
Abbildung 164: Stromanstieg und Stromeinsparungen nach Sektoren, nach Berechnungen des IBP.....	301
Abbildung 165: Entwicklung des Wärmebedarfs im Referenzszenario, eigene Darstellung (Fraunhofer IBP). .....	303
Abbildung 166: Entwicklung des Wärmebedarfs im Maßnahmenszenario, Quelle: Fraunhofer IBP.....	304
Abbildung 167: Entwicklung des Endenergieverbrauchs Nutzergruppen (Referenzszenario), eigene Darstellung (IBP). .....	305
Abbildung 168: Entwicklung des Einsatzes an Endenergie nach Endenergieträger bis 2050, eigene Darstellung (IBP). .....	306
Abbildung 169: Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Sektoren (Maßnahmenszenario), eigene Darstellung (IBP). .....	307
Abbildung 170: Entwicklung des Einsatzes an Endenergie nach Endenergieträger bis 2050, eigene Darstellung (IBP). .....	308
Abbildung 171: Energiesystemmodell für eine Vollversorgung mit erneuerbaren Energien mit Verknüpfung der Energiesektoren Strom, Wärme, Gas, Verkehr.....	312
Abbildung 172: Karte des Regionalverbands FrankfurtRheinMain, .....	314
Abbildung 173: Anteile der Energiequellen am Energiebedarf .....	317
Abbildung 174: Installierte elektrische und thermische Leistung Variante »Stadt mit Bundesland, 10% Stromimport« .....	318

Abbildung 175: Gelieferte elektrische und thermische Energie Variante »Stadt mit Bundesland, 10% Stromimport« .....	318
Abbildung 176: Potenzialausnutzung Variante »Stadt mit Bundesland, 10% Stromimport« .....	318
Abbildung 177: Energiesystemstruktur der Variante »Stadt mit Bundesland, 10% Stromimport« mit Darstellung der Energieerzeuger, -verbraucher und der Energieströme, die Kreisflächen der Ressourcen entsprechen den Beiträgen der Energieerzeuger.....	319
Abbildung 178: Anteile der Energiequellen am Energiebedarf Variante »Stadt mit Bundesland«, Vergleich der Szenarien »Ohne Restriktionen« und »Autarkie« (Strom, Wärme, gesamt).....	321
Abbildung 179: Installierte elektrische Leistung Variante »Stadt mit Bundesland«, Vergleich der Szenarien »Ohne Restriktionen« und »Autarkie« .....	322
Abbildung 180: Installierte thermische Leistung Variante »Stadt mit Bundesland«, Vergleich der Szenarien »Ohne Restriktionen« und »Autarkie« .....	322
Abbildung 181: Gelieferte elektrische und thermische Energiemenge Variante »Stadt mit Bundesland«, Vergleich der Szenarien »Ohne Restriktionen« und »Autarkie« .....	322
Abbildung 182: Potenzialausnutzung Variante »Stadt mit Bundesland«, Vergleich der Szenarien »Ohne Restriktionen« und »Autarkie« .....	323
Abbildung 183: Anteile der Energiequellen am Energiebedarf Variante »Stadt und Region«, Szenario »Ohne Restriktionen« (Strom, Wärme, gesamt).....	324
Abbildung 184: Installierte elektrische und thermische Leistung Variante »Stadt und Region«, Szenario »Ohne Restriktionen« .....	324
Abbildung 185: Gelieferte elektrische und thermische Energiemenge Variante »Stadt und Region«, Szenario »Ohne Restriktionen« .....	325
Abbildung 186: Potenzialausnutzung Variante »Stadt und Region«, Szenario »Ohne Restriktionen« .....	325
Abbildung 187: Anteile der Energiequellen am Gesamtenergiebedarf Variante »Stadt und Region«, Szenarien »Begrenzung Stromimport«, Vergleich der Eigenstromversorgung zu 70%, 80% und 90% .....	326
Abbildung 188: Anteile der Energiequellen am Strom- und Wärmebedarf Variante »Stadt und Region«, Szenarien »Begrenzung Stromimport«, Vergleich der Eigenstromversorgung zu 70%, 80% und 90% .....	327
Abbildung 189: Installierte elektrische Leistung Variante »Stadt und Region«, Vergleich der Eigenstromversorgung zu 70%, 80% und 90% .....	327
Abbildung 190: Installierte thermische Leistung Variante »Stadt und Region«, Vergleich der Eigenstromversorgung zu 70%, 80% und 90% .....	327

Abbildung 191: Gelieferte Strommenge nach Erzeugern Variante »Stadt und Region«, Vergleich der Eigenstromversorgung zu 70%, 80% und 90%....	328
Abbildung 192: Gelieferte Wärmemenge nach Erzeugern Variante »Stadt und Region«, Vergleich der Eigenstromversorgung zu 70%, 80% und 90%....	328
Abbildung 193: Potenzialausnutzung Variante »Stadt und Region«, Vergleich der Eigenstromversorgung zu 70%, 80% und 90% .....	328
Abbildung 194: Anteile der Energiequellen am Energiebedarf Variante »Stadt«, .....	330
Abbildung 195: Installierte elektrische und thermische Leistung Variante »Stadt«, .....	330
Abbildung 196: Gelieferte elektrische und thermische Energiemenge Variante »Stadt«, .....	330
Abbildung 197: Potenzialausnutzung Variante »Stadt«, Szenario »Ohne Restriktionen«.....	331
Abbildung 198: Wärmebedarfsdeckung Variante »Stadt mit Bundesland, 10% Stromimport«, .....	332
Abbildung 199: Wärmebedarfsdeckung Variante »Stadt mit Bundesland, 10% Stromimport«, beispielhafte Darstellung einer Woche im Herbst.....	333
Abbildung 200: Strombedarfsdeckung Variante »Stadt mit Bundesland, 10% Stromimport«, beispielhafte Woche im Frühjahr.....	334
Abbildung 201: Strombedarfsdeckung Variante »Stadt mit Bundesland, 10% Stromimport«, beispielhafte Woche im Herbst .....	335
Abbildung 202: Einsparpotentiale nach Sektoren, eigene Berechnung nach Maßnahmenszenario, IBP. ....	341
Abbildung 203: Stromerzeugungsstruktur im Jahr 2050, eigene Darstellung auf Basis Szenario A „Stadt mit Bundesland“ aus Kommod des Fraunhofer ISE. ....	342
Abbildung 204: Wärmeversorgungsstruktur im Jahr 2050, eigene Darstellung auf Basis Szenario A „Stadt mit Bundesland“ aus Kommod des Fraunhofer ISE. ....	342

