

**Systemanalyse für die städtische Energieplanung
mit einem modularen Planungsinstrument**
—
methodische Grundlagen und Fallbeispiele

Endbericht

Blesl M.; Stehle M.; Brodecki L.

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart

Groß P.; Grassl, G.; Reiser S.

Drees & Sommer Advanced Building Technologies GmbH

Karajan J.; Christ A.; Müller E.

Karajan Ingenieure

November 2019

Forschungsvorhaben: 03ET4014A, 03ET4014B, 03ET4014C

Eine Initiative des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) im Rahmen
des 6. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter den Förderkennzeichen 03ET4014A, 03ET4014B, 03ET4014C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Systemanalyse für die städtische Energieplanung mit einem modularen Planungsinstrument – methodische Grundlagen und Fallbeispiele

Blesl M.; Stehle M.; Brodecki L.; Groß P.; Grassl G.; Reiser S.; Karajan J.; Christ A.; Müller E.

Zusammenfassung

Klimaerwärmung, demografischer Wandel und nicht zuletzt die Bevölkerungsentwicklung fordern neue Ansätze in der Stadtplanung. Bereits die Planung von nachhaltigen (Einzel-) Gebäuden ist sehr komplex und bedeutet eine große Herausforderung. Die hohen Ansprüche an Ressourceneffizienz und gleichzeitigen Komfort machen Simulationen erforderlich. Um den globalen Entwicklungen spürbar entgegen zu treten, genügt es jedoch nicht, einzelne Gebäude als Leuchtturmobjekte umzusetzen. Zudem scheitert die breite Anwendung bestehender systemanalytischer Instrumente auf der kommunalen Ebene meist an datentechnischen Hindernissen und dem für die Nutzung der Modelle erforderlichen Expertenwissen. So gilt es zukünftig Datenanalyse und -austausch durch geeignete Schnittstellen vereinfacht und die Bedienbarkeit von Modellen zu erleichtern. Für die vielfältigen Rahmenbedingungen vor Ort und die variierenden Planungsaufgaben sind angepasste Werkzeuge erforderlich, die bisher überwiegend von Experten genutzt werden.

Im Rahmen des Projektes, wurden die Möglichkeiten zur Unterstützung von (Städte-)Planern bei Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen untersucht. Die Zielsetzung verfolgte die Entwicklung eines städtische Planungsinstrumentes Sustainable City Information Model (SCIM). Dies enthält Module für die Bedarfsseite (Gebäude und Verkehr) und für die Versorgungsseite. Als technologische Basis dient eine Verknüpfung eines Gebäudemodells (Drees & Sommer), Verkehrsmodells (Karajan Ingenieure) sowie eines Energiesystemmodells (TIMES Local - IER). Die Vernetzung der Bereiche „Gebäude“ und „Verkehr“ über ein ganzheitliches Energiesystemmodell erlaubt eine simultane Betrachtung des Strom- und Wärmemarktes sowie eine Verknüpfung mit der Mobilität. Durch die integrale Betrachtung können die Wechselwirkungen zwischen den Teilmärkten erfasst werden. Durch die Anwendung eines ganzheitlichen, integralen Ansatzes wird die Wandlung der untersuchten Bilanzräume und derer Energiesysteme hinsichtlich einer nachhaltigen Energieversorgung effizient planbar. Der modulare Aufbau des Tools erlaubt eine einfache Anpassung an Gebietsgrößen, Zielstellungen und die Gegebenheiten vor Ort. Darauf basierend wurde eine leicht nutzbare Version von SCIM – EN-easy – entwickelt. EN-easy soll dabei durch Planungsabteilungen / Quartiersmanager, aber auch für Beteiligungsprozesse eingesetzt werden. Sowohl mithilfe einer ex ante durchgeführten Ergebnisverarbeitung aus statistischen Daten für Deutschland als auch durch die Dateneingabe der Nutzer entsprechend vorhandener Informationen in den Städten (Bevölkerung, Gewerbe, GIS-Daten (Gebäudefläche, -baujahr) wurden bei der Entwicklung der Maßnahmen im EN-easy Tool berücksichtigt.

Ziel des EN-easy war es eine Lösung zu entwickeln, die eine einfache Bedienung ermöglicht, während gleichzeitig komplexe Nutzeranforderungen abgebildet werden. Für die Softwareumsetzung des Tools

wurde die Realisierung als zugängliche Web-App gewählt. Das Planungswerkzeug EN-easy erstellt eine integrierte Analyse der zu erwartenden Energie- und CO₂-Ströme eines beliebigen Bilanzraums (eines Quartiers, eines Stadtteils oder einer Stadt) und liefert gleichzeitig Hinweise zu energetischen Maßnahmen sowie Energieminderungspotenzialen. Anhand von zwei Fallstudien wurden unterschiedliche Gebiete systemanalytisch und unter ökonomischen Gesichtspunkten bewertet. Einerseits einer durch Bestandsbauten geprägter Bilanzraum und andererseits ein durch Neubauten gekennzeichnetes Quartier. Für das Bestandsquartier zeigte sich, dass das Klimaziel bis 2030 eine deutliche Veränderung in der Versorgungsstruktur des Energiesystems erfordert. Demgegenüber resultieren für die Fallstudie bezüglich des Neubaugebietes deutlich höhere CO₂-Vermeidungskosten, da zusätzliche Maßnahmen mit hohen Investitionen und geringem verbleibendem CO₂-Einsparpotential verbunden sind. In beiden Fällen ist die Umsetzung der Klimaschutzmaßnahmen aus dem übergreifenden Bereich bzw. im Sinne der Sektorkopplung entscheidend. Für die Umsetzung der Maßnahmen wird jeweils die besondere Rolle der Stadtverwaltung und der lokalen Energieversorger als Akteure der Energiewende hervorgehoben.

System analysis for urban energy strategies via a modular planning instrument - methodological research and case studies

Blesl M.; Stehle M.; Brodecki L.; Groß P.; Grassl G.; Reiser S.; Karajan J.; Christ A.; Müller E.

Abstract

Relating to the current climate change, demographic change, rising energy prices, energy security discussions, and efforts to preserve nature and the environment and utilize it in a sustainable way, new approaches for urban planning are needed. Energy planning of predefined aspects of an energy system is already a complex undertaking, and to achieve climate goals, the implementation of individual flagship projects is not sufficient. Thus, holistic urban planning plays a key role in the realization of the energy transition. However, the increasing linking of the transport sector with the overall energy system, e.g. via electromobility or the additional energy storage capacities (Vehicle-to-Grid) increase the complexity of energy planning. Therefore, it seems sensible to provide energy planners / urban planners with supportive tools to achieve the necessary quality of data collection and data depth for developing strategic pre-planning measures of conducting climate related actions.

Within the scope of the objective, an urban planning instrument named Sustainable City Information Model (SCIM) has been developed. SCIM includes modules for the demand side (buildings and traffic) and for the supply side. The technological basis is a linkage of a building model (Drees & Sommer), traffic model (Karajan engineers) and an energy system model (TIMES Local - IER). The linkage of the areas of "buildings" and "traffic" via a holistic energy system model allows an integrated consideration of the electricity and heating market under consideration of mobility aspects. Due to the holistic approach, the interactions between the sectors can be investigated. By applying a holistic, integral approach, a transformation of the examined case studies and their energy systems can be planned efficiently with regard to a sustainable energy supply. Due to the modular structure of the tool, a simple adaptation to different area sizes, set objectives and local conditions is possible. Based on this approach, an easily usable version of SCIM – called EN-easy – has been developed. The scope of application of EN-easy is considered in planning departments / district managers, but also within participation processes of stakeholders. Both with the help of ex-ante data processing from statistical data for Germany, as well as by the data input of the users according to existing information in the cities (population, commerce trade services sector, GIS data (building area, year of construction) are included in the development of the climate mitigation measures in the EN-easy tool.

The goal was to increase manageability of energy system aspects under consideration of complex user requirements. For the software implementation of the EN-easy, the provision of a planning tool as an accessible web app was considered. EN-easy, which uses building data and traffic data to create an integrated analysis of the expected energy and CO₂ flows of predefined area (district or city), provides information on emission mitigation measures and the corresponding energy-saving potentials. An economic consideration of measures for residential, non-residential buildings and traffic are also implemented. Based on two case studies, different areas were evaluated. On the one hand, a balance

area characterised by existing buildings and on the other hand a newly built district. For the existing quarter, it became apparent that the climate target by 2030 requires a significant change in the supply structure of the energy system. In addition, the case study for the newly developed area shows significantly higher CO₂ avoidance costs, as mitigation measures are associated with high investments and low remaining CO₂ savings potential. In both cases, the climate protection measures from the overall sectoral scope or in the sense of sector coupling play are important. For the implementation of the measures, the special role of the city administration and the local energy suppliers as actors of the energy system transformation are highlighted.

1	EINLEITUNG	1
1.1	Motivation und Problemstellung.....	1
1.2	Zielsetzung.....	1
1.3	Aufbau	2
2	SUSTAINABLE CITY INFORMATION MODEL – SCIM	5
2.1	Gebäudesimulation – TRNSYS	5
2.2	Verkehrsmodell.....	11
2.2.1	Methodische Grundlagen.....	15
2.3	Integrierte Energiesystemmodellierung mit TIMES Local	22
2.3.1	Identifizierung von Klimaschutzmaßnahmen.....	25
2.3.2	Maßnahmenimplementierung in SCIM	32
3	ANGEWANDTE FALLSTUDIEN	47
3.1	Fallstudie Metzingen	47
3.1.1	Analyse der Ausgangssituation.....	47
3.1.2	Analyse des Gebäudebestands.....	51
3.1.3	Analyse des Verkehrs	53
3.1.4	Szenarien – Rahmenannahmen.....	57
3.1.5	Szenariendefinition	60
3.1.6	Ergebnisse des Szenarienanalyse.....	62
3.1.7	Auswirkungen der Klimaschutzmaßnahmen	67
3.1.8	Energiewirtschaftliche Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen	68
3.2	Fallstudie Flughafen Berlin TXL	69
3.2.1	Analyse der Ausgangssituation.....	69

3.2.2	Analyse des Gebäudebestands	73
3.2.3	Analyse des Verkehrs	76
3.2.4	Szenarien – Rahmenannahmen.....	80
3.2.5	Szenariendefinition	82
3.2.6	Ergebnisse des Szenarienvergleichs für die Fallstudie Berlin TXL	83
3.2.7	Auswirkungen der Klimaschutzmaßnahmen.....	89
3.2.8	Energiewirtschaftliche Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen	89
4	EN-EASY	91
4.1	Analyse bestehender Tools und Ableitung von Anforderungen.....	91
4.1.1	District ECA	91
4.1.2	ELAS (Energetische Langzeitanalysen für Siedlungsstrukturen)	91
4.1.3	Energieausweis für Siedlungen.....	92
4.1.4	EFES (Energieeffiziente Entwicklung von Siedlungen)	92
4.1.5	Spatial Energy Simulation Berlin TXL	92
4.1.6	EDA (Easy District Analysis).....	92
4.1.7	Anforderungen an EN-easy	92
4.2	Beschreibung des EN-easy Tools.....	94
4.3	Ableitung der Energie- und CO₂-Bilanz von Quartieren /Städten	97
4.4	Methodischer Ansatz zur Erstellung von CO₂- Minderungskostenkurven hinsichtlich Klimaschutzmaßnahmen	101
4.4.1	CO ₂ -Minderungskosten	101
4.4.2	Durchdringungsraten zur Abbildung von Akzeptanz und Hemmnissen	104
4.4.3	Berücksichtigung der Maßnahmenkopplung.....	105

4.4.4	CO ₂ -Minderungskostenkurven für Klimaschutzmaßnahmen.....	110
4.5	Quantifizierung der CO₂-Minderungsmaßnahmen (Gebäude, Verkehr, übergreifend)	111
4.5.1	Maßnahmen in Wohngebäude und Nichtwohngebäude	111
4.5.2	Maßnahmen im Verkehrssektor.....	121
4.5.3	Übergreifende Maßnahmen	123
4.6	EN-easy – Fallstudien	127
4.6.1	Metzingen	127
4.6.2	Berlin TXL.....	132
4.6.3	Energiewirtschaftliche Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen	135
4.6.4	Vergleich SCIM Modellierungsergebnisse mit EN-easy	137
5	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	139
	LITERATURVERZEICHNIS.....	141

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema energetische Stadtraumtypen.....	5
Abbildung 2: Vergleich flächenbezogener Raumwärmebedarfskennwerte (Drees & Sommer).....	6
Abbildung 3: Gebäudetypologie nach IWU [4]	7
Abbildung 4: Beispielhafte Gebäudemodelle, quantitativer Simulationsinput (eigene Abbildung)	8
Abbildung 5: EXCEL-Tool zur Erstellung einfacher TRNSYS 3D Gebäudemodelle (eigene Abbildung).....	8
Abbildung 6: Warmwasserzapfprofil für eine Woche (Drees & Sommer)	9
Abbildung 7: Stromganglinie Einfamilienhaus	11
Abbildung 8: Raumb Beobachtung des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung [11]	13
Abbildung 9: Aufteilung der Mobilität nach Wegezwecken des Deutschen Mobilitätspanels [13]	14
Abbildung 10: Warentransport nach Verflechtungsprognose Güterverkehr	20
Abbildung 11: Verkehrsmodell Vier-Stufen-Algorithmus.....	21
Abbildung 12: Referenzenergiesystem TIMES Local	22
Abbildung 13: Zeitliche Struktur von TIMES Local.....	24
Abbildung 14: Implementierung der Carpooling Maßnahme im Energiesystemmodell.....	34
Abbildung 15: Übersicht der Sanierungsmodellierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden im SCIM	38
Abbildung 16: Investitionsoptionen im Bereich der Stromanwendungen.....	39
Abbildung 17: Modellierung sektorspezifischer PV in SCIM	40
Abbildung 18: Modellierung der Elektromobilität und der Be- und Entladungsstruktur der mobilen Speicher	43
Abbildung 19: Modellstruktur der Nah- und Fernwärme.....	44
Abbildung 20: Modellstruktur der Verteilungsprozesse von Nah- und Fernwärme	45
Abbildung 21: Endenergieverbrauch in Metzingen in 2012 nach Energieträgern	49