## 1 2 Literaturverzeichnis

- FrankfurtRheinMain GmbH . (2015). *FRM United*. Abgerufen am Januar 2015 von <http://www.frm-united.com/wirtschaftsstandort-frankfurtrheinmain/region-frankfurt.html>
- Reneweconomy*. (2014). Abgerufen am 15. November 2014 von <http://reneweconomy.com.au/2014/ubstime-to-join-the-solar-ev-storage-revolution-27742>
- SPD Fraktion*. (2014). Abgerufen am 10. August 2014 von <http://www.spdfraktion.de/themen/stromintensive-unternehmen-weiterhin-bei-eeg-umlage-entlasten>
- ABB. (2013). *ABB*. Abgerufen am 12. Oktober 2013 von <http://www.abb.de/cawp/seitp202/0b082f727585acb4c1257b770032a423.aspx>
- Adolf, J., & Bräuninger, M. (2012). Energiewende im wohnungssektor - Fakten, Trends und Realisierungsmöglichkeiten. *Wirtschaftsdienst Heft 3*, 185-192.
- Agricola, A.-C., Radgen, P., & Zelinger, M. (2005). *Druckluft Abschlussbericht*. Frankfurt am Main: VDMA.
- Ahrens, G.-A., Aurich, T., Thomas Böhmer, J. K., & Pitrone, A. (2010). *Interdependenzen zwischen Fahrrad- und ÖPNV Nutzung - Analysen, Strategien und Maßnahmen einer integrierten Förderung in Städten*. Dresden: TU Dresden.
- Ahrens, P. D.-A. (2013). *Integrierter ÖPNV - Kern des Umwelt- und Mobilitätsverbundes der Zukunft*. Dresden.
- Allgemeiner Deutscher Automobil Club. (2010). *ADAC Website*. Abgerufen am 24. 02 2014 von <http://www.adac.de/infotestrat/tanken-kraftstoffe-und-antrieb/kraftstoffpreise/kraftstoff-durchschnittspreise/>
- Allianz für Gebäude-Energie-Effizienz. (2011). *Baulinks*. Abgerufen am 12. November 2013 von <http://www.baulinks.de/webplugin/2011/1964.php4>
- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (2013). *Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2010 und 2011*. Berlin: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.
- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (2013). *Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2010 und 2011*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.
- Augsten, E. (2013). Das Kombikraftwerk von Braedstrup. *Sonne, Wind und Wärme, Ausgabe 4*.
- BAFA. (2014). *BAFA*. Abgerufen am 10. September 2014 von [http://www.bafa.de/bafa/de/energie/erneuerbare\\_energien/](http://www.bafa.de/bafa/de/energie/erneuerbare_energien/)
- Bahnstadt Heidelberg. (2007). *Baugebiet Bahnstadt in Heidelberg - Städtisches Energie- und Wärmeversorgungskonzept*. Heidelberg: Stadtplanungsamt und Amt für Umweltschutz, Gewerbeaufsicht und Energie der Stadt Heidelberg.

- Bäker, P. D.-I. (2010). *Elektromobilität der nächsten Generation - Vision einer nachhaltigen Elektromobilität der Zukunft*. Dresden: TU Dresden.
- Barthel, K. e. (2012). *Zukunft der deutschen Automobilindustrie*. Bonn: Abteilung Wirtschafts- und Sozialpolitik der Friedrich-Ebert-Stiftung.
- Baumann, M. L.-J. (2007). *Wärmepumpen - Heizen mit Umweltenergie*. Karlsruhe: Solarpraxis AG.
- BDEW. (2013). *Endenergieverbrauch in Deutschland nach Verbrauchergruppen Zehn-Jahres-Vergleich*. Berlin: Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft.
- BDEW. (2014). *BDEW-Strompreisanalyse Juni 2014*. Berlin: Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
- Berlin, T., Berlin, H., & Neubrandenburg, H. (kein Datum). *Institut für Physik in Berlin-Adlershof Stadtökologisches Modellvorhaben*. Berlin: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung.
- Bertocchi, T. (2009). *Einsatzbereiche von ÖPNV-Bedienungsformen im ländlichen Raum*. Kassel: Insitut für Verkehrswesen, Universität Kassel.
- Bettervest. (2014). *Bettervest.de*. Abgerufen am 02. September 2014 von <https://bettervest.de/de/content/projekte/projekt-anlegen>
- Bettgenhäuser, K., Boermans, T., Offermann, M., Krechting, A., & Becker, D. (2011). *Klimaschutz durch Reduzierung des Energiebedarfs für die Gebäudekühlung*. Dessau: Umweltbundesamt.
- Bitkom. (2010). *Energieeffizienz in Rechenzentrum - Leitfaden zur Planung, zur Modernisierung und zum Betrieb von Rechenzentren Band 2*. Berlin: Bundesverband für Informationswirtschaft.
- Bluewien Gesa AG. (2011). *RIWIS Report Frankfurt (Main) - Gesamtreport, Stand: Q1/2011*. Frankfurt am Main.
- Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gemeinnützige GmbH. (2012). *Energieverbrauch und Energiekosten von Servern und Rechenzentren in Deutschland - Aktuelle Trends und Einsparpotenziale bis 2015*. Berlin: Borderstep Institut.
- Bozen, G. (2010). *Gemeinde Bozen*. Abgerufen am 12. Oktober 2013 von [http://www.gemeinde.bozen.it/mobilita\\_context02.jsp?ID\\_LINK=3198&page=2&area=122](http://www.gemeinde.bozen.it/mobilita_context02.jsp?ID_LINK=3198&page=2&area=122)
- Bremer Energie Institut. (2011). *Der energetische Sanierungsbedarf un der Neubaubedarf von Gebäuden der kommunalen und sozialen Infrastruktur*. Bremen: Bremer Energie Institut.
- Buck, C. (2009). Rechenzentren beheizen Schwimmbäder. *Handelsblatt*.
- BUND. (2010). *Steigerung der Stromeffizienz: Instrumenten-Mix mit Effizienzfonds*. Berlin: Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland.
- Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. (2010). *Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1.BImSchV)*. Berlin: Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz.

- Bundesministerium für Umwel, Naturschutz und Reaktorsicherheit. (2009). *Energieeffiziente Rechenzentren - Best-Practice-Beispiele aus Europa, USA und Asien*. 2009: BMU.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. (07. 08 2013). *Fahrradportal*. Abgerufen am 21. 11 2013 von <http://www.nationaler-radverkehrsplan.de/neuigkeiten/news.php?id=4113>
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2012). *Flächenentwicklung Einzelhandel 1980 - 2011*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2013). *Zahlen, Fakten und Energiedaten*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Bitkom. (2014). *Energieeinsparung in Rechenzentren - Nutzung der Abwärme*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, BMWi. (2014). *Die EEG Reform - Photovoltaik*. Berlin: BMWi.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. (2013). *Bundesbericht Energieforschung 2013*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.
- Bundesnetzagentur. (09. 01 2014). [www.bundesnetzagentur.de](http://www.bundesnetzagentur.de). Abgerufen am 05. 11 2014 von <http://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Verbraucher/PreiseRechnTarife/preiseundRechnungen-node.html>
- Bundesverband Carsharing. (27. 02 2014). *Jahresbericht 2013/2014*. Berlin: Bundesverband CarSharing e.V.
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft. (2010). *Energieverbrauch im Haushalt*. Berlin: BDEW.
- Bundesverband WärmePumpen e.V. (2005). *Heizen und Kühlen mit Abwasser - Ratgeber für den Bauherren und Kommunen*. München: Bundesverband WärmePumpe E.V.
- Büttner, J. e. (2011). *Optimising Bike Sharing in European Cities - Ein Handbuch*. OBIS-Projekt.
- C. Lauterbach, B. S. (2011). *Das Potential solarer Prozesswärme in Deutschland*. Kassel: Universität Kassel.
- CDU Hessen und Bündnis 90/Die Grünen Hessen. (2013). *Koalitionsvertrag zwischen der CDU Hessen und Bündnis 90/Die Grünen Hessen - Verlässlich gestalten - Perspektiven eröffnen, Hessen 2014 bis 2019*. Wiesbaden: CDU Hessen und Bündnis 90/Die Grünen Hessen.
- Center for Corporate Responsibility and Sustainability an der Universität Zürich. (2013). *Lösungsansätze zum Abbau von Hemmnissen für energetische Erneuerungen von Gebäuden*. Zürich: Energieforschung Stadt Zürich.
- Clausnitzer, B. G. (2012). *Elektromobilität und Wohnungswirtschaft*. Bremen: Bremer Energie Institu.
- Clausnitzer, K.-D., Gabriel, J., & Buchmann, M. (2012). *Elektromobilität und Wohnungswirtschaft*. Bremen: Stiftung für Forschungen im Wohnungs- und Siedlungswesen, Berlin.
- co2 online gGmbH. (2013). *Effizient zapfen*. Berlin: CO2-Online.

- Consolar - Solare Energieisysteme GmbH. (2013). *Solaera - Heizen mit Sonne, Luft und Eis*. Frankfurt: Consolar.
- crowdfunding.de. (2014). *Crowdfunding - Das Crowdfunding Informationsportal*. Abgerufen am 01. September 2014 von <http://www.crowdfunding.de/the-beauty-of-crowdfunding/>
- Dalla Rosa, A. (2012). Low-Temperature District Heating for Energy-Efficient Communities. Annex 51, 03.10.2012, Salzburg, Österreich.
- DAT. (2013). *DAT - Report 2013*. München: Springer Verlag.
- DEKRA Automobil GmbH. (2010). *Verkehrssicherheitsreport Motorrad 2010 - Strategien zur Unfallvermeidung auf den Straßen Europas*. Stuttgart: DEKRA Automobil GmbH.
- Dena. (2010). *dena-Sanierungsstudie. Teil 1: Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierung im Mietwohnungsbestand*. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena).
- Dena. (2012). *dena-Sanierungsstudie. Teil 2: Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierung in selbstgenutzten in Wohngebäuden*. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena).
- Destatis. (2008). *Energieverbrauch der privaten Haushalte*. Berlin: Statistisches Bundesamt.
- Deutsche Energie Agentur. (13. Dezember 2011). [www.dena.de](http://www.dena.de). Abgerufen am 12. November 2013 von <http://www.dena.de/presse-medien/pressemitteilungen/deutschland-ist-noch-unsaniert.html>
- Deutsche Energie Agentur. (2012). *Green IT: Potenzial für die Zukunft; Energieeffizienz steigern, Wachstumsmärkte erschließen und Nachhaltigkeit sichern*. Berlin.
- Deutsche Energie Agentur. (2013). *Power to Gas*. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena).
- Deutsche Post DHL. (21. 05 2013). Deutsche Post DHL macht Bonn zur Musterstadt für CO<sub>2</sub>-freie Zustellfahrzeuge. Bonn, NRW, Deutschland.
- Deutsche Umwelthilfe. (2010). *Hintergrundinformation zur Pressekonferenz der Deutschen Umwelthilfe*. Deutsche Umwelthilfe.
- Deutsche Umwelthilfe e.V. (2010). *Freiburg ist "Bundeshauptstadt im Klimaschutz 2010"*. Berlin: Deutsche Umwelthilfe e.V.
- Deutsches Institut für Urbanistik. (2011). *Ökonomische Effekte des Radverkehrs*. Berlin.
- Dezernat für Umwelt und Gesundheit. (2010). *Umweltzone Frankfurt am Main*. Frankfurt: Stadt Frankfurt.
- Diefenbach, N., Cischinsky, H., Rodenfels, M., & Clausnitzer, K.-D. (2010). *Datenbasis Gebäudebestand Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand*. Darmstadt: IWU, BEI.
- Diethelm, N. (2013). *Jalousie ade; Intelligente Fenster helfen beim Energiesparen*. Wirtschafts Woche Green economy.
- Dilba, D. (06. Mai 2011). [heise.de](http://www.heise.de). Abgerufen am 2. Februar 2014 von <http://www.heise.de/tr/artikel/Darf-s-ein-Kilowatt-weniger-sein-1237872.html>