Abbildung 22: Endenergiebasierte Territorialbilanz: Energiebedingte CO ₂ -Emissionen in Metzingen in 2012 nach Sektoren (ohne Witterungskorrektur)	50
Abbildung 23: Endenergiebasierte Territorialbilanz: Energiebedingte CO ₂ -Emissionen in Metzingen in 2012 nach Energieträgern (ohne Witterungskorrektur).....	51
Abbildung 24: Potenziale Erneuerbarer Energien und bereits erfolgte Nutzung im Jahr 2012 in Metzingen	58
Abbildung 25: Entwicklung des gesamten Endenergieverbrauchs nach Energieträgern in Metzingen (Vergleich des Basisszenarios und des Zielszenarios)	62
Abbildung 26: Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern für Haushalte in Metzingen	63
Abbildung 27: Nutzenergiebereitstellung von Raumwärme in Haushalten nach Technologietyp in Metzingen	63
Abbildung 28: Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern für Verkehr.....	64
Abbildung 29: Entwicklung des Strombedarfs nach Sektoren in Metzingen.....	65
Abbildung 30: Entwicklung der Strombereitstellung in Metzingen.....	65
Abbildung 31: Entwicklung der sektorspezifischen CO ₂ Emissionen in Metzingen (Vergleich des Basisszenarios und des Zielszenarios).....	66
Abbildung 32: Masterplan "The Urban Tech Republic" [46]	70
Abbildung 33: Einteilung von Berlin TXL in die einzelnen Bauflächen und Bauphasen [46]	71
Abbildung 34: Nutzwärmebedarf Gewerbe Bestand.....	74
Abbildung 35: Anwendungsbezogene Nutzenergiebedarf nach Berlin TXL Masterplan [46]	76
Abbildung 36: Nutzenergiebedarf detailliert nach Berlin TXL Masterplan [46]	76
Abbildung 37: Entwicklung des gesamten Endenergieverbrauchs nach Energieträgern in Berlin TXL	84
Abbildung 38: Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern für GHD in Berlin TXL	84
Abbildung 39: Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern im Verkehrssektor in Berlin TXL	85
Abbildung 40: Entwicklung der sektorspezifischen CO ₂ Emissionen in Berlin TXL.....	86

Abbildung 41: Entwicklung der Strombereitstellung in Berlin TXL	86
Abbildung 42: Entwicklung des Stromverbrauchs in Berlin TXL	87
Abbildung 43: Nutzenergiebereitstellung von Raumwärme im GHD Sektor nach Technologietyp in Berlin TXL	88
Abbildung 44: Nah-/Fernwärme Erzeugungskapazitäten in Berlin TXL.....	88
Abbildung 45: Vergleich bestehender Tools sowie Anforderungen an bzw. neue Ansätze in EN- easy	94
Abbildung 46: Benutzeroberfläche und Anwendungsbereich des EN-easy-Tools	95
Abbildung 47: Beispielhafte Darstellung der Online-Grafiken zum Endenergieverbrauch und CO ₂ -Ausstoß einer Gemeinde.....	96
Abbildung 48: CO ₂ -Vermeidungskostenkurve für eine Gemeinde mit Ausweisung der wirtschaftlichen und technischen Potentiale (oben) und Ausschnitt der tabellarischen Darstellung (unten).....	97
Abbildung 49: Potenzialkorrektur der Maßnahmen anhand der Durchdringungsraten.....	104
Abbildung 50: Kopplung von Maßnahmen innerhalb des Verkehrsbereiches	106
Abbildung 51: Kopplungsmatrix von Einzelmaßnahmen und Gruppen	109
Abbildung 52: Potenzialkorrektur der Maßnahmen anhand der Durchdringungsraten und unter Berücksichtigung der gegenseitigen Wechselwirkungen	110
Abbildung 53: Schematisches Beispiel für eine CO ₂ -Minderungskostenkurve für Klimaschutzmaßnahmen mit ihren spezifischen CO ₂ - Minderungskosten [€/t] und ihrem CO ₂ -Minderungspotenzial [t]	111
Abbildung 54: CO ₂ -Emissionen im Basisjahr im Bilanzraum Metzingen nach Anwendung und Verursacher anhand EN-easy	128
Abbildung 55: CO ₂ -Potenzialkurve für die Fallstudie Metzingen	130
Abbildung 56: CO ₂ -Emissionen im Basisjahr im Bilanzraum Berlin TXL nach Anwendung und Verursacher.....	133
Abbildung 57: CO ₂ -Potenzialkurve für die Fallstudie Berlin TXL.....	134

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Durchschnittlicher Stromverbrauch pro m ² Wohnfläche in Deutschland	10
Tabelle 2: Nutzungsprofile zur Erstellung eines Lastprofils	10
Tabelle 3: Übersicht Maßnahmen zur Energieeinsparung und Energieeffizienzsteigerung im Bereich Gebäude.....	27
Tabelle 4: Reduzierungspotenzial der Maßnahme Stärkung Umweltverbund	29
Tabelle 5: Einsparungspotenziale im Bereich Carpooling	30
Tabelle 6: Verkehrsmaßnahmen.....	31
Tabelle 7: Übergreifende Maßnahmen im Bestand und Neubau	32
Tabelle 8: In SCIM implementierte Verkehrsmaßnahmen.....	32
Tabelle 9: Im Sustainable City Information Modell implementierte Wohngebäudemaßnahmen	35
Tabelle 10: Im Sustainable City Information Modell implementierte Nichtwohngebäudemaßnahmen (1/2).....	36
Tabelle 11: Im Sustainable City Information Modell implementierte Nichtwohngebäudemaßnahmen (2/2).....	37
Tabelle 12: Im Sustainable City Information Modell implementierte übergreifende Maßnahmen (1/2)	41
Tabelle 13: Im Sustainability City Information Model implementierte übergreifende Maßnahmen (2/2)	42
Tabelle 14: Steckbrief für die Stadt Metzingen 2012.....	47
Tabelle 15: Verwendete Datenquellen zur Erstellung der Energiebilanz für Metzingen nach Sektor und Kategorie im Jahr 2012 [30].....	48
Tabelle 16: CO ₂ -Emissionsfaktoren 2012 nach Energieträgern (ohne Vorkette).....	49
Tabelle 17: Anforderungen Verbesserungen Bauteile (Drees & Sommer)	52
Tabelle 18: Flächenbezogene Energiebedarfs Basiszustand	53
Tabelle 19: Berechnungsgrundlagen Verstädterte Räume Verdichtete Kreise [34].....	54
Tabelle 20: Mögliche Reduzierungspotenzial der umsetzbaren Maßnahmen für Metzingen	55

Tabelle 21: Bevölkerungswachstum in Metzingen	59
Tabelle 22: Sektorale indizierte Fortschreibung und Wohnflächennachfrage in Metzingen (2012 = 100 %).....	60
Tabelle 23: Szenarienbeschreibung für BASE und ZIEL für die Fallstudie Metzingen	61
Tabelle 24: Import von Strom aus Mittelspannungsebene basierend auf Entwicklung des Strommixes [43]	61
Tabelle 25: Systemkosten und resultierende CO ₂ Vermeidungskosten für Basis- und Zielszenario für Fallstudie Metzingen.....	67
Tabelle 26: Verteilung der Nutzungsarten auf Basis von Nutzungsszenarien [41].....	72
Tabelle 27: Nutzflächenaufteilung Flughafen Berlin Tegel [46]	72
Tabelle 28: GHD Flächenbedarf je Beschäftigten (Drees & Sommer)	73
Tabelle 29: GHD Nutzenergiebedarf Bestand (Drees & Sommer)	74
Tabelle 30: GHD Nutzenergiebedarf Neubau (Drees & Sommer).....	75
Tabelle 31: Nutzenergiebedarf Fallstudie Berlin TXL (Drees & Sommer)	75
Tabelle 32: Berechnungsgrundlagen Agglomerationsraum Kernstadt.....	77
Tabelle 33: Mögliche Reduzierungspotenzial der Maßnahmen für Berlin TXL.....	79
Tabelle 34: Nutzenergiebedarfe für Strom und Wärme bei Abschluss der Bauflächenkonversion in Berlin TXL [46].....	81
Tabelle 35: Baufortschritt in Berlin TXL [46]	81
Tabelle 36: Fortschreibung der Mobilitätsnachfrage in Berlin TXL.....	81
Tabelle 37: Verfügbare Flächen zur Nutzung von Solarthermie und Photovoltaik [48].....	82
Tabelle 38: Szenarienbeschreibung für BASE und ZIEL für die Fallstudie Berlin TXL.....	82
Tabelle 39: Spezifische Emissionen für Strom für BASE und ZIEL1 für die Fallstudie Berlin TXL	83
Tabelle 40: Systemkosten und resultierende CO ₂ Vermeidungskosten für Basis- und Zielszenario für Fallstudie Berlin TXL	89

Tabelle 41: Spezifische Wärmebedarfe (Raumwärme + Warmwasser) je Gebäudetyp und Baualtersklasse unter Berücksichtigung bereits sanierter Gebäude (je Baualtersklasse 12,5% von A bis H)	99
Tabelle 42: Spezifische CO ₂ -Emissionsfaktoren der Wärmebereitstellung nach Bundesländern bezogen auf Endenergie [57, 31]	99
Tabelle 43: Spezifische elektrische Strombedarfe je m ² Wohnfläche in Abhängigkeit des Gebäudetyps und der Baualtersklasse [3, 58]	100
Tabelle 44: Nettogeschossfläche (NGF) je Beschäftigten nach den Bereichen Handel, Dienstleistung und Gewerbe [35]	100
Tabelle 45: Spezifischer Bedarfe: Heizwärme, Kälte, Strom, Strombezug Raumluftechnik unterteilt nach Handel, Dienstleistung und Gewerbe und differenziert nach Bestand und Neubau [59, 35, 46]	101
Tabelle 46: Energieträgerpreise.....	103
Tabelle 47: Übersicht der Kosten der betrachteten Maßnahmen.....	118
Tabelle 48: Übersicht der Kosten der betrachteten Maßnahmen – Datenquellen	120
Tabelle 49: Endenergieverbrauch für den Bilanzraum Metzingen anhand EN-easy.....	128
Tabelle 50: Endenergieverbrauch für den Bilanzraum Berlin TXL	132
Tabelle 51: CO ₂ -Emissionen für den Bilanzraum Berlin TXL	133
Tabelle 52: Endenergiebedarf Metzingen Ausgangszustand – Detailanalyse	151
Tabelle 53: Tabellarische Form der CO ₂ -Minderungskostenkurve der Klimaschutzmaßnahmen für die Fallstudie Metzingen (1/2)	152
Tabelle 54: Tabellarische Form der CO ₂ -Minderungskostenkurve der Klimaschutzmaßnahmen für die Fallstudie Metzingen (2/2)	153
Tabelle 55: Tabellarische Form der CO ₂ -Minderungskostenkurve der Klimaschutzmaßnahmen für die Fallstudie Berlin TXL	154
Tabelle 56: Agglomerationsraum Kernstadt (eigene Berechnung nach [10]).....	155
Tabelle 57: Agglomerationsraum Hochverdichtete Kreise (eigene Berechnung nach [10]).....	155
Tabelle 58: Agglomerationsraum Verdichtete Kreise (eigene Berechnung nach [10]).....	156
Tabelle 59: Agglomerationsraum Ländliche Kreise (eigene Berechnung nach [10])	156

Tabelle 60: Verstärterte Räume Kernstadt (eigene Berechnung nach [10])	157
Tabelle 61: Verstärterte Räume Verdichtete Kreise (eigene Berechnung nach [10]).....	157
Tabelle 62: Verstärterte Räume Ländliche Kreise (eigene Berechnung nach [10])	158
Tabelle 63: Ländliche Räume Ländliche Kreise höherer Dichte (eigene Berechnung nach [10])	158
Tabelle 64: Ländliche Räume Ländliche Kreise geringerer Dichte (eigene Berechnung nach [10])..	159
Tabelle 65: Exemplarische Zusammenstellung für Maßnahmen in kommunalen Verkehrsentwicklungsplänen.....	160
Tabelle 66: Annahmen zum Referenzfahrzeug	161
Tabelle 67: Durchdringungsraten der Maßnahmenpotenziale bis 2030 gegenüber dem Basisjahr 2012 für den Gebäudebereich in Metzingen.....	162
Tabelle 68: Durchdringungsraten der Maßnahmenpotenziale bis 2030 gegenüber dem Basisjahr 2012 für den Verkehrs- und Übergreifenden Bereich in Metzingen	163
Tabelle 69: Durchdringungsraten der Maßnahmenpotenziale bis 2030 gegenüber dem Basisjahr 2012 für den Gebäudebereich in Berlin TXL	164
Tabelle 70: Durchdringungsraten der Maßnahmenpotenziale bis 2030 gegenüber dem Basisjahr 2012 für den Verkehrs- und Übergreifenden Bereich in Berlin TXL.....	165

1 Einleitung

1.1 Motivation und Problemstellung

Vor dem Hintergrund des gegenwärtigen Klimawandels, demografischen Wandels, steigender Energiepreise, der Diskussionen um die Versorgungssicherheit im Energiebereich und der Bemühungen um einen nachhaltigen Umgang mit Natur und Umwelt werden neue Ansätze innerhalb der Stadtplanung benötigt. Die energetische Planung von Einzelobjekten ist bereits ein komplexes Unterfangen und zur Erreichung von Klimazielen genügt die Umsetzung einzelner Leuchtturmprojekte hingegen nicht. Somit wird der ganzheitlichen Stadtplanung bei der Realisierung der Energiewende eine tragende Rolle zugeschrieben. Die zunehmende Verflechtung des Verkehrssektors mit dem Energiesektor, z. B. über die Elektromobilität oder die Energiespeicherung (Vehicle-to-Grid), erhöhen jedoch die Komplexität bei der Energieplanung. Daher scheint es sinnvoll, Energieplanern/Stadtplanern u.Ä. unterstützende Hilfsmittel bereitzustellen, die es ermöglichen, die notwendige Qualität in der Datenbeschaffung und Datentiefe zu erreichen, um eine strategische Vorplanung von Klima betreffenden Maßnahmen durchzuführen.

Die breite Anwendung bestehender systemanalytischer Instrumente auf der kommunalen Ebene scheitert meist an datentechnischen Hindernissen und dem für die Nutzung der Modelle erforderlichen Expertenwissen. So gilt es zukünftig z. B. Datenanalyse und -austausch durch geeignete Schnittstellen vereinfacht und die Bedienbarkeit von Modellen zu erleichtern. Für die vielfältigen Rahmenbedingungen vor Ort und die variierenden Planungsaufgaben sind angepasste Werkzeuge erforderlich, die bisher überwiegend von Experten genutzt werden. Die effiziente Nutzung vorhandener Datenbestände zwischen unterschiedlichen Analysewerkzeugen ist eine zentrale Herausforderung, die standardisierte Schnittstellen erfordert. Dies zeigen auch die Erfahrungen aus unterschiedlichen Forschungsbereichen.