- Doppelmayr. (2013). *Doppelmayr*. Abgerufen am 10. Dezember 2013 von [www.doppelmayr.com](http://www.doppelmayr.com)
- Dr. Brandstätter Sachverständigenbüro. (2008). *Industrielle Abwärmenutzung – Beispiele & Technologien*. Amt der Oö. Landesregierung, Auflage 1, Oktober 2008.
- Dudenhöffer, F. (2013). *Neuwagen-Käufer so alt wie noch nie*. Duisburg/Essen: Car Automotive Research (CAR).
- DVB, VVO, TU Dresden, Stadt Dresden. (2008). *Mobilität in Dresden und Umland - Ergebnisse der Verkehrserhebung*. Dresden.
- Eisheizung-GmbH. (2012). *Eisheizung-GmbH*. Abgerufen am 20. 05 2014 von [http://eisheizung-gmbh.npage.de/get\\_file.php?id=17998254&vnr=603331](http://eisheizung-gmbh.npage.de/get_file.php?id=17998254&vnr=603331)
- EnergieAgentur NRW. (2013). *Energie Agentur NRW*. Abgerufen am 2013. Dezember 11 von <http://www.energieagentur.nrw.de/modernisierung/themen/hocheffizienzpumpen-16349.asp>
- Energiedienstleistungs-Contracting. (2014). *Energiespar-Contracting*. Abgerufen am 02. September 2014 von <http://www.einsparcontracting.eu/praxisbeispiele/1-oeffent-wisag-stadt-sende.php>
- Energien, Agentur für Erneuerbare. (2009). *Regionale Wertschöpfung durch die Nutzung Erneuerbarer Energien*. Berlin: Agentur für Erneuerbare Energien e.V.
- Energierferat der Stadt Frankfurt am Main. (16. Januar 2014). Verkehrsemissionen. eMail vom 16.01.2014.
- Energierferat Frankfurt. (2014). [www.frankfurt.de](http://www.frankfurt.de). Von <https://www.frankfurt.de/sixcms/media.php/738/Fernw%C3%A4rme%20allgemeine%20Informationen.pdf>. abgerufen
- Energierferat Stadt Frankfurt am Main. (2000). *Stromverbrauch und Kosten reduzieren mit modernen Heizungspumpen*. Frankfurt am Main: Energierferat Stadt Frankfurt am Main.
- Entsorgungs- und Service GmbH Frankfurt. (2013). Frankfurt: Stadt Frankfurt.
- Erfert, T. (2014). *SRM Straßenbeleuchtung Rhein-Main GmbH - Grundkennzahlen*. Frankfurt: Straßenbeleuchtung RheinMain.
- EUWID. (2014). [www.euwid-energieeffizienz.de](http://www.euwid-energieeffizienz.de). Abgerufen am 10. 04 2014 von [www.euwid-energieeffizienz.de/news/energieeffizienz-trends/einzelsicht/Artikel/mainova-investiert-in-den-ausbau-der-fernwaerme-in-frankfurt.html](http://www.euwid-energieeffizienz.de/news/energieeffizienz-trends/einzelsicht/Artikel/mainova-investiert-in-den-ausbau-der-fernwaerme-in-frankfurt.html).
- F.A.Z. (2014). Frankfurt stellt ineffiziente Gaslampen auf Strom um. *Frankfurter Allgemeine Zeitung*.
- Falkowski, A. (2014). *Pressemitteilungen*. Bonn.
- Fichnter. (2012). *Evaluierung von Einzelmaßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt (Marktanreizprogramm) für den Zeitraum 2009 bis 2011*. Berlin: Fichnter.
- Fleiter, T., Schломann, B., & Eichhammer, W. (2013). *Energieverbrauch und CO2-Emissionen industrieller Prozesstechnologien - Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente*. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI.

- Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme. (2010). *Der Multifunktions-Wärmespeicher in Hamburg-Bramfeld innovative Erweiterung der ältesten deutschen Solarsiedlung*. Stuttgart: Solites.
- Frankfurter Neue Presse. (2014). *www.fnp.de*. Abgerufen am 10. 04 2014 von <http://www.fnp.de/lokales/frankfurt/Mainova-baut-165-Kilometer-langes-Netz-weiter-aus;art675,150208>.
- Fraunhofer-Institut für Bauphysik. (2014). Aussage von Matthias Drop (Stadtplanungsamt der Stadt Frankfurt am Main). *Workshop Energieversorgung Industrie und GHD vom 27. Mai 2014*. Frankfurt: Energierreferat Frankfurt.
- Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme. (2013). *Stromgestehungskosten Erneuerbarer Energien*. Freiburg: Fraunhofer ISE.
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme. (2014). *Ergebnisbericht - Berechnung zeitlich hochaufgelöster Energieszenarien für eine 100% erneuerbare Energieversorgung der Stadt Frankfurt am Main (KomMod4FFM)*. Freiburg: Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme.
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. (2014). *Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland*. Freiburg : Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE .
- Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung. (2011). *Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2007 bis 2010*. Karlsruhe, München, Nürnberg: BMWI.
- Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, IREES GmbH, TU Berlin. (2013). *Energieverbrauch und CO2-Emissionen industrieller Prozesstechnologien - Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente*. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung.
- Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Institut für Energie- und Umweltforschung, et al. (2011). *Energieeffizienz: Potenziale, volkswirtschaftliche Effekte und innovative Handlungs- und Förderfelder für die Nationale Klimaschutzinitiative*. Heidelberg, Karlsruhe, Berlin, Osnabrück, Freiburg: im Auftrag des BMU.
- Frederiksen, S., & Werner, S. (2013). *District Heating and Cooling*. Professional Pub Serv, Auflage 1, ISBN-10: 9144085303.
- Geologie, H. L. (2012). *Hydrogeologische und wasserwirtschaftliche Standortbeurteilung für die Errichtung von Erdwärmesonden in Hessen Frankfurt*. Wiesbaden: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie.
- Gert Müller-Syring, M. H. (2014). *Wassstofftoleranz der Erdgasinfrastruktur inklusive aller assoziierten Anlagen*. Bonn: Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
- Gesellschaft für Markt- und Absatzforschung. (2009). *unveröffentlichte verwaltungsinterne Fassung der Stadt Frankfurt am Main*. Frankfurt am Main: GMA.

- Gothe, D., & Hahne, U. (2005). *Regionale Wertschöpfung durch Holz-Cluster – Best-PracticBeispiele regionaler Holz-Cluster aus den Bereichen Holzenergie, Holzhaus- und Holzmöbelbau*. Freiburg: Institut für Forstbenutzung und forstliche Arbeitswissenschaft.
- Heise. (16. April 2009). *Heise.de - Nutzung von Serverabwärme für Schwimmbäder*. Abgerufen am 25. Februar 2014 von <http://www.heise.de/newsticker/meldung/Rechenzentrum-beheizt-Wohnungen-213529.html>
- Hellmann, R. e. (2012). *Stromsparkonzept Heidelberg Bahnstadt Sektor Büro*. Heidelberg: Stadt Heidelberg.
- Herman, H. (2012). *Cooler Verbindung - Energieeffizienz einer KWKK-Anlage in Marburg*. Technik hoch 2.
- Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. (2011). *Luftreinhalteplan für den Ballungsraum Rhein-Main - Teilplan Frankfurt am Main*. Wiesbaden.
- Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. (2011). *Luftreinhalteplan für den Ballungsraum Rhein-Main Teilplan Frankfurt am Main*. Wiesbaden.
- Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung. (2010). *Bevölkerungsvorausschätzung für die hessischen Landkreise und kreisfreien Städte*. Wiesbaden: Hessen Agentur.
- Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung. (2011). *Hessische Bauverordnung*. Wiesbaden: Land Hessen.
- Hessen Agentur. (2010). *Bevölkerungsvorausschätzung für die hessischen Landkreise und kresifreien Städte*. Wiesbaden: Land Hessen.
- Hirschl, B., Aretz, A., & al, e. (2010). *Kommunale Wertschöpfung durch Erneuerbare Energien*. Berlin: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung.
- Hochbauamt Frankfurt. (2013). *Geothermie-Anlagen der Stadt Frankfurt a.M.* Frankfurt: Hochbauamt Frankfurt.
- Hochbauamt Stadt Frankfurt am Main Abteilung: Energiemanagement. (2013). *Jahresbericht des Hochbauamtes 2010-2011*. Frankfurt am Main: Hochbau am der Stadt Frankfurt am Main.
- Hoppenbrock, C., & Albrecht, A.-K. (2010). *Diskussionspapier zur Erfassung regionaler Wertschöpfung in 100Prozent-EE-Regionen. Entwicklungsperspektiven für nachhaltige 100Prozent-Erneuerbare-Energie-Regionen*. Kassel: Institut für denzentrale Energiesysteme.
- IEA SHC. (kein Datum). Abgerufen am 11. 04 2014 von <http://task45.iea-shc.org/meeting03>
- IINAS. (kein Datum). *GEMIS*. Abgerufen am 20. 01 2014 von <http://www.iinas.org/downloads-de.html>
- Informationszentrum Mobilfunk e.V. (IZMF). (2014). *Informationszentrum Mobilfunk*. Abgerufen am 10. November 2014 von <http://www.izmf.de/de/content/rohstoffe-im-handy>
- Infraserv Höchst. (2012). *Carbon Footprint von INfraserv Höchst 2011*. Frankfurt: Infraserv.

- Ingenieurgesellschaft Bioschoff und Maaß mbH. (2011). *spezifische Wärmeverbrauchswerte für Gebäude und Baualtersklassen*. Frankfurt: Energierreferat Frankfurt.
- Ingenieurgesellschaft Bischoff und Maaß. (2011). *Teilenergiekonzept Frankfurt am Main westliche Stadtteile und Anlieger*. Offenbach: Energierreferat Frankfurt am Main.
- Institut für Energie- und Umweltforschung. (2011). *Endenergie Frankfurt 2010*. Heidelberg.
- Institut für Energie- und Umweltforschung (Ifeu). (2011). *Energie- und Klimaschutzkonzept für die Stadt Frankfurt am Main*. Heidelberg: Stadt Frankfurt.
- Institut für Energie und Umweltforschung. (2010). *CO2-Berichtssystem Stadt Frankfurt am Main*. Heidelberg: Ifeu.
- Institut für Energie- und Umweltforschung. (2014). *Transformationsstrategien Fernwärme-TRAFO ein Gemeinschaftsprojekt von ifeu-Institut, GEF Ingenieur AG und AGFW*. AGFW, ISBN: 3-89999-038-2.
- Institut für Energie- und Umweltforschung, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien. (2010). *Die Nutzung industrieller Abwärme - technisch-wirtschaftliche Potenziale und energiepolitische Umsetzung*. Heidelberg: Institut für Energie- und Umweltforschung.
- Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE), Hochschule Lausitz/Senftenberg. (2010). *Zum Sanieren motivieren - Eigenheimbesitzer zielgerichtet für eine energetische Sanierung gewinnen*. Berlin: Projektverbund ENEF-Haus.
- Institut für Wohnen und Umwelt. (2003). *Ökologischer Mietspiegel*. Darmstadt: Institut für Wohnen und Umwelt.
- Institut für Wohnen und Umwelt. (2013). *Perspektiven des Wohnungsmarktes in der Metropolregion Frankfurt Rhein-Main*. Darmstadt: Institut für Wohnen und Umwelt.
- Institut für Wohnen und Umwelt. (kein Datum). *Institut für Wohnen und Umwelt*. Abgerufen am 08. 12 2014 von <http://www.iwu.de/?id=166print.htmlprint.html>
- J. Lambauer, U. F. (2008). *Industrielle Großwärmepumpen - Potentiale, Hemmnisse und Best-Practice Beispiele*. Stuttgart: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung.
- Jakob, M. (2008). *Energie-effiziente Erneuerung von Bürobauten: Kosten und Nutzen*. Zürich: ETH Zürich.
- Jochum, P., & Mellwig, P. (2012). *Technische Restriktionen bei der energetischen Modernisierung von Bestandsgebäuden*. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- Jones Lang LaSalle. (2011). *Frankfurt Office Market Profile - Q2 2011*. Frankfurt am Main.
- Jörg Meyer, S. A. (2013). *Energieeffizienz-Potentiale und Umsetzungshemmnisse im Bereich Industrie*. München: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Erste Fachveranstaltung am 07.06.2013.
- Kaltschmitt, M., Wiese, A., & Streicher, W. (2006). *Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. Springer Verlag, Berlin. 4. Auflage. ISBN: 3-540-28204-1.