1.2 Zielsetzung

Im Rahmen des vom BMWi geförderten Projektes „Systemanalyse Stadt“ wurde ein städtisches Planungsinstrument Sustainable City Information Model (SCIM) entwickelt. Dies enthält Module für die Bedarfsseite (Gebäude und Verkehr) und für die Versorgungsseite. Als technologische Basis dient eine Verknüpfung eines Gebäudemodells (Drees & Sommer), Verkehrsmodells (Karajan Ingenieure) sowie eines Energiesystemmodells (TIMES Local - IER). Die Vernetzung der Bereiche „Gebäude“ und „Verkehr“ über ein ganzheitliches Energiesystemmodell erlaubt eine simultane Betrachtung des Strom- und Wärmemarktes sowie eine Verknüpfung mit der Mobilität. Durch die integrale Betrachtung werden Wechselwirkungen zwischen den Teilmärkten erfasst. Durch die Anwendung eines ganzheitlichen, integralen Ansatzes (Wohngebäude, Nichtwohngebäude und Verkehr) wird die Wandlung der untersuchten Bilanzräume und derer Energiesysteme hinsichtlich einer nachhaltigen Energieversorgung effizient planbar. Durch den modularen Aufbau des Tools ist eine einfache Anpassung an Gebietsgrößen, Zielstellungen und die Gegebenheiten vor Ort möglich. Dies wird durch zwei Fallstudien nachgewiesen. Darauf basierend wird eine leicht nutzbare Version von SCIM – EN-easy – entwickelt.

Ziel des EN-easy ist es eine für Städteplaner einfache Bedienung zu ermöglichen, während gleichzeitig komplexe Nutzeranforderungen abgebildet werden können. Für die Softwareumsetzung des Tools wird

die Realisierung als zugängliche Web-App vorgesehen. Das Planungswerkzeug EN-easy, das auf Basis von Zensus, Statistiken sowie Verkehrsdaten eine integrierte Analyse der zu erwartenden Energie- und CO₂-Ströme eines beliebigen Bilanzraums (eines Quartiers, eines Stadtteils oder einer Stadt) erstellt, liefert Hinweise zu Klimaschutzmaßnahmen und CO₂-Minderungspotenzialen. Eine ökonomische Betrachtung der Maßnahmen für Wohn-, Nichtwohngebäude und Verkehr wird ebenfalls durchgeführt. Sowohl mithilfe einer ex ante durchgeführten Ergebnisverarbeitung aus statistischen Daten für Deutschland als auch durch die Dateneingabe der Nutzer entsprechend vorhandener Informationen in den Städten (Bevölkerung, Gewerbe, GIS-Daten (Gebäudefläche, -baujahr) werden bei der Entwicklung der Maßnahmen im EN-easy Tool berücksichtigt. Im Detail liefert das EN-easy Tool Möglichkeiten für Stadtplaner und Quartiersmanager oder aber auch an Beteiligungsprozesse interessierten Personen einen Überblick über die Kosteneffizienz von Klimaschutzmaßnahmen und deren Potenziale für ein Quartier. Zusätzlich können anhand CO₂-Vermeidungskostenkurven die Effizienz von Einzelmaßnahmen sowie deren Einfluss auf die Gesamteinsparungen abgelesen werden. Das Instrument liefert die maßnahmenspezifischen Sollwerte und dient gleichzeitig als Monitoring-Tool. Durch den modularen Aufbau des Instrumentariums ist eine einfache Anpassung an Gebietsgrößen, Zielstellungen und die Gegebenheiten vor Ort möglich.

1.3 Aufbau

Im ersten Teil von Kapitel 2 werden die Einzelmodelle für den Gebäude- und Verkehrsbereich erläutert, im zweiten Teil wird der Ansatz für SCIM erklärt. Hierfür werden geeignete Schnittstellen unter den Modellen definiert. Die Vernetzung der Modellbestandteile erfolgt über das integrierte Energiesystemmodell TIMES Local, das sowohl eine simultane Betrachtung des Strom- und Wärmemarktes als auch eine Verknüpfung mit der Mobilität erlaubt. Zur allgemeinen Anwendbarkeit des Tools auf unterschiedliche Bilanzräume wurde eine gemeinsame Datenbasis erstellt. Zur Verifizierung des Ansatzes und zur Erprobung der Datengewinnung, der Modelle und der Schnittstellen werden in Kapitel 3 zwei Fallstudien für unterschiedliche Ausgangsbedingungen erstellt. Hierbei werden zum einen eine Mittelstadt (Metzingen) und zum anderen ein geplantes Neubaugebiet (Flughafen Berlin TXL) analysiert. Damit werden die vielseitige Verwendbarkeit von SCIM sowie die Anpassungsmöglichkeiten an Gebietsgrößen, Zielstellungen und die jeweiligen Gegebenheiten vor Ort aufgezeigt. Nach einer Detailanalyse der Ist-Zustände für den Gebäude- und Verkehrsbereich, gefolgt von der Szenariendefinition werden die Ergebnisse von SCIM untersucht. Für beide Fallstudien werden Auswirkungen der gezogenen Emissionsreduktionspfade auf das lokale Energiesystem erläutert und energiewirtschaftliche Schlussfolgerungen gezogen. Die Fallstudien dienen darüber hinaus auch der Entwicklung der einfach nutzbaren Variante EN-easy. Kapitel 4 widmet sich den Eigenschaften, der Grundstruktur sowie der Logik des EN-easy Modells. Aus einer Literaturrecherche zu bestehenden Tools zur energetischen Betrachtung von Siedlungen werden die Anforderungen an das EN-easy Tool abgeleitet. Ausgehend von einer Energie- und CO₂ Bilanz für den Ist-Zustand bilden die in Kapitel 3 gewonnenen Erkenntnisse zu CO₂ Reduktionspfaden die Grundlage zur Definition von CO₂-Vermeidungsmaßnahmen im EN-easy Modell. Diese werden separat in die Bereiche Verkehr, Gebäude und Übergreifende unterteilt und basieren auf der erstellten Datenbank. Neben den vom Anwender erfassten Parametern basieren die Berechnungen daher auch auf der Grundfläche der Gebäude, der Anzahl der Geschosse der Gebäude und der Anzahl der Einwohner. Die Arbeiten zum EN-easy Tool beinhalten zum einen die Programmierung der Maßnahmen sowie die Implementierung als Web-Anwendung, welche an einen externen Softwareentwickler ausgelagert wurde. Hierbei wird die

Komplexität der Berechnungen reduziert. So wird die Entstehung umfassender und schulungsintensiver Fachschalenanwendungen vermieden, während gleichzeitig dennoch komplexe Nutzeranforderungen abgebildet werden können. Die in Kapitel 3 angewandten Fallstudien werden nochmals, diesmal mithilfe des EN-easy Tool untersucht. Die Ergebnisse zu CO₂ Vermeidungsmöglichkeiten, deren Unterschiede und Gemeinsamkeiten zur Detailanalyse mit SCIM werden anschließend beschrieben. Zum Abschluss des Berichtes wird eine Zusammenfassung und eine kritische Betrachtungsweise der erarbeiteten Methodik, der Modelle sowie der Ergebnisse gegeben.

2 Sustainable City Information Model – SCIM

Das entwickelte Sustainable City Information Model – SCIM setzt sich aus Einzelmodellen aus dem Bereich Gebäude und Verkehr sowie auf bereichsübergreifenden Maßnahmen für die Bedarfsseite zusammen. Für das SCIM-Modell wurde eine Methodik und Vorgehensweise zur Ermittlung des Energiebedarfs für den städtischen Bereich entwickelt, die im Folgenden beschrieben wird.

2.1 Gebäudesimulation – TRNSYS

Bestehende Ansätze und Modelle zur Ermittlung des Energiebedarfs auf städtischer Ebene sind beispielsweise:

- Energetische Stadtraumtypen – Strukturelle und energetische Kennwerte von Stadträumen [1]
- Leitfaden Energienutzungsplan [2]
- Typology Approach for Building Stock Energy Assessment (TABULA Webtool) [3]
- Deutsche Wohngebäudetypologie – Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden [4]

Im Folgenden werden die Ansätze kurz beschrieben.

Bei den energetischen Stadtraumtypen [1] wird der betrachtete Siedlungsraum in 19 energetische Stadtraumtypen untergliedert. Dabei wird unter Siedlungs-, Straßen-, und Freiräumen differenziert, hierzu gehören z.B. Siedlungsräume mit überwiegender Wohnnutzung, Mischnutzung, Büro- und gewerblicher Nutzung, Parkanlagen, Gewässer und Straßen. Diese 19 energetischen Stadtraumtypen werden durch 26 energetische Einzelemente, wie z.B. Einrichtungen aus Industrie, Handel und Gewerbe, Bildung und Forschung, Kultur, Betreuungseinrichtungen, Verkehrsbauten, Sportstätten und Sonstigem, ergänzt. Zu jedem der energetischen Stadtraumtypen sind energetische Kenngrößen für den Strom- und Wärmebedarf für unterschiedliche Baualterklassen und Sanierungsstufen hinterlegt. Durch die Analyse eines städtischen Gebietes und die Einteilung dieses in die Stadtraumtypen kann eine Bedarfsstruktur abgeleitet werden, siehe folgendes Schema.

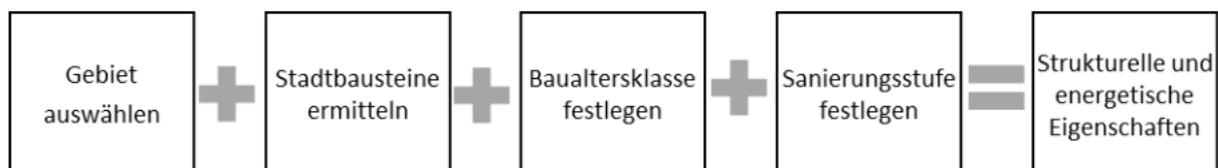


Abbildung 1: Schema energetische Stadtraumtypen

Im Leitfaden Energienutzung [2] wird ähnlich vorgegangen. Hierin wird ein Verfahren vorgestellt bei dem entweder siedlungsbezogen oder gebäudebezogen der Wärmebedarf von Siedlungen ermittelt werden kann. Bei der siedlungsbezogenen Vorgehensweise wird das betrachtete Gebiet anhand städtebaulicher Merkmale wie der Gebäudenutzung, der Gebäudeanzahl, der Geschossanzahl und der Gebäudeanordnung in unterschiedliche Siedlungstypen eingeteilt, woraus sich der Gesamtwärmebedarf in $[MWh/(ha*a)]$ ableiten lässt. Bei der gebäudebezogenen Vorgehensweise wird das Gebiet in Gebäudetyp (EFH, RH, MFH, GMH), nach Baualter, Sanierungszustand und jeweiliger Gebäudefläche

aufgeteilt und daraus ein Gesamtenergiebedarf je Gebäude in [kWh/a] abgeleitet. Ergänzt werden diese durch Wärmebedarfswerte für Gebäude des Sektors GHD.

Im TABULA Webtool [3] werden auf einer Onlineplattform für unterschiedliche Wohngebäudetypen und Altersklassen nahezu aller Länder Europas Wärmebedarfswerte für unterschiedliche Sanierungszustände geliefert. Auf Grundlage unterschiedlicher Forschungsprojekte und einer festgelegten Erfassungssystematik auf Basis der Gebädekubatur und der bauphysikalischen Eigenschaften der Gebäudehülle wird unter den jeweiligen nationalen Randbedingungen (z.B. Wetterdaten) der Gebäudewärmebedarf hochgerechnet.

Auf der Basis der Deutschen Wohngebäudetypologie [4] bauen die Ergebnisse des TABULA-Projekts auf. Das IWU hat hier die Daten einfließen lassen und für insgesamt 5 Gebäudetypologien (Einfamilienhaus, Reihenhauses, Mehrfamilienhaus, Großes Mehrfamilienhaus und Hochhaus) und 12 Baualterklassen Musterwohngebäude definiert, für die es detaillierte Angaben zu Flächen, zur Kubatur und zu bauphysikalischen Eigenschaften gibt. Zudem hat das IWU die TABULA-Daten auf erfasste Verbrauchsdaten von Deutschland angepasst und damit eine hohe Aussagekraft für Bedarfswerte geschaffen.

Die unterschiedlichen Quellen werden verglichen, um zu verdeutlichen wie groß die Unterschiede zwischen den einzelnen Herangehensweisen sind. Hierzu werden 5 Gebäudetypen exemplarisch betrachtet und auf den gleichen Flächenbezug umgerechnet. Die folgende Abbildung zeigt den Vergleich des Wärmebedarfs jeweils des TABULA-Webtools, der deutschen Wohngebäudetypologie des IWU, der energetischen Stadtraumtypen und des Leitfadens Energienutzungsplan für ein Einfamilienhaus BJ. 69 – 78, ein Einfamilienhaus BJ. 95 – 01, für ein Reihenhauses BJ. 79 – 83, ein großes Mehrfamilienhaus BJ. 58 – 68 sowie ein Hochhaus BJ. 70 – 80.