- Kane, C. (kein Datum). *Collaborative Distribution*. Abgerufen am 22. August 2014 von <http://www.kaneisable.com>:  
<http://www.kaneisable.com/sites/default/files/collaborativedistribution.pdf>
- KEEA, Fraunhofer IWES. (2014). *Entwurf Endbericht Regionales Energiekonzept: "Frankfurt Rhein Main 100% effizient und erneuerbar" (Stand 5.5.14)*.
- KEEA, Fraunhofer-Institut für Wind- und Energiesysteme. (2014). *Entwurf des Endberichts: Regionales Energiekonzept: "Frankfurt Rhein Main 100% effizient und erneuerbar"*. Kassel.
- Kern, J. (25. 09 2012). *E-Busse: Wien setzt die Öffis unter Strom*. Abgerufen am 04. 11 2013 von Clean Energy Project: <http://www.cleanenergy-project.de/mobilitaet/item/5232-wien-pioniere-der-e-mobility>
- Klima- und Energieeffizienz Agentur (KEEA). (2013). *KEEA Tool*. Kassel: Klima- und Energieeffizienz Agentur.
- Klima- und Energieeffizienz Agentur (KEEA). (2014). *KEEA Tool*. Kassel: Klima- und Energieeffizienz Agentur.
- Klima und Energieeffizienz Agentur, KEEA. (2014). *KEEA Tool*. Kassel: KEEA.
- Kohler, S. e. (2013). *Energieeffizienz als Säule der Energiewende*. Energiewirtschaftliche Tagesfragen.
- Köller, S. (24. 01 2011). ADAC zertifiziert Umwelttaxis in Frankfurt. Frankfurt, Hessen, Deutschland.
- Kreditanstalt für Wiederaufbau KfW Bankengruppe. (2013). *Jährliche Analyse zur Struktur und Entwicklung des Mittelstands in Deutschland*. Frankfurt: Kreditanstalt für Wiederaufbau KfW Bankengruppe.
- Küchler, S., & Nestle, U. (2012). *Strategien zur Modernisierung I: Neue Finanzierungsmodelle für einen klimaneutralen Gebäudebestand*. Berlin: Heinrich-Böll-Stiftung.
- Kulterer, K. (2013). *Ergebnisse Monitoringleitfaden zur Umsetzung von energieeffizienten Motorsystemen*. Österreichische Energieagentur.
- Land Hessen. (2005). *Bekanntmachung der Neufassung der Hessischen Gemeindeordnung (HGO)*. Wiesbaden: Land Hessen.
- Leipziger Institut für Energie GmbH. (2013). *Windgasprojekt in Nordfriesland Nord - Machbarkeitsstudie zur Gewinnung von Methan aus erneuerbaren Energien*. Leck: LAG AktivRegion Nordfriesland Nord e.V.
- Limbourg, M. (2012). Tempo 30 in allen Städten und Gemeinden. *Der Tagesspiegel*.
- Maaß, J. B., Walther, C., & Peters, I. (2008). *Erfahrungen mit Passivhaussiedlungen in Deutschland*. Hamburg: Hafen City University Hamburg.
- Mainova AG. (2010). *Strom und Wärme aus Frankfurt am Main*. Energieversorgung Rhein-Main.
- Mainova AG. (2012). *Nachhaltigkeitsbericht*. Frankfurt: Mainova AG.

- Mainova AG. (2013). *Der digitale Pulsschlag der Region*. Frankfurt: Mainova AG.
- Mainova AG. (2013). *Kennzahlen zum Nachhaltigkeitsbericht 2012*. Frankfurt am Main: Mainova AG.
- Mainova AG. (2013). *Pressemitteilung*. Frankfurt am Main: Mainova AG.
- Mainova AG. (2014). *MHKW Frankfurt*. Abgerufen am 15. November 2014 von <http://mhkw-frankfurt.de/betrieb/historie/betrieb.html>
- Mainova AG. (kein Datum). *Technische Anschlussbedingungen Heizwasser (TAB-HW)*. Frankfurt: Mainova AG.
- Makowski, E. (2014). *Der Letzte macht das Gaslicht aus!* Frankfurt: Frankfurter Allgemeine Zeitung .
- Management, E. P. (2013). Abgerufen am 10. Oktober 2013 von <http://www.epomm.eu/tems/index.phtml>
- Marquardt, V. (2013). *Meer Gras, weniger Heizkosten*. Brandeis.
- Menn, A. (2013). *Innovation: Dusche recycelt Wasser und spart Strom*. Wirtschaftswoche Green Economy.
- Menn, A., Kamp, A., & Busch, M. (2011). *Verkehrsmittel der Zukunft*. Wirtschaftswoche.
- Miara, M. (2012). *Wärmepumpen Heizen - Kühlen - Umweltenergie nutzen*. Stuttgart: Fraunhofer IBR.
- Mobilitätsreferat der Stadt Frankfurt am Main. (2013). *CO2-Bereichtssystem der Stadt Frankfurt am Main*. Frankfurt: Stadt Frankfurt.
- Nabe, C., Hasche, B., Offermann, M., Papaefthymiou, G., Seefeldt, F., Thamling, N., et al. (2011). *Potenziale der Wärmepumpe zum Lastmanagement im Strommarkt und zur Netzintegration erneuerbarer energien*. Ecofys.
- NAI Apollo Group. (2013). *Büromarkt Frankfurt am Main*. Frankfurt: NAI Apollo Group.
- Nick. (04. 02 2014). *Carsharing News*. Abgerufen am 04. 04 2014 von <http://www.carsharing-news.de/stadtverwaltung-frankfurt-carsharing/>
- Nitsch, J. P. (2012). *Leitstudie 2011 - Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global*. Stuttgart: DLR, IWES, IFNE.
- Offenbacher Repair Cafe. (2014). *Offenbacher Repair Cafe*. Abgerufen am 05. November 2014 von <http://repair-cafe-offenbach.de/>
- Öko-Insitut e.V., Prognos AG. (2009). *Modell Deutschland, Klimaschutz bis 2050*. Frankfurt am Main: Word Wide Fund For Nature.
- Öko-Institut e.V. (2013). *Konzepte für die Beseitigung rechtlicher Hemmnisse des Klimaschutzes im Gebäudebereich*. Berlin: Umweltbundesamt.
- Paul, M. (2012). *Energiemanagementsysteme - ein Überblick "Systematisches Energiemanagement in Unternehmen"*. Hamburg.