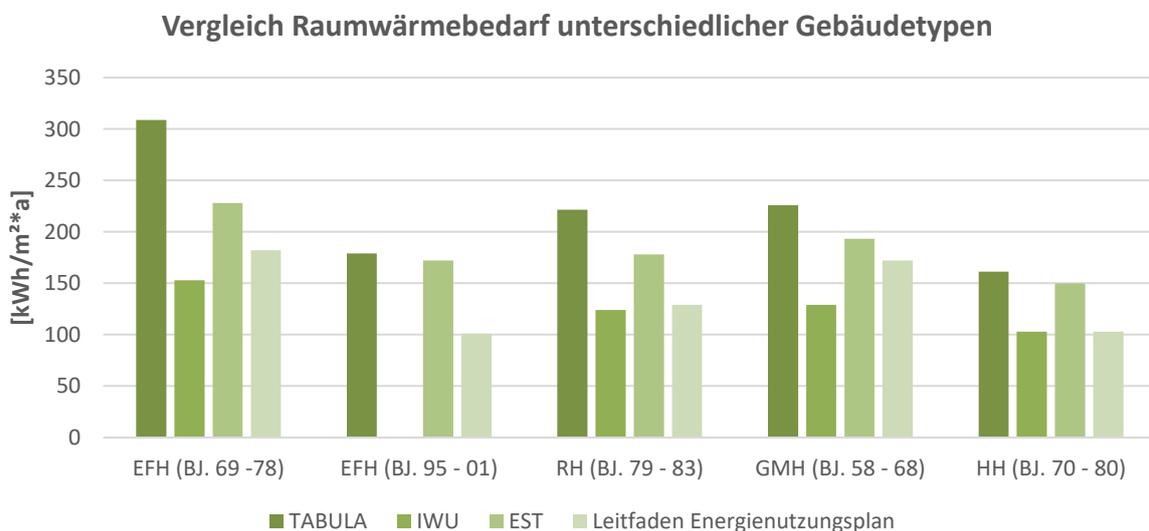


Abbildung 2: Vergleich flächenbezogener Raumwärmebedarfswerte (Drees & Sommer)

Es wird deutlich, dass die Wärmebedarfswerte der unterschiedlichen Quellen bzw. Verfahren teils deutlich voneinander abweichen. Ohne weiterführende Validierung kann daher keine Aussage über die

tatsächliche Genauigkeit der jeweiligen Daten gemacht werden. Da dies jedoch nicht Gegenstand dieses Projekts ist, wird eine Festlegung auf eine Quelle bzw. auf ein Verfahren notwendig. Unter der Berücksichtigung der Zielstellung der Bedarfsermittlung auf Gebäudeebene mittels Simulationen als Input für das SCIM-Modell und das EN-Easy-Tool, wird auf die Wohngebäudetypologie des IWU [4] zurückgegriffen (vgl. Abbildung 3).

Baualtersklasse			EFH	RH	MFH	GMH	HH
			Basis-Typen				
A	... 1859		EFH_A		MFH_A		
B	1860 ... 1918		EFH_B	RH_B	MFH_B	GMH_B	
C	1919 ... 1948		ERH_C	RH_C	MFH_C	GMH_C	
D	1949 ... 1957		ERH_D	RH_D	MFH_D	GMH_D	
E	1958 ... 1968		ERH_E	RH_E	MFH_E	GMH_E	HH_E
F	1969 ... 1978		ERH_F	RH_F	MFH_F	GMH_F	HH_F
G	1979 ... 1983		ERH_G	RH_G	MFH_G		
H	1984 ... 1994		ERH_H	RH_H	MFH_H		
I	1995 ... 2001		ERH_I	RH_I	MFH_I		
J	2002 ... 2009		ERH_J	RH_J	MFH_J		
K	2010 ... 2015		ERH_K	RH_K	MFH_K		
L	2016 ...		ERH_L	RH_L	MFH_L		
F/F	1969 ... 1978	Fertighaus	ERH_FF				
Sonderfälle	NBL_D	1946 ... 1960			MFH_NBL_D		
	NBL_E	1961 ... 1969			MFH_NBL_E		
	NBL_F	1970 ... 1980				GMH_NBL_F	HH_NBL_F
	NBL_G	1981 ... 1985				GMH_NBL_G	HH_NBL_G
	NBL_H	1986 ... 1990				GMH_NBL_H	HH_NBL_H

*Neue Bundesländer
Industrieller Wohnungsbau*

Erklärung der Kürzel: EFH = Einfamilienhaus; RH = Reihenhaus; MFH = Mehrfamilienhaus; GMH = großes Mehrfamilienhaus; HH = Hochhaus

Abbildung 3: Gebäudetypologie nach IWU [4]

Hier finden sich neben den Bedarfswerten für den Wärmeverbrauch, wie oben bereits beschrieben, detaillierte Angaben zu Flächen, Kubaturen und zu bauphysikalischen Eigenschaften (U-Werte, g-Werte, Infiltrationswerte und Luftwechsel) von Mustergebäuden verschiedener Baualtersklassen und Gebäudetypologien. Diese Parameter können als Input für Bedarfssimulationen und damit zur Erstellung von stündlichen Lastprofilen herangezogen werden.

Für die Erstellung der entsprechenden Bedarfsprofile wird das modulare Gebäudesimulationsprogramm „TRNSYS 17“ verwendet. Um die Gebäudetypen nach IWU als Input für das Simulationsmodell abbilden zu können, werden jeweils die Parameter der IWU-Typologie herangezogen, siehe Anhang. Über ein Zweizonen-Gebäudemodell werden die Kubaturen der einzelnen Gebäudetypen als Simulationsinput dargestellt (vgl. Abbildung 4).

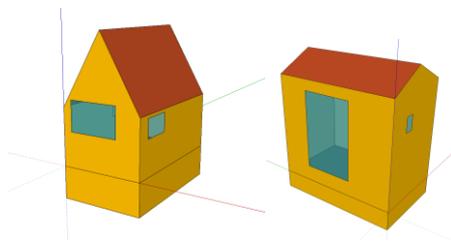


Abbildung 4: Beispielhafte Gebäudemodelle, quantitativer Simulationsinput (eigene Abbildung)

Hierbei ist zu beachten, dass die Modelle quantitativ die opaken und transparenten Flächen je nach deren Orientierung wiedergeben müssen und daher keinen besonderen qualitativen Anspruch haben. Mittels eines EXCEL-Tools werden somit die IWU Angaben in einfachen 3D-Modellen umgesetzt, wie sie exemplarisch in Abbildung 5 skizziert sind.

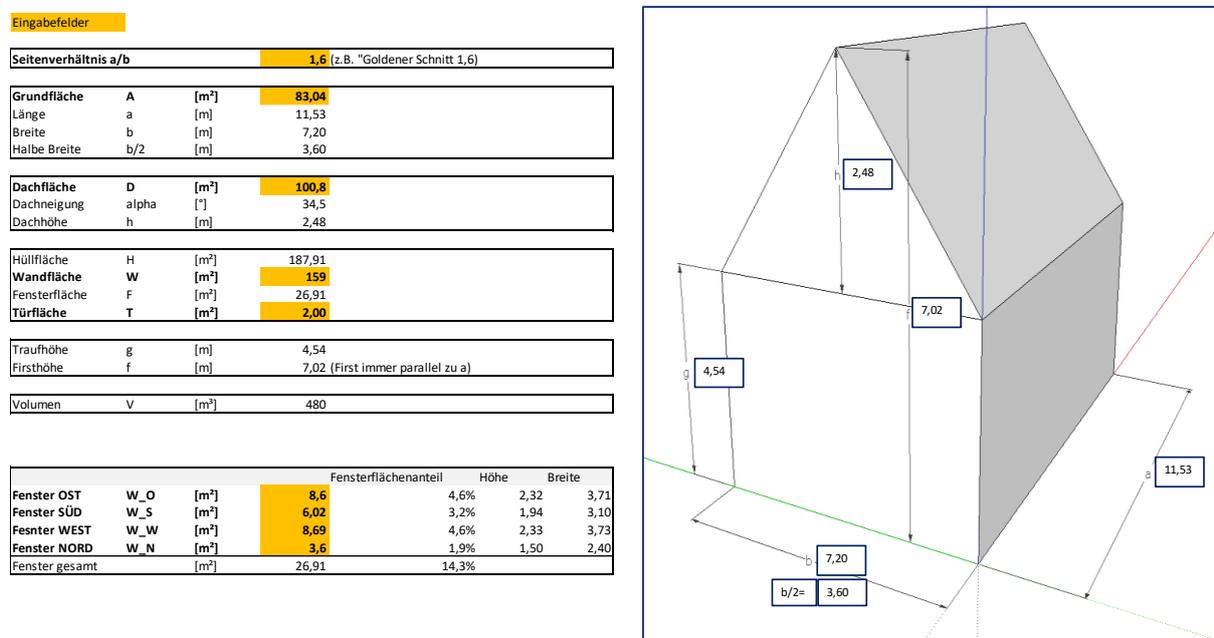


Abbildung 5: EXCEL-Tool zur Erstellung einfacher TRNSYS 3D Gebäudemodelle (eigene Abbildung)

Als weiteren Input für das TRNSYS-Modell dienen die folgenden Randbedingungen:

- Dach-, Außenwand-, Fenster-, Bodenflächen [m^2]
- U-Werte für opake und transparente Bauteile [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
- Natürliche Infiltration [$1/\text{h}$]
- Luftwechsel [$1/\text{h}$]
- Interne Wärmegewinne [W/m^2]
- Fc-Wert zur Verschattung für horizontale und vertikale Fensterflächen

Mittels der oben genannten Parameter kann für jeden Gebäudetyp der Wohngebäudetypologie des IWU ein Bedarfsmodell für den Nutzwärmebedarf erstellt werden.

Neben dem Nutzwärmebedarf ist der Wärmebedarf für die Warmwasserbereitstellung (WWB) von Interesse. Auch hierfür lassen sich in den IWU-Daten Angaben finden. Vereinfacht lässt sich sagen, dass für Mehrfamilien- und Hochhäuser ein Bedarfswert von $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{NGF}^*\text{a})$ und für Einfamilien- und Reihenhäuser ein Bedarfswert von $10 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{NGF}^*\text{a})$ für den Nutzwärmebedarf für die WWB angesetzt wird. Dieser Jahresbedarf wird auf einen durchschnittlichen täglichen Bedarf heruntergerechnet und auf ein Zapfprofil skaliert. Für den Bedarfswert von $10 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{NGF}^*\text{a})$ wird das Zapfprofil L und für den Bedarfswert von $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{NGF}^*\text{a})$ das Zapfprofil 3 / 4 XL der „European reference tapping cycles“ [5] genutzt. Die folgende Abbildung zeigt beispielhaft das Zapfprofil für eine Woche (Annahme, es werden $10 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{NGF}^*\text{a})$ nachgefragt).

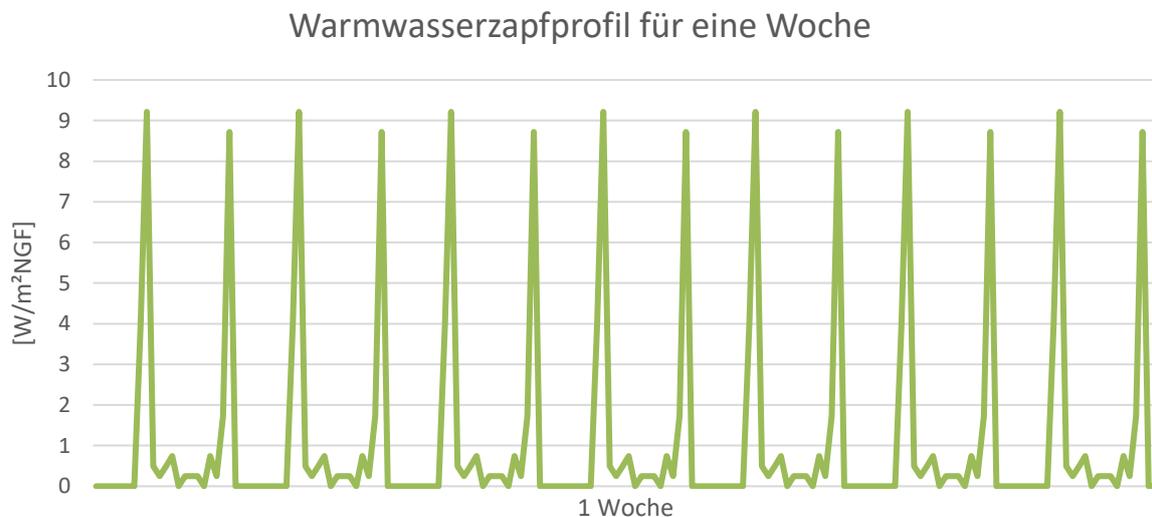


Abbildung 6: Warmwasserzapfprofil für eine Woche (Drees & Sommer)

Für den Strombedarf soll ebenfalls ein Profil hergeleitet werden. Hierfür wird zunächst der durchschnittliche Strombedarf für Haushalte in Deutschland ermittelt (vgl. Tabelle 1). Die Werte werden dabei teilweise über die Personenanzahl in Haushalten und die durchschnittliche Wohnfläche in Deutschland auf einen einheitlichen Bezug umgerechnet.

Tabelle 1: Durchschnittlicher Stromverbrauch pro m² Wohnfläche in Deutschland

Quelle	Durchschnittlicher Verbrauch		Quelle
	EFH [kWh/(m ² WF*a)]	MFH [kWh/(m ² WF*a)]	
Stromspiegel für Deutschland 2016	39	25	[6]
BDEW - Stromverbrauch im Haushalt	35	30	[7]
Destatis	42		[8]
Energieagentur NRW	31		

Als Verbrauchs- bzw. Bedarfswerte für den Stromverbrauch für elektrische Anwendungen werden 36 kWh/(m²NGF*a) für Einfamilienhäuser und 25 kWh/(m²NGF*a) für Mehrfamilienhäuser festgelegt. Das eigentliche Profil wird mit dem LoadProfileGenerator [9] der TU Chemnitz erzeugt. Mit diesem können Haushaltslastprofile für Strom, Gas, Warmwasser und Kaltwasser unter Berücksichtigung verschiedener Nutzerrandbedingungen erzeugt werden. Da im vorliegenden Fall dieses Projekts jedoch nur ein Profil für die Nutzung Wohnen verwendet werden soll, wird ein Mischprofil aus den folgenden typischen Einzelprofilen erzeugt. Die Zusammensetzung der einzelnen Profile beruht auf langjährigen Projekterfahrungen von Drees & Sommer.

Tabelle 2: Nutzungsprofile zur Erstellung eines Lastprofils

CHR01	Couple both at work
CHR02	Couple, 30 -64 age, with work
CHR03	Family, 1 child, both at work
CHR04	Couple, 30 -64 age, 1 at work, 1 at home
CHR05	Family, 3 children, both with work
CHR07	Single with Work
CHR15	Multigenerational Home, working couple, 2 children, 2 seniors
CHR16	Couple over 65 years
CHR41	Family with 3 children, both at work
CHR44	Family with 2 children, 1 at work, 1 at home

Das daraus erzeugte Mischprofil wird dann auf die Verbrauchs- bzw. Bedarfswerte für Ein- und Mehrfamilienhäuser skaliert. Abbildung 7 zeigt die daraus resultierende Stromganglinie für ein Einfamilienhaus.