- Pfafferott, J. (2013). *Passive Kühlung mit Nachtlüftung*. Bonn: Bine Informationsdienst.
- Plötz, P., & Eichhammer, W. (2011). *Zukunftsmarkt Effiziente Elektromotoren*. Karlsruhe: Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, BMU.
- Pohl, C., & Hesselbach, J. (2011). *Substitution von Druckluft in der Produktion*. Kassel: Universität Kassel.
- Prediger, N. (2011). *Instrumente und Finanzierungsmodelle zur Stärkung des Einzelhandels in Stadtteilzentren*. Hamburg: Diplomica Verlag.
- Pretsch, H. (2013). *Radschnellwege*. Frankfurt am Main: Regionalverband Frankfurt RheinMain.
- Pro Klima . (2014). *ProKlima Hannover*. Abgerufen am 20. August 2014 von [http://www.proklima-hannover.de/ueber\\_proklima/](http://www.proklima-hannover.de/ueber_proklima/)
- ProKlima. (2013). *Ihre Energie Effizient eingesetzt*. Hannover.
- Raatz, A. (2011). *Regionalökonomische Chancen und Effekte von Anlagen zur Nutzung regenerativer Energien*. Kassel: MUT Energiesysteme.
- Rasmussen, N. (2011). *Electrical Efficiency Measurement for Data Centers - White Paper 154*. Schneider Electric - Data Center Science Center.
- Rau, A., & Baron, S. (2013). *Carsharing - Verbesserung der Rahmenbedingungen in der Region Frankfurt am Main*. Frankfurt: Institut für Mobilität & Verkehr.
- Referat Mobilitäts- und Verkehrsplanung . (2014). *Mobilitätsstrategie Frankfurt am Main- Meilenstein I - Aktuelle Situation und zukünftige Herausforderungen*. Frankfurt am Main: Referat Mobilitäts- und Verkehrsplanung.
- Regionalverband FrankfurtRheinMain. (2011). *Regionales Monitoring 2011 - Daten und Fakten*. Frankfurt: Regionalverband FrankfurtRheinMain.
- Reutes, A. D. (20. 07 2013). *Auto Revue*. Abgerufen am 07. Mai 2014 von <http://www.autorevue.at/alternative-mobilitat/norwegen-elektroauto-boom-forderung.html>
- Rhein-Main Biokompost GmbH. (2013). *Die Bioabfallbehandlungsanlage*. Frankfurt: Rhein-Main Biokompost GmbH.
- Rhein-Main-Verkehrsbund. (2014). *RMV*. Abgerufen am 24. 02 2014 von [http://www.rmv.de/de/Linien\\_und\\_Netze/Streckennetz/Liniennetzplaene/464/RMV-Liniennetzplaene.html](http://www.rmv.de/de/Linien_und_Netze/Streckennetz/Liniennetzplaene/464/RMV-Liniennetzplaene.html)
- RheinMainVerkehrsverbund. (2012). *Weichenstellung für intelligente Mobilität*. Hofheim a. Ts.: RheinMainVerkehrsverbund GmbH.
- Riesenbichler, Rene. (2009). *Energieeffizienzsteigerung durch standardisierte Energieaudits in Industrie und produzierendem Gewerbe*. Wien: WINenergy.
- Roß, D. A. (2013). *Das Netz für die Netze – Versorgungsinfrastrukturen in Frankfurt*. Frankfurt am Main : Netzdienste Rhein-Main.

- Rumorh, S. (2013). Wärmeanomalie im Mitteltiefen Untergrund von Frankfurt am Main - neue Erkenntnisse und Chancen. 8. Tiefengeothermie-Forum, Darmstadt, 01.10.2013.
- Schlesiger, C. (15. Oktober 2012). [www.wiwo.de](http://www.wiwo.de). Abgerufen am 18. Oktober 2013 von <http://www.wiwo.de/technologie/auto/carsharing-markt-die-oekos-schlagen-zurueck-seite-all/7245234-all.html>
- Schlomann, B., Kleeberger, H., & al., e. (2011). *Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland*. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Base-Ing, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Insitut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien.
- Schneider, A. (2013). *Einfluss des Mikroklimas auf das energetische und thermische Verhalten von Gebäuden*. Kassel: Kassel University Press.
- Schneider, B. (2007). *Die nächste Revolution startet in Paris: Das Fahrradverleihsystem Velib*.
- SEF Stadtentwässerung Frankfurt am Main. (2015). *Stadtentwaesserung Frankfurt*. Abgerufen am 05. Februar 2015 von <http://www.stadtentwaesserung-frankfurt.de/index.php/anlagen/kanalnetz/125-die-adern-frankfurts.html>
- Siemens. (2009). *Energieeffiziente Antriebe - Answers for Industry*. Siemens.
- Siemens. (2013). *Chancen für die deutsch Energiewende - Was kann Deutschland aus ausgewählten internationalen Fallbeispielen lernen?* München.
- Sinnesbilcher H, e. a. (2010). *Dezentrale Heizungspumpen - Vergleichsmessung an einem konventionellen Heizsystem und einem System mit dezentralen Pumpen*. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP).
- Sorge, N.-V. (2013). *Spiegel Online*. Abgerufen am 26. Oktober 2013 von <http://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/batteriebusse-aus-china-haengen-deutsche-bushersteller-ab-a-840795.html>
- Springer. (03. Juni 2013). Abgerufen am 24. 10 2013 von Springer: <http://www.springerprofessional.de/abb-praesentiert-neue-schnellladetechnik-fuer-elektrobusse/4444726.html>
- Stadt Arnsberg. (2013). Abgerufen am 10. Oktober 2013 von <http://www.mein-elektroIn Arnsberg können Elektroautos und andere umweltfreundliche Autos kostenlos parken>
- Stadt Bamberg*. (kein Datum). Abgerufen am 17. 1 2014 von [https://www.stadt.bamberg.de/media/custom/1829\\_508\\_1.PDF?1297691402](https://www.stadt.bamberg.de/media/custom/1829_508_1.PDF?1297691402)
- Stadt Frankfurt. (2011). *Statistisches Jahrbuch*. Frankfurt: Stadt Frankfurt.
- Stadt Frankfurt a.M., D. f. (2010). *Umweltzone Frankfurt am Main*. Frankfurt.
- Stadt Frankfurt am Main - Dezernat Umwelt und Gesundheit. (09. 12 2014). [www.frankfurt-greencity.de](http://www.frankfurt-greencity.de). Abgerufen am 09. 12 2014 von <http://www.frankfurt-greencity.de/umwelt-frankfurt/frankfurts-trinkwasser/abwasser/>