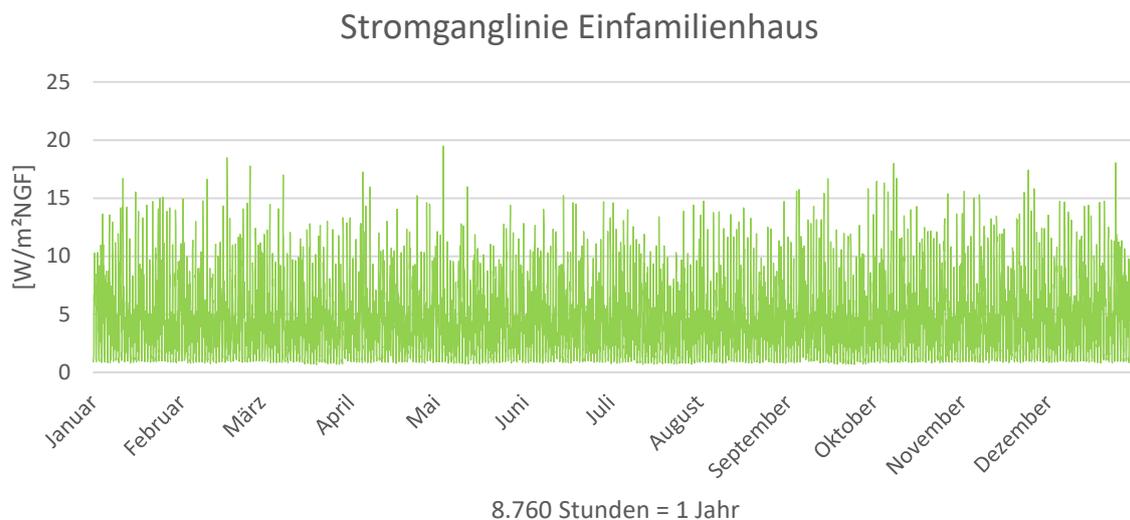


Abbildung 7: Stromganglinie Einfamilienhaus

Zusammenfassung

Mittels TRNSYS-Gebäudesimulationsmodellen und den Randbedingungen der Wohngebäudetypologie des IWU sind für alle Gebäudetypen und Baualtersklassen entsprechende stündliche Lastprofile verfügbar. Zudem liegen Zapfprofile für die Warmwasserbereitstellung und, basierend auf dem durchschnittlichen Stromverbrauch Deutschlands, Stromlastprofile für die Wohnnutzung vor. Insgesamt sind damit 49 stündliche Lastprofile für den Nutzenergiebedarf an Wärme für Wohngebäude und jeweils zwei Lastprofile je für Ein- und Mehrfamilienhaus für Warmwasser sowie ein gemeinsames Stromlastprofil für die Wohnnutzung verfügbar. Diese sind im Anhang zu finden.

Für die Analyse städtischer Quartiere sind nicht nur Profile für Wohngebäude notwendig, sondern auch für Nicht-Wohngebäude. Auf diese wird in Abschnitt 3.2.2 eingegangen. Zudem sind zu den oben erwähnten 49 Profilen, die den Basiszustand des jeweiligen Gebäudetyps abbilden, weitere Untervarianten simuliert worden, die unterschiedliche Sanierungsvarianten (Parametervarianten der Gebäudehülle) abbilden. Darauf wird im Zusammenhang mit der Erläuterung zu den Energieeinspar- und Energieeffizienzsteigerungsmaßnahmen in Abschnitt 4.5.1 eingegangen.

2.2 Verkehrsmodell

Das entwickelte Verkehrsmodell liefert ein standardisiertes Verfahren zur raumspezifischen Darstellung des Mobilitätsverhaltens der Wohnbevölkerung und des Arbeiter- und Ausbildungsverkehr. Basierend auf der Datengrundlage der Mobilität in Deutschland Studie (MID) [10] und der räumlichen Einteilung nach Raumtypen durch das Bundesinstitut für Bau, Stadt- und Raumforschung (BBSR) [11] konnte ein Modell entwickelt werden, welches eine Darstellung der jährlich zurückgelegten Fahrzeugkilometer für die Wohnbevölkerung sowie den Arbeiter- und Ausbildungsverkehr für konventionell¹ angetriebene

¹ Fahrzeuge welche mit einem Verbrennungsmotor angetrieben werden

Fahrzeuge im Personenverkehr in einer Raumeinheit ermöglicht. Jede Kommune in Deutschland ist einem der insgesamt 409 Land- und Stadtkreise zugeordnet. Anhand der Raumtypen kann eine individuelle Ausweisung der Fahrleistung nach dem Verursacherprinzip stattfinden. Die Fahrleistung wird somit einem Raumtyp zugeordnet und kann durch die Anzahl der Bewohner und Beschäftigten in diesem Raum berechnet werden. Folgende BBSR Raumtypeneinteilung (vgl. auch Abbildung 8) wurde zugrunde gelegt:

- | | |
|--------------------------|--|
| 1.) Agglomerationsraum- | Kernstädte
Hochverdichtete Kreise
Verdichtete Kreise
Ländliche Kreise |
| 2.) Verstädterte Räume - | Kernstädte
Verdichtete Kreise
Ländliche Kreise |
| 3.) Ländliche Räume- | Ländliche Kreise höherer Dichte
Ländliche Kreise geringerer Dichte |

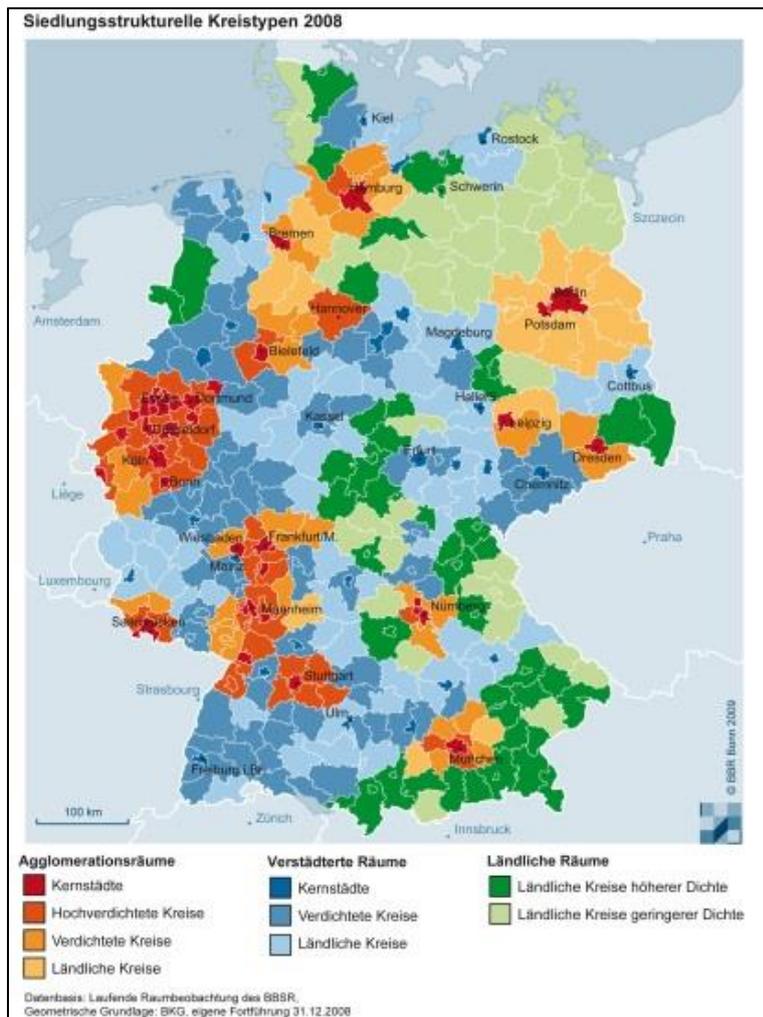


Abbildung 8: Raumbeobachtung des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung [11]

Jedem BBSR Raumtyp können aus der Datenbank der MID eindeutig folgende Verkehrsparameter zugeordnet werden:

- Modal Split (Prozentualer Anteil der konventionellen Fahrzeugnutzer Fahrer + Beifahrer)
- Wegehäufigkeit
- Wegelänge
- Besetzungsgrad
- Anzahl der Berechnungstage

Des Weiteren fließen folgende Parameter in die Berechnung, die aus Daten des Kraftfahrtbundesamtes [12] sowie des deutschen Mobilitätspanel (MOP) [13] errechnet werden, ein:

- Anteil konventionell betriebener Fahrzeuge am Gesamtfahrbestand
- Anteil des Wohnbevölkerungsverkehrs bzw. der Anteil an Arbeit und Ausbildungsverkehrs
- Abminderungsfaktor nicht konventionell betriebener Fahrzeuge (im Bestand 0,06% E-Fahrzeuge)

Ergänzt durch die Anzahl der Einwohner und Beschäftigten errechnet sich die jährliche Fahrleistung (zurückgelegte Fahrzeugkilometer / Jahr pro Raumeinheit) nach dem Verursacherprinzip. Eine Differenzierung der Wege, die dem Wohnort und dem Arbeits- und Ausbildungsort zugewiesen werden ist deshalb notwendig. Eine Berücksichtigung der Freizeitwege, die sowohl dem Wohnort als auch dem Arbeits- und Ausbildungsort zugewiesen werden ist ebenfalls berücksichtigt. Die Aufteilung der Wege nach Wegezwecken erfolgt nach dem Ansatz der im MOP erhoben wurden (siehe Abbildung 9).

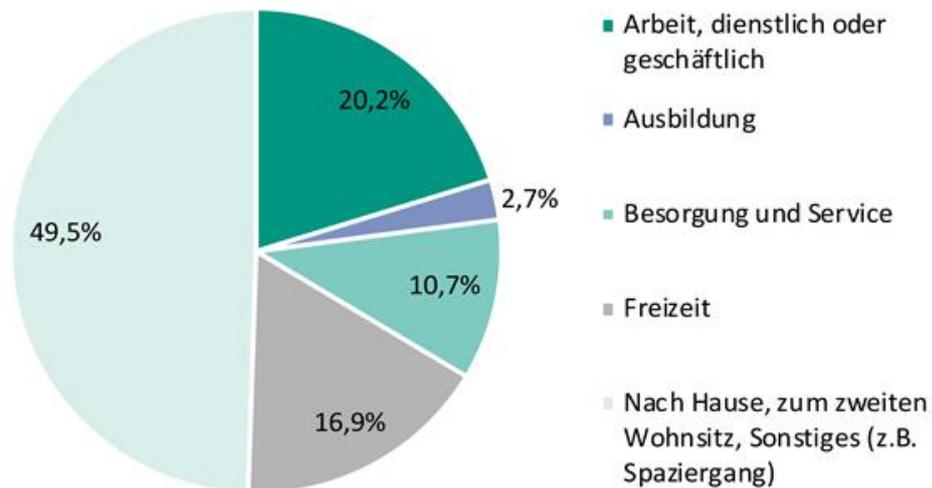


Abbildung 9: Aufteilung der Mobilität nach Wegezwecken des Deutschen Mobilitätspanels [13]

Die Einbeziehung der Wegezwecke erfolgt entsprechend der Daten aus dem MOP. Die Kategorien für Wegezwecke im MOP sind: Wege nach Hause, Besorgung und Service, Freizeit, Arbeit (dienstlich oder geschäftlich) und Ausbildung. Durch diese Aufteilung können die Fahrleistungen adäquat im Verkehrsmodell abgebildet werden. Die Einteilung erfolgt entsprechend der im MOP ausgewiesenen Anteile der Wegezwecke und wird den im Verkehrsmodell vorgesehenen Hauptbereichen des Wohnbevölkerungsverkehrs sowie Arbeits- und Ausbildungsverkehrs räumlich zugewiesen.

Dem Wohnbevölkerungsverkehr werden die Bereiche Wege nach Hause, Besorgung und Service und die Hälfte des Freizeitverkehrs zugewiesen. Insgesamt fallen somit dem Wohnbevölkerungsverkehr 68,65% aller anfallenden Wege zu. Dem Arbeits- und Ausbildungsverkehr werden die Bereiche Arbeit (dienstlich oder geschäftlich), Ausbildung und die Hälfte des Freizeitverkehrs zugewiesen. Insgesamt fallen somit dem Arbeits- und Ausbildungsverkehr 31,35 % aller anfallenden Wege zu.

Die Fahrleistungen werden entsprechend der Einteilung dem Wohn- bzw. Arbeits- und Ausbildungsort zugewiesen. Mithilfe der Einwohnerzahl und dem oben beschriebenen Anteil des Wohnbevölkerungsverkehrs (68,65 %) kann eine Abschätzung der Fahrleistung im MIV für den durch Bewohner verursachten Verkehr für eine Raumeinheit dargestellt werden.

Über die Anzahl an beschäftigten Personen und dem oben beschriebenen Anteil des Arbeits- und Ausbildungsverkehrs (31,35 %) kann eine Abschätzung der Fahrleistung im MIV des durch Arbeiter und Auszubildende verursachten Verkehr für eine Raumeinheit dargestellt werden.

Durch die Zuteilung der Wege in Wohnbevölkerungs- und Arbeits- und Ausbildungsverkehr muss, um eine doppelte Berechnung zu verhindern, die Anzahl der Wege jeweils um die Hälfte reduziert werden.

Die Anzahl der Tage wird im Arbeits- und Ausbildungsverkehr auf 230 Arbeitstage und im Wohnbevölkerungsverkehr auf 365 Tage pro Jahr festgelegt.

2.2.1 Methodische Grundlagen

Im Folgenden werden die Formeln, die für die Verkehrsmodellberechnung der Fahrleistung angesetzt wurden, dargestellt.

Die Fahrleistungen des motorisierten Individualverkehrs (nur konventioneller Pkw) werden aus dem Produkt der Anzahl der Fahrzeuge und der von ihnen zurückgelegten Wegen je Zeiteinheit jeweils für den Zweck Wohnen oder Arbeiten und Ausbildung berechnet [14].

Für den Wohnverkehr sowie den Arbeits- und Ausbildungsverkehr wird die Fahrleistung innerhalb eines Bilanzraums mit gemeindesspezifischen Parametern, die der BBSR / MID Datenbank entnommen werden können, bestimmt. Beim Wohnverkehr dient die Anzahl der Einwohner (EW_V) sowie 365 Tage im Jahr als Berechnungsgrundlage. Beim Arbeits- und Ausbildungsverkehr dienen die Anzahl der Erwerbstätigen (ErW) und die Arbeitstage (230) als Berechnungsgrundlage. Zusätzlich wird ein individueller Besetzungsgrad der Fahrzeuge für den Arbeits- und Ausbildungsverkehr berücksichtigt. Die Daten für die Berechnung liefert der für den Wohn- bzw. Arbeits- und Ausbildungsverkehr angepasste jeweils raumspezifische Modal Split, sowie typische Wegelängen und Häufigkeiten aus dem Verkehrsmodell, welcher durch die Werte aus der MID-Studie gespeist wird. Gleichung 1 stellt die allgemeine Berechnung der Fahrleistungen je Zweck der Fahrt dar, die in Abhängigkeit des Betrachtungsraums individuell errechnet werden können. Zu beachten ist, dass die Wegeanzahl halbiert wird, da die Wegelänge sowohl die Hinfahrt, als auch die Rückfahrt beinhaltet.

$$FL, V_{Zw} = \left(MS_{R,Zw} * WL_{R,Zw} * \frac{WA_{R,Zw}}{2} * \frac{Pers_{Zw}}{BG, V_{R,Zw}} \right) * nTage_{Zw} * Sh_{Zw} * V_{konv} \quad \text{Gleichung 1}$$

mit:

FL, V_{Zw} –	Fahrleistung je Fahrzeug pro Jahr für Zweck Wohnen oder Arbeiten [Fz.km/a]
$MS_{R,Zw}$ –	raumspezifischer Modal Split Anteil MIV für Zweck Wohnen oder Arbeiten [%]
$WL_{R,Zw}$ –	raumspezifische Wegelänge für Zweck Wohnen oder Arbeiten [km]
$WA_{R,Zw}$ –	Wegeanzahl für Zweck Wohnen oder Arbeiten [#]
$Pers_{Zw}$ –	Einwohner oder Erwerbstätige [#]
$BG, V_{R,Zw}$ –	Besetzungsgrad des Fahrzeugs für Zweck Wohnen oder Arbeiten [Personen/Fahrzeug]
$nTage_{Zw}$ –	Anzahl der Tage für Verkehr mit Zweck Wohnen oder Arbeiten [#]
Sh_{Zw} –	Anteil der Fahrten, die auf Zweck Wohnen oder Arbeiten zurückgeführt werden [%]
V_{konv} –	Anteil der Fahrten, die mit konventionellen Fahrzeugen zurückgelegt werden [%]

Die jährlichen Fixkosten je Fahrzeug berechnen sich, nach Gleichung 2, aus der Summe der anfallenden Kosten aus Steuern und Versicherungen. Als Berechnungsgrundlage für die CO₂-Emissionen und Kosten wird ein konventionelles Mittelklasse-Fahrzeug (Golf TDI 4MOTION BlueMotion Technologie Trendline, Diesel) angesetzt. Die genauen technischen Eigenschaften des Fahrzeugs sind in Anhang B

aufgelistet. Für Steuern und Versicherung werden fixe Werte, welche getrennt für das E-Fahrzeug und das Referenzfahrzeug ermittelt wurden, angesetzt.

$$Kf = K_S + K_{ver} \quad \text{Gleichung 2}$$

mit:

Kf – annuisierte fixe Kosten je Fahrzeug pro Jahr [€/a]

K_S – annuisierte Kosten der anfallenden Steuer je Fz pro Jahr [€/Jahr]

K_{ver} – annuisierte Kosten der anfallenden Versicherung je Fz pro Jahr [€/Jahr]

Die annuisierten Investitionen werden durch eine Verteilung auf die veranschlagte Nutzungsdauer eines Pkw und eine jährliche Verzinsung umgelegt und nach Gleichung 3 berechnet. Dabei enthalten die Investitionen K_i ebenfalls den Barwert der Ersatzinvestitionen, die für den Fall, dass der Betrachtungszeitraum über die technische Lebensdauer des Fahrzeugs hinausgeht.

$$K_i = \frac{(1 + \text{Zinssatz})^{Nd} * \text{Zinssatz}}{((1 + \text{Zinssatz})^{Nd} * \text{Zinssatz}) - 1} * K_{Pkw} \quad \text{Gleichung 3}$$

mit:

K_i – annuisierte Investition je Fahrzeug [€]

Zinssatz – angesetzter interner Zinssatz [%]

Nd – Nutzungsdauer des Pkw [Jahr]

K_{Pkw} – Anschaffungskosten des Pkw [€]

Für die Berechnungen der jährlichen summierten variablen Kosten werden eine mittlere Jahresfahrleistung von 15.000 km/a*Fz und ein Kraftstoffverbrauch von 0,058 l/km angesetzt. Mit Gleichung 4 werden die pro Fahrzeug jährlich anfallenden variablen Kosten durch die Bildung des Produkts aus der Fahrleistung je Fahrzeug pro Jahr und der Menge an Kraftstoffverbrauch pro Kilometer ermittelt.

$$Kv = (MS_{R,Zw} * WL_{R,Zw} * \frac{WA_{R,Zw}}{2} * nTage_{Zw}) * K_{Ks} \quad \text{Gleichung 4}$$

mit:

Kv – annuisierte variable Kosten je Fahrzeug pro Jahr [€/a]

$MS_{R,Zw}$ – Wert Modal Split Anteil MIV für Zweck Wohnen oder Arbeiten [%]

$WL_{R,Zw}$ – Wegelänge für Zweck Wohnen oder Arbeiten [km]

$WA_{R,Zw}$ – Wegezähl für Zweck Wohnen oder Arbeiten [#]

$nTage_{Zw}$ – Anzahl der Tage für Verkehr mit Zweck Wohnen oder Arbeiten [#]

K_{Ks} – Kraftstoffverbrauch [L/km]

Für die Berechnung der Kosten und Emissionen, verursacht durch die Fahrleistungen, gelten die im Folgenden dargestellten Formeln, die bezogen auf die quantifizierbaren Maßnahmenbereiche, einzeln präsentiert werden.

Die jährlichen CO₂ Emissionen bedingt durch den Wohn-, Arbeits- und Ausbildungsverkehr werden im Folgenden dargestellt. Unter Berücksichtigung der spezifischen Parameter für das jeweilige Untersuchungsgebiet wird der CO₂ Ausstoß entsprechend dem gewählten Referenzfahrzeug (vgl. Anhang B) von 129 g/km angesetzt [15]. Gleichung 5 zeigt die Berechnung des jährlich anfallenden CO₂ Ausstoßes für den Maßnahmenzustand nach Realisierung des Emissionsreduktionspotenzials. Bestimmt wird dies aus dem Produkt der Anzahl der Fahrzeuge des jeweiligen Fahrtzwecks, der Differenz des Reduzierungspotenzials der E-Fahrzeuge und der CO₂ Emission je Fahrzeug. Der erste Term stellt dabei eine mathematische Umstellung der Gleichung 1 zur Ermittlung der Anzahl der Fahrzeuge, die für den entsprechenden Zweck benötigt werden, dar.

$$CO_{2\text{ Aus,E}} = \frac{FL, V_{Zw}}{(MS_{R,Zw} * WL_{R,Zw} * \frac{WA_{R,Zw}}{2} * nTage_{Zw})} * (1 - (EPkw_{Maß} - EPkw_{IST})) * CO_{2\text{ Emi}} \quad \text{Gleichung 5}$$

mit:

CO ₂ Aus,E –	Ausstoß CO ₂ pro Jahr bei der Umsetzung der Maßnahme E-Mobilität [CO ₂ /Jahr]
FL, V _{Zw} –	Fahrleistung je Fahrzeug pro Jahr für Zweck Wohnen oder Arbeiten [Fz.km/a]
MS _{R,Zw} –	raumspezifischer Modal Split Anteil MIV für Zweck Wohnen oder Arbeiten [%]
WL _{R,Zw} –	raumspezifische Wegelänge für Zweck Wohnen oder Arbeiten [km]
WA _{R,Zw} –	raumspezifische Wegeanzahl für Zweck Wohnen oder Arbeiten [#]
nTage _{Zw} –	Anzahl der Tage für Verkehr mit Zweck Wohnen oder Arbeiten [#]
EPkw _{IST/Maß} –	Anteil E-Fahrzeuge für den IST- und Maßnahmenzustand [%]
CO ₂ Emi –	spezifische CO ₂ Emissionen pro Fahrzeug je km [g/km]

Bereich E-Mobilität

Die Maßnahme E-Mobilität stellt das Reduzierungspotential der CO₂ Emissionen durch den Einsatz von E-Fahrzeugen, anstelle von konventionellen Fahrzeugen dar. Die Kosten und Emissionen für die Maßnahme E-Mobilität berechnen sich nach Gleichung 6 durch Bildung der Summe der fixen (Gleichung 2) und variablen Kosten (Gleichung 4) sowie aus den annuisierten Investitionen (Gleichung 3) die im betrachteten Zeitraum anfallen.

$$GK_{IST/Maß} = Kf + Kv + Ki \quad \text{Gleichung 6}$$

mit:

GK _{IST/Maß} –	annuisierte Gesamtkosten je Fahrzeug pro Jahr [€/a]
Kf –	annuisierte fixe Kosten je Fahrzeug pro Jahr [€/a]
Kv –	annuisierte variable Kosten je Fahrzeug pro Jahr [€/a]
Ki –	annuisierte Investitionen je Fahrzeug [€]

Berechnet wird das Reduzierungspotential über den Anteil an E-Fahrzeugen am Gesamtfahrzeugbestand der je nach gewähltem Szenario höher oder niedriger liegt. Da angenommen wird, dass E-Fahrzeuge durch den verursachten Stromverbrauch lokal keine Emissionen ausstoßen, wird der

Gesamtfahrzeugbestand im Maßnahmenfall durch Wegfall dieser in der Berechnung reduziert und somit eine Einsparung der CO₂ Emissionen erreicht.

Um die zu investierenden Kosten nach Gleichung 7, welche als Einsparungskosten für die Kommunen bzw. für das Quartier anfallen, zu berechnen, wird der Quotient aus der Differenz der Gesamtkosten (IST-/ Maßnahmenzustand) mit dem Produkt der Differenz der Anteile der E-Fahrzeuge für den IST- und Maßnahmenzustands und den CO₂ Emissionen ermittelt. Die Gesamtkosten je Fahrzeug pro Jahr werden für den IST- und den Maßnahmen Zustand nach Gleichung 6 ermittelt.

$$K_{Ma\beta} = \frac{(GK_{Ma\beta} - GK_{IST})}{(EPkw_{Ma\beta} - EPkw_{IST}) * CO_2_{Abs}} \quad \text{Gleichung 7}$$

mit:

- $K_{Ma\beta}$ – durchschnittliche Kosten für die Umsetzung der CO₂ Einsparmaßnahme [€/t CO₂*a]
- $GK_{IST/Ma\beta}$ – Gesamtkosten je Fahrzeug pro Jahr [€/a]
- $EPkw_{IST/Ma\beta}$ – Anteil E-Fahrzeuge für den IST- und Maßnahmenzustand [%]
- CO_2_{abs} – CO₂ Emissionen pro Fahrzeug pro Jahr [t CO₂ /a]

Bereich Carpooling

Die Kosten und Emissionseinsparungen für die Maßnahme Carpooling berechnen sich nach Gleichung 8 durch Bildung des Produkts aus der Summe der fixen Kosten (Gleichung 2), variablen Kosten (Gleichung 4) sowie den annuisierten Investitionen (Gleichung 3) die im betrachteten Zeitraum anfallen sowie des Besetzungsgrades.

$$GK_{IST/Ma\beta} = \frac{(Kf + Kv + Ki)}{BG, V_{Zw}} \quad \text{Gleichung 8}$$

mit:

- $GK_{IST/Ma\beta}$ – Gesamtkosten je Fahrzeug pro Jahr [€/a]
- Kf – annuisierte fixe Kosten je Fahrzeug pro Jahr [€/a]
- Kv – annuisierte variable Kosten je Fahrzeug pro Jahr [€/a]
- Ki – annuisierte Investitionen je Fahrzeug [€]
- BG, V_{Zw} – Besetzungsgrad des Fahrzeugs für Zweck Wohnen oder Arbeiten [Personen/Fahrzeug]

Die jährlichen CO₂ Emissionen bedingt durch den Wohn- und Arbeits- und Ausbildungsverkehr werden nach Gleichung 9 berechnet. Für den Maßnahmenbereich Carpooling, werden für den Zweck Arbeiten- und Ausbildungsverkehr die jährlichen CO₂ Emissionen aus dem Produkt der Anzahl der Pkw und den zugrunde gelegten CO₂ Emissionen pro Jahr berechnet. Durch die Erhöhung des Besetzungsgrades (BG, V_{Zw}) reduziert sich die Anzahl der genutzten Pkws (siehe Gleichung 1).

$$CO_2_{Aus,E} = \frac{FL, V_{Zw,IST/Ma\beta}}{(MS_{R,Zw} * WL_{R,Zw} * \frac{WA_{R,Zw}}{2} * nTage_{Zw})} * CO_2_{Emi} \quad \text{Gleichung 9}$$

mit:

- $CO_2_{Aus,E}$ – Ausstoß CO_2 pro Jahr bei der Maßnahme Carpooling [CO_2 /Jahr]
- $FL, V_{Zw,IST/Maß}$ – Fahrleistung je Fahrzeug pro Jahr für Zweck Wohnen oder Arbeiten [Fz.km/a]
- $MS_{R,Zw}$ – raumspezifischer Modal Split Anteil MIV für Zweck Wohnen oder Arbeiten [%]
- $WL_{R,Zw}$ – raumspezifische Wegelänge für Zweck Wohnen oder Arbeiten [km]
- $WA_{R,Zw}$ – raumspezifische Wegeanzahl für Zweck Wohnen oder Arbeiten [#]
- $nTage_{Zw}$ – Anzahl der Tage für Verkehr mit Zweck Wohnen oder Arbeiten [#]
- CO_2_{Emi} – spezifische CO_2 Emissionen pro Fahrzeug je km [g/km]

Nach Gleichung 10 werden die, von der Kommune, zu leistenden Investitionen ermittelt. Berechnet wird dies aus der Differenz der Gesamtkosten je Fahrzeug, der Anzahl der Fahrzeuge des IST- bzw. Maßnahmenzustands sowie spezifisch anfallenden CO_2 - Emissionen je Fahrzeug. Die Gesamtkosten der Maßnahme und des IST-Zustandes werden nach Gleichung 8 ermittelt.