- Stadt Frankfurt am Main - Hochbauamt Energiemanagement. (2015). Abgerufen am 05. Februar 2015 von <http://www.energiemanagement.stadt-frankfurt.de/>
- Stadtwerke Bonn. (2013). *Stadtwerke Bonn*. Abgerufen am 11. Oktober 2013 von <http://www.swb-busundbahn.de/bus-und-bahn/unternehmen/projekte-der-sw-bus-und-bahn/elektromobilitaet-fuer-bonn.html>
- Stadtwerke Flensburg GmbH. (2012). *Wärmstens zu empfehlen - unsere Fernwärme*. Flensburg: Stadtwerke Flensburg GmbH.
- Stadtwerke Münster. (Februar 2014). *Stadtwerke Münster*. Von [www.stadtwerke-muenster.de/presse/pressemeldungen/gesamt/nachricht/artikel/stadtwerke-holen-ersten-elektrobus-nach-muenster.html](http://www.stadtwerke-muenster.de/presse/pressemeldungen/gesamt/nachricht/artikel/stadtwerke-holen-ersten-elektrobus-nach-muenster.html) abgerufen
- Stadtwerke Tübingen. (2010). *Energiesparen im Haushalt*. Stuttgart: Ministerium für Umwelt , Klima und Energiewirtschaft.
- Statistisches Bundesamt. (2011). *Bevölkerung und Erwerbstätigkeit - Entwicklung der Privathaushalte bis 2030*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- Sydlik, P. (2012). *Innovation neu denken! "Analyse von Synergien und Konflikten in der Umsetzung von Elektromobilität"*. Grin Verlag.
- Syna. (2013). *Syna*. Abgerufen am 21. 01 2014 von [gmbh/downloads/stromnetz/KonzessionsgebieteStrom-Syna-01.2013.xlsx](http://www.syna-gmbh.com/downloads/stromnetz/KonzessionsgebieteStrom-Syna-01.2013.xlsx)
- Topp, Skoupil, Kuchler und Partner + Köhler und Taubmann GmbH . (2004). *Gesamtverkehrsplan Frankfurt am Main*. Frankfurt: Stadt Frankfurt.
- Transit of London. (2010). *Cycling Revolution London*. London: Stadt London.
- Umweltbundesamt. (2010). *2050: 100% - Klimaziel 2050*. Berlin: Umweltbundesamt.
- Umweltreferat Frankfurt. (1997). *Lärm- und Luftbelastung in Frankfurt am Main*. Frankfurt: Stadt Frankfurt.
- Unger, F. (2013). *Frankfurt spart Strom für Unternehmen*. Frankfurt: Energiereferat der Stadt Frankfurt am Main.
- Verkehrsamt Frankfurt a.M. (2014). *Mobilitätsstrategie Frankfurt am Main - Meilensteine I*. Frankfurt: Stadt Frankfurt.
- Verkehrsclub Deutschland. (2010). *Elektrofahrräder*. Berlin: VCD.
- VGF. (2010). *Hybridbusse: Erste Erfahrungen in Frankfurt am Main*. Abgerufen am 24. 10 2013 von <http://www.frankfurtemobil.de/24-0-vgf.htm>
- Viessmann AG. (2013). *TopTechnik - Effizienter Eigenverbrauch von Solarstrom*. Allendorf (Eder): Viessmann AG.
- Voss, K., & Bernard, S. (2012). *Energieverbrauch in der Hotellerie*. Wuppertal: DBZ Spezial.

- Voß, M. (2011). *Wärme aus Kapillaren*. Berlin: Verband Deutscher Grundstücksnutzer.
- VTT Technical Research Centre of Finland. (kein Datum).
- Wagner, C. (11. 07 2013). E-Force One: Elektro-Lkw feiert seine Weltpremiere in der Schweiz. *Motorvision*.
- Waide, P., & Brunner, C. U. (2011). *Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems - Working Paper*. Paris: International Energieagentur.
- Wallner Energietechnik GmbH & Vobiscon. (kein Datum). *Wirtschaftsverkehr 21*. Abgerufen am 20. 02 2014 von <http://wirtschaftsverkehr21.de/fahrzeuge/paketdienst/>
- Wilo. (2010). *Wilo - Geniex Preisliste 2010*. Dortmund: Wilo.
- Wilo. (2011). *Genial dezentral - Geniex Wilo Systembroschüre*. Dortmund: Wilo SE.
- Wirths. (2008). *Einfluss der Netzrücklaufemperatur auf die Effizienz von Fernwärmesystemen*. 13. Dresdner Fernwärmekolloquium, 23.-24. September 2008.
- Wirtschaftsförderung Frankfurt GmbH - Kompetenzzentrum Logistik & Mobilität . (2013). *Elektromobilität im Jahr 2025 in Frankfurt am Main - Vision und Strategie*. Frankfurt am Main.
- Wirtschaftswoche. (2. September 2013). *Mobilitätsranking - Karlsruhe ist Deutschlands Carsharing Hauptstadt*. Abgerufen am 28. Oktober 2013 von <http://www.wiwo.de/technologie/auto/mobilitaetsranking-karlsruhe-ist-deutschlands-carsharing-hauptstadt/8728220.html#image>
- Wöhe, H. (11. 02 2014). *Drive World - Urbane Mobilität*. Abgerufen am 27. 02 2014 von [http://www.google.de/imgres?start=84&sa=X&biw=1920&bih=976&tbm=isch&tbnid=i0U9f2AFXYeKuM%3A&imgrefurl=http%3A%2F%2Fwww.driveworld.de%2Ftag%2Fstadtverkehr-um&docid=0UGRJ5a1\\_-goOM&imgurl=http%3A%2F%2Fwww.driveworld.de%2Fwp%2Fwp-content%2Fuploads%2F2014%2F02](http://www.google.de/imgres?start=84&sa=X&biw=1920&bih=976&tbm=isch&tbnid=i0U9f2AFXYeKuM%3A&imgrefurl=http%3A%2F%2Fwww.driveworld.de%2Ftag%2Fstadtverkehr-um&docid=0UGRJ5a1_-goOM&imgurl=http%3A%2F%2Fwww.driveworld.de%2Fwp%2Fwp-content%2Fuploads%2F2014%2F02)
- Wolff, D. v. (2012). *Einfluss der Verteilverluste bei der energetischen Modernisierung von Mehrfamilienhäusern. analyse und Ableitung von Optimierungsmaßnahmen*. Hannover/Braunschweig/Wolfenbüttel: proKlima enerCity-Fonds.
- Wolfgang, S., Jürgen, G., Bernd, E., & David, B. (2008). *Energieeffizienz als Geschäftsfeld für Stadtwerke*. Bremen: Bremer Energie Institut.
- Workshop Energierferat Frankfurt. (2014). *Bauen, Wohnen, Stadtplanung*. Frankfurt: Energierferat, Fraunhofer IBP.
- Wuppertal Institut. (2005). *Technische-wirtschaftliche Potenziale zur Einsparung von Endenergie*. Wuppertal.
- Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e.V. (2010). *Zahlenspiegel 2010 des deutschen Elektro-Hausgerätemarktes*. Frankfurt: Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e.V.
- Zentrum für Innovative Energiesysteme (ZIES). (2012). *Hybride Wärmeerzeuger als Beitrag zur Systemintegration erneuerbarer Energien*. Düsseldorf: Energiewirtschaftliche Tagesfragen Heft 5.

Zepf, K., Ziegler, R., Zieher, M., & Floß, A. (2012). *Forschungsvorhaben Fernwärmemodellstadt Ulm - EnEff: Wärme - Exergetische Optimierung der Fernwärmeversorgung Ulm*. Abschlussbericht, Förderkennzeichen 0327447A.

Zumkeller, D. (2009). *Mobiles Leben*. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe.

ZVEI. (2012). *Effiziente und innovative Beleuchtung - Potentiale, Beispiele und Trends*. ZVEI.