$$K_{Maß} = (GK_{Maß} - GK_{IST}) * \left(\frac{FL, V_{Zw,IST/Maß}}{(MS_{R,Zw} * WL_{R,Zw} * \frac{WA_{R,Zw}}{2} * nTage_{Zw})} \right) * CO_2_{Emi} \quad \text{Gleichung 10}$$

mit:

- $K_{Maß}$ – Kosten für die Umsetzung der CO_2 Einsparmaßnahme [€/t CO_2 *a]
- $GK_{IST/Maß}$ – Gesamtkosten je Fahrzeug pro Jahr [€/a]
- $FL, V_{Zw,IST/Maß}$ – Fahrleistung je Fahrzeug pro Jahr für Zweck Wohnen oder Arbeiten [Fz.km/a]
- $MS_{R,Zw}$ – Wert Modal Split Anteil MIV für Zweck Wohnen oder Arbeiten [%]
- $WL_{R,Zw}$ – Wegelänge für Zweck Wohnen oder Arbeiten [km]
- $WA_{R,Zw}$ – Wegeanzahl für Zweck Wohnen oder Arbeiten [#]
- $nTage_{Zw}$ – Anzahl der Tage für Verkehr mit Zweck Wohnen oder Arbeiten [#]
- CO_2_{Emi} – spezifische CO_2 Emissionen pro Fahrzeug je km [g/km]

Bereich Stärkung Umweltverbund

Der jährliche CO_2 Ausstoß für die Maßnahme Stärkung des Umweltverbundes wird nach Gleichung 11 aus dem Produkt der Fahrleistungen des Arbeitsverkehrs und den spezifischen CO_2 Emissionen ermittelt.

$$CO_2_{Aus,U} = FL, V_{Zw} * CO_2_{Emi} \quad \text{Gleichung 11}$$

mit:

- $CO_2_{Aus,U}$ – Ausstoß CO_2 pro Jahr für die Maßnahme Stärkung Umweltverbund [CO_2 /Jahr]
- FL, V_{Zw} – Fahrleistung je Fahrzeug pro Jahr für Zweck Arbeiten [Fz.km/a]
- CO_2_{Emi} – spezifische CO_2 Emissionen pro Fahrzeug je km [g/km]

Güterverkehr

Der Güterverkehr wird in der MiD-Studie nicht ausgewiesen, Fahrleistungen im Güterverkehr können aus diesem Grund nicht auf eine spezifische räumliche Bezugseinheit übertragen werden. Für den Güterverkehr wurde basierend auf der Verflechtungsprognose eine Auswertung generiert [16]. Diese basiert auf Datenpunkten zu Start- und Zielpunkten von Verkehrsteilnehmern sowie den verwendeten Verkehrsmitteln und den transportierten Gütern. Aus der Datenbank der Verflechtungsprognose, wurden die Fahrleistungen in tkm im Schwerlastverkehr aufbereitet und entsprechend ihrer Empfangsregionen in Vorlauf, Hauptlauf und Nachlauf unterteilt, um für die eigentliche Empfangsregion einen Wert für die Fahrleistung im Straßengüterverkehr darstellen zu können. Die Darstellung hat rein informativen Charakter und kann aufgrund der Datenunschärfe für einen Maßnahmenfall nicht konkret eingesetzt werden.

Eine Berechnung für das Aufkommen der Fahrleistung in tkm, welche der jeweiligen Kommune zugeordnet werden kann, wird nach Gleichung 12 berechnet.

$$FL_{LKW} = VL_{LKW} + HL_{LKW} + NL_{LKW} \quad \text{Gleichung 12}$$

mit:

- $FL_{LKW, Ko}$ – Gesamtsumme der gefahrenen tkm in der Kommune Ko [tkm/a]
- $VL_{LKW, Ko}$ – im Vorlauf gefahren tkm [tkm/a]
- $HL_{LKW, Ko}$ – im Hauptlauf gefahren tkm [tkm/a]
- $NL_{LKW, Ko}$ – im Nachlauf gefahren tkm [tkm/a]

Exemplarisch sollen nachfolgende Beispiele die Berechnung verdeutlichen:

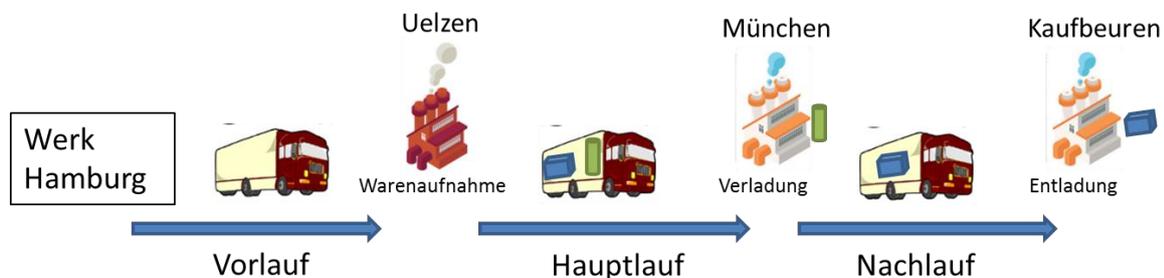


Abbildung 10: Warentransport nach Verflechtungsprognose Güterverkehr

Die Berechnung der Fahrleistung im Güterverkehr wird in 3 "Läufe" aufgeteilt, den Vorlauf, den Hauptlauf und den Nachlauf. Ein Lkw fährt beispielsweise in Hamburg ohne Ladung ab. Diese Fahrt wird als Vorlauf bezeichnet. Es erfolgt die Warenaufnahme in Uelzen von wo der voll beladene Lkw in Richtung München aufbricht. Dies wird als Hauptlauf bezeichnet. In München erfolgt eine Teilentladung der Ware. Danach fährt der Lkw weiter nach Kaufbeuren, wo er komplett entladen wird. Diese Fahrt zwischen München und Kaufbeuren wird als Nachlauf bezeichnet. In Kaufbeuren kann nun wieder ein neuer Warentransport erfolgen.

Kritische Betrachtungsweise zum erarbeiteten Verkehrsmodell

Bei dem für dieses Forschungsprojekt zum Einsatz gekommenen Verkehrsmodell handelt es sich im Vergleich zu klassischen Ansätzen um ein Modell zur Berechnung der Fahrleistung in einem Gebiet, anhand des Verursacherprinzips.

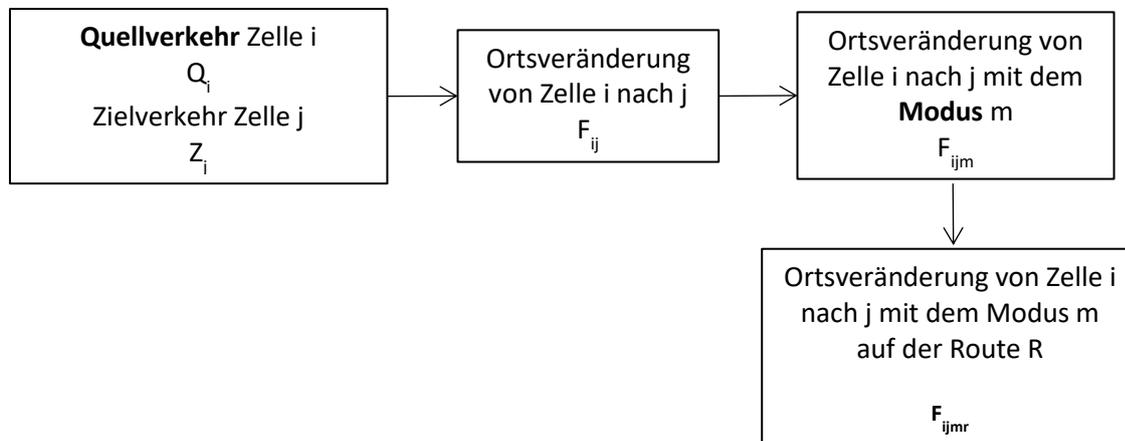


Abbildung 11: Verkehrsmodell Vier-Stufen-Algorithmus

Die Fahrleistung wird beim klassischen Verkehrsmodell dem Verkehrsträger zugeordnet und der Anteil des Weges wird dem Straßenabschnitt im Gebiet zugeordnet. Folgende Eigenschaften bezüglich des klassischen "Vier-Stufen-Verkehrsmodell" (vgl. Abbildung 11) und des Verkehrsmodells, welches im Zuge des Forschungsprojekts erarbeitet wurde, sind zu berücksichtigen.

1. Daten des Verkehrsaufkommens werden im Zuge der Verkehrsplanung generiert und in Verkehrsmodellen ("Vier-Stufen-Algorithmus") verwendet.
2. Durch die Modellierung können Aussagen zur Verkehrsqualität bzw. der Leistungsfähigkeit sowie zu den Verkehrsauswirkungen in einem bestehenden oder geplanten Straßennetz dargestellt werden.
3. Der ursprüngliche Ansatz der Darstellung der Verkehrsbelastungen im Straßennetz nach dem klassischen Vier-Stufen-Algorithmus ist nicht möglich, da eine Verknüpfung mit den Fahrleistungen aus der MID nicht abgebildet werden kann.
4. Die Verknüpfbarkeit von Gebäude und Verkehr ist aufgrund der fehlenden Datenbasis nicht in dem Maße möglich, wie im ersten Ansatz angedacht.
5. Die Betrachtung des Güterverkehrs und Verkehrserzeugung für Gewerbeflächen ist deshalb nicht möglich. Es kann nur die Fahrleistung abgebildet werden, die durch Wohnbebauung und die Wohnbevölkerung erzeugt wird.
6. Jede Kommune ist bei der Berechnung einem Landkreis/BBSR Region zugeordnet. Die Einteilung der BBSR-Raumtypen ist kritisch zu sehen. Die Einteilung differenziert z.B. in Schleswig-Holstein nur die BBSR-Raumtypen verstädterter Raum und ländlicher Raum. Die Stadt Kiel oder der Stadtkreis Flensburg ist verkehrsinfrastrukturell eher wie ein Agglomerationsraum ausgestattet. Die Realität kann daher nur bedingt abgebildet werden.

Der gewählte Ansatz bietet dem Nutzer die Möglichkeit eine Abschätzung verkehrlicher Aspekte mit in die energetische Betrachtung eines Quartiers einfließen zu lassen, die über dem derzeitigen Stand der Technik liegen.

2.3 Integrierte Energiesystemmodellierung mit TIMES Local

Für die Modellierung von Energiesystemen oder auch nur Teilen davon hat sich der Modellgenerator TIMES (The Integrated Market Eform System) bewährt, das einen prozessanalytischen, dynamischen, optimierenden Energiesystemmodellgenerator darstellt. TIMES wurde innerhalb des Implementing Agreement des Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP) der Internationalen Energieagentur (IEA) entwickelt [17, 18]. Mit der Hilfe von TIMES wird ein Energiesystem technologisch detailliert als ein Netzwerk von Prozessen (z. B. Kraftwerkstypen, Verkehrstechnologien) und Gütern (Energieträgern, -formen, Material) in Form eines sogenannten Referenzenergiesystems abgebildet. Durch Angabe von Rahmenbedingungen lassen sich unterschiedliche Fragestellungen formulieren, wie die kostengünstigste Umsetzung von Klimaschutz-Zielen unter Einhaltung technischer und ökologischer Restriktionen. Vorgegeben werden bei der Optimierung in der Regel der anfängliche Anlagenbestand, die zukünftige Entwicklung der Einstandspreise und der Energienachfrage sowie die die Technologien und Energieträger charakterisierenden Parameter. Als Ergebnis der Optimierung erhält man die Ausgestaltung des Technologiebestands, d. h. die Art und Umfang (Kapazitäten) der Technologien sowie den benötigten Energieeinsatz, differenziert nach Energieträgern.

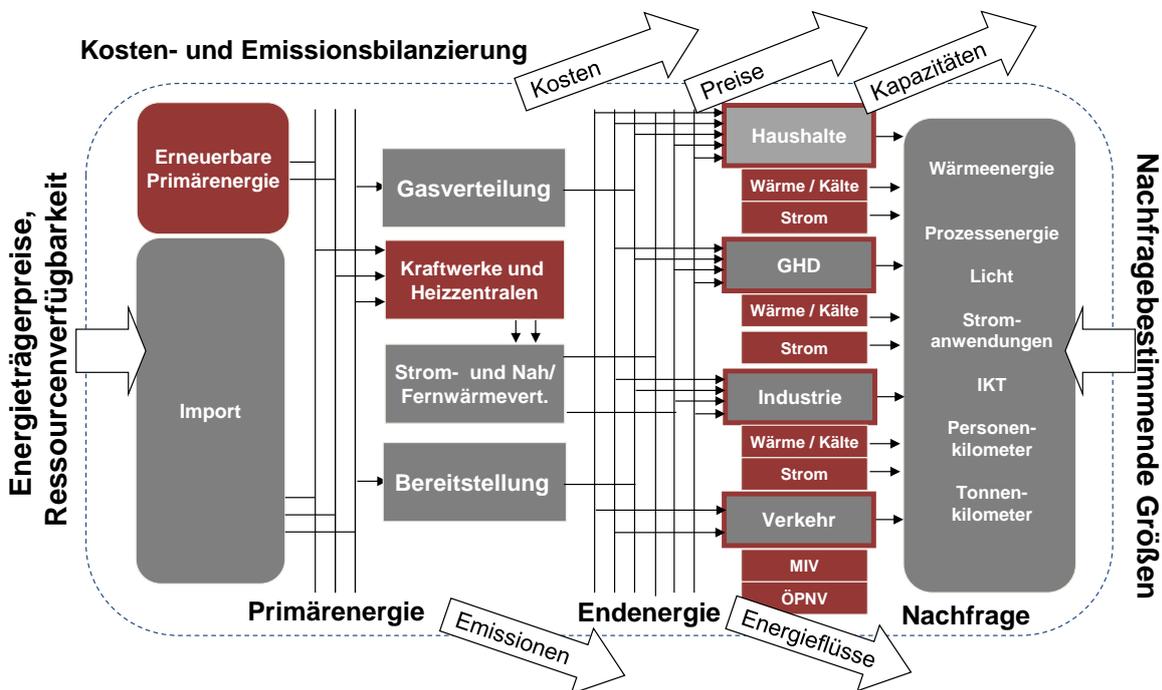


Abbildung 12: Referenzenergiesystem TIMES Local

TIMES Local [19] stellt eine Anwendung des TIMES Modellgenerators mit dem Schwerpunkt auf der Betrachtung von denjenigen Prozessen dar, die für ein Stadt- oder Quartiersmodell relevant sind. Die

Gewinnung und Verarbeitung von Rohstoffen, wie beispielsweise Kohle, Öl oder Erdgas ist für ein solches Modell nicht in dem Maße relevant wie die vorhandenen Wärmebereitstellungstechnologien, die für die Wärmeversorgung der Wohn- und Nichtwohngebäude benötigt werden. Es werden daher diejenigen Bestandteile des Modells genauer aufgelöst, die für die Problemstellungen einer Stadt oder eines Quartiers vorliegen. Eine Übersicht der Modellstruktur liefert Abbildung 12.

Nachfrageseitig wird zwischen sechs verschiedenen Wohngebäudetypen (jeweils drei für den Bestand und Neubau) unterschieden. Des Weiteren wird der GHD Sektor in kleine und große Nichtwohngebäude unterteilt. Im Verkehrssektor wird im motorisierten Individualverkehr zwischen Kurz- und Langstrecken sowie zwischen ÖPNV und Nutzverkehr differenziert. Bei der Abbildung der Industrie wird zwischen der energieintensiven und nicht-energieintensiven Industrie unterschieden. Die nicht-energieintensive Industrie wird nicht branchenspezifisch differenziert. Für jede Nachfragekategorie ist ein separates Technologieportfolio zur Bereitstellung der entsprechenden Systemdienstleistung mit spezifischen Leistungsklassen, Investitionen und technischen Parametern hinterlegt. Auf der Erzeugungsseite sind für die zentrale und dezentrale Strom- und Wärmebereitstellung verschiedene Technologien implementiert.

Basierend auf der Raumtypen-Einteilung nach der Raumbesichtigung des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) ergeben sich je Bilanzraum spezifische Mobilitätsverteilungen hinsichtlich des eingesetzten Verkehrsmittels, der Wegelänge und der Häufigkeit im Personenverkehr. Aus diesen Angaben verknüpft mit Fahrleistungsstatistiken und Fahrzeugzulassungen können in Zusammenarbeit mit detaillierte Ganglinien zum Mobilitätsverhalten bestimmt werden (siehe Kapitel 2.2). Die modelltechnische Umsetzung der Mobilitätsnachfrage im motorisierten Individualverkehr erfolgt somit geteilt nach Kurz-, und Langstrecke. Zusätzlich wird im Bereich des ÖPNV nach innerstädtischen und außerstädtischen Bussen unterschieden. Im Nutzverkehr findet eine Unterscheidung zwischen leichtem und schwerem Nutzlastverkehr statt.

Für Wohngebäude sowie Nichtwohngebäude wird jeweils die Nachfrage nach Raumwärme, Warmwasser, Kühlung sowie elektrische Anwendungen im Modell abgebildet. Im Bereich der elektrischen Anwendungen sind jeweils die Nachfragen nach Kochen, Waschen, Trocknen, Licht und sonstige elektrische Geräte abgebildet. Zur Deckung der Nachfragen steht dabei analog zu den Verkehrsnachfragen ein Technologieportfolio zur Verfügung.

Die in Kapitel 2.1 erläuterte Gebäudesimulation dient als Grundlage zur Erstellung der Bedarfsprofile für Raumwärme, Warmwasser und Stromanwendungen in Wohngebäuden. In den simulierten Baualterklassen bildet das Basisprofil die EnEV-Anforderungen ab. Zudem sind die Profile nach Randbedingungen für den KfW Effizienzhaus 70 und KfW Effizienzhaus 40 Standard skaliert. Die Gebäudemodellierung im SCIM basiert auf der in Abbildung 3 dargestellten IWU Typologie. Um eine Reduktion der Modellgröße zu realisieren, werden bautypisch ähnliche Gebäude nach der IWU Typologie zusammengefasst. Für die Bestandsgebäude wird daher SCIM nach zwei verschiedenen Typen von Einfamilienhäusern und einem Mehrfamiliengebäude unterschieden. Der Neubau wird für diese drei Gebäudetypen ebenfalls separat berücksichtigt. Für Nichtwohngebäude wurden im SCIM für die beiden Fallstudien die spezifischen Nutzenergiebedarfe nach Raumwärme, Warmwasser, Strom unterschieden. Die zeitlichen Verläufe der Profile der Nutzenergienachfrage liefert ebenfalls die in Kapitel 2.1 erläuterte Gebäudesimulation für Nichtwohngebäude. Für die Simulation wurden dabei drei Nichtwohngebäudetypen im GHD Sektor berücksichtigt. Repräsentativ für das Gewerbe wird der

Bereich Herstellungsbetriebe, stellvertretend für den Handel der Bereich Handel und für Dienstleistungen der Bereich Bürobetriebe eine Gebäudesimulation herangezogen. Die Ergebnisse der Gebäudesimulationen fließen analog zum Wohngebäudebereich ins SCIM als Lastprofile für Raumwärme, Warmwasser, Klimatisierung und verschiedene Stromanwendungen (Kochen, Beleuchtung, Kühlen und Gefrieren) ein. Dabei werden die Bereiche Handel und Dienstleistungen im SCIM zu einer Kategorie „GHD Kleinverbraucher“ zusammengefasst und die Gewerbe als „GHD Großverbraucher“ modelliert.

Der Modellierungszeitraum ist von 2010 bis 2050 in 5-Jahresschritte eingeteilt. Im Rahmen der Optimierung wird eine integrale Ausbau- und Einsatzoptimierung über den gesamten Modellierungszeitraum durchgeführt. Zur detaillierten Abbildung des Energiesystems ist es notwendig eine zeitliche Struktur zu wählen, die neben realitätsgetreuen Modellierung einer fluktuierenden Nachfrage sowie einer Dargebots abhängigen Erzeugung auf Basis von Erneuerbaren Energien, auch die Lösbarkeit des Modells gewährleistet [20]. Hierfür wird eine hohe zeitliche Auflösung benötigt, die die Darstellung von Spitzen und Tälern in der Erzeugung und im Verbrauch sowie eine genaue Abbildung des Einsatzes der verschiedenen Flexibilitätsoptionen ermöglicht. Zudem ist es notwendig repräsentative und zusammenhängende Zeitsegmente über einen längeren Zeitraum von Tagen oder Wochen zu wählen. Andererseits muss das umfangreiche sektorintegrale Modell lösbar bleiben. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, ist die zeitliche Auflösung in fünf Typwochen mit einer stündlichen Auflösung unterteilt. Dabei entsprechen vier Typwochen je einer Jahreszeit (672 Zeitsegmente pro Jahr) und die fünfte charakterisiert eine Peak-Woche mit einer stündlichen Auflösung (zusätzlich 168 Zeitsegmente pro Jahr) zur Abbildung einer hohen Einspeisung fluktuierender Erneuerbarer Energien. Eine Übersicht über die Struktur der eingesetzten zeitlichen Struktur ist in Abbildung 13 dargestellt.

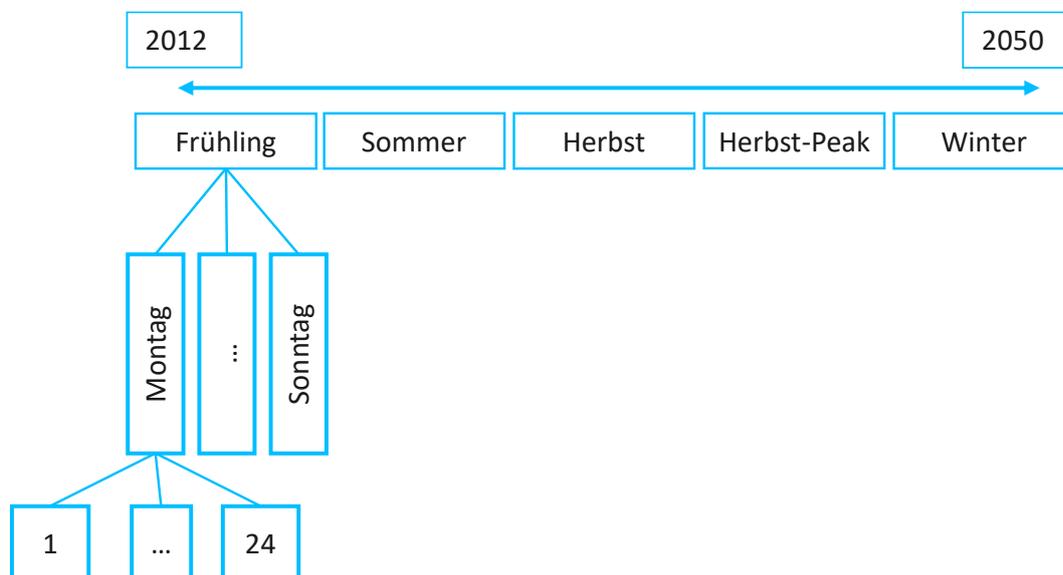


Abbildung 13: Zeitliche Struktur von TIMES Local

2.3.1 Identifizierung von Klimaschutzmaßnahmen

Im Rahmen der Analyse liegt der Fokus auf der systematischen Entwicklung und Analyse von Klimaschutzmaßnahmen in allen Handlungsfeldern, die mittel- und langfristig wirksame Impulse zur Reduktion von Energieverbrauch und CO₂-Emissionen auf kommunaler Ebene beisteuern. Hierbei galt es für alle klimarelevanten Bereiche Herausforderungen zu erkennen und Lösungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Dabei wurden geeignete Maßnahmen aus den Bereichen Wohn- und Nichtwohngebäude und dem Verkehr identifiziert und bewertet. Des Weiteren wurden übergreifende Maßnahmen definiert, die die sektorübergreifenden Zusammenhänge abbilden. Dabei bedeutet sektorübergreifend zum einen die Nutzung von Synergien bei der Strom- und Wärme- und Mobilitätsversorgung und zum anderen die Verbindung von zentralen und dezentralen Energiebereitstellungsprozessen in verschiedenen Nachfragesektoren z. B. in privaten Haushalten und GHD. Dazu wurden sowohl Maßnahmen auf der Nachfrageseite (Einsparpotenziale, rationelle Energieanwendung, Nutzerverhalten etc.) als auch auf der Erzeugungsseite (z. B. Kraft-Wärme-Kopplung, Nahwärmenetze) betrachtet. Zusätzlich wurden Methoden zur Potenzialermittlung der einzelnen Maßnahmen entwickelt. Bei der Betrachtung der Maßnahmen ist darauf zu achten, dass diese sowohl für das SCIM-Modell, als auch für die vereinfachte Anwendung im EN-Easy-Tool implementiert werden.

Im EN-Easy und im SCIM Tool werden auf Basis der gewählten Klimaschutzaktivitäten und Ziele Handlungsempfehlungen erarbeitet. Im Ergebnis werden die wesentlichen Maßnahmen und Handlungsmöglichkeiten im Sinne der Zielsetzungen des Konzepts aufgezeigt. Zur Implementierung der Maßnahmen in das Optimierungstool SCIM und das Simulationstool EN-Easy müssen zunächst Methoden zur Bewertung des Ist-Zustandes eines variabel auszuwählenden Bilanzraums entwickelt werden, um anschließend die entsprechenden Maßnahmen anzusetzen. Für die ausgewählten Maßnahmen werden Faktoren zur Herleitung, Zielgrößen, Bilanzgrenzen und Bewertungsparameter definiert. Auf Basis des betrachteten Bilanzraums und der damit einhergehenden Startindikatoren können aus unterschiedlichen Bereichen Maßnahmen abgeleitet werden. Eine detaillierte Übersicht der Methodik zur Ermittlung des Energiebedarfs für den städtischen Bereich und die Ermittlung der einzelnen Maßnahmen-Potenziale werden in Kapitel 4.5 erläutert.

Zusätzlich wird zwischen Maßnahmen im Bestand und im Neubau unterschieden. Diese Unterscheidung ist notwendig, da zum einen andere Technologien im Bestand als im Neubau als Referenz vorhanden sind und zum anderen Ansatzpunkte von Maßnahmen im Neubau zumeist geringer sind. Entsprechend sind für die Berechnung des Einsparpotenzials verschiedene Referenzsysteme anzusetzen (vgl. Abschnitt 4.3).

Im Folgenden werden die Maßnahmen einzeln dargestellt.

2.3.1.1 Maßnahmen von Wohn- und Nichtwohngebäuden

Für den Bedarfsbereich Gebäude wurden typische Verbrauchseigenschaften von Gebäuden berücksichtigt, um geeignete Maßnahmen zur Einsparung abzubilden. Diese Maßnahmen lassen sich in die folgenden Bereiche einteilen:

- Maßnahme zur Verbesserung und Sanierung der Gebäudehülle

- Maßnahmen zur Erneuerung / Verbesserung der Heizungsanlage
- Nutzung von Erneuerbaren Energien
- Erneuerung der Umwälzpumpe
- Durchführung eines hydraulischen Abgleiches
- Austausch von Elektrogeräten
- Energieberatung und Betriebsoptimierung
- Optimierung im Neubau (Nicht-Wohngebäude)

Basierend auf den Ergebnissen der Gebäudetypologie besteht ein Maßnahmenfeld für den Wohngebäudesektor in der energetischen Sanierung der Gebäudehüllen. Die umsetzbaren energetischen Sanierungsmaßnahmen betreffen dabei hauptsächlich die Dämmung der Fassade und den Ersatz der Fenster durch die heutigen Maßstäbe entsprechende Wärmeschutzverglasung. Die Reduktion des Warmwasserbedarfs ist dabei zum großen Anteil nur auf die Nutzergewohnheiten zurückzuführen und wird daher nicht weiter betrachtet.

Ausgehend vom ermittelten Gebäudebestand wurden im Modell vier Gebäude-Modernisierungsoptionen implementiert. Wärmeenergieeinsparpotenziale können durch den verbesserten Wärmeschutz von Fenstern, einer energetischen Dachdämmung, der zusätzlichen Erneuerung der Außenwanddämmung und dem Einbau einer Kellerdeckendämmung realisiert werden [21]. Zusätzlich kann eine Vollsaniierung des jeweiligen Gebäudetyps vorgenommen werden, bei dem die einzelnen Bestandteile vollständig aufeinander abgestimmt werden. Dabei bauen die Maßnahmenbündel aufeinander auf und sind je Gebäudetyp und Alter einzeln definiert. Weitere Energieeinsparmöglichkeiten betreffen die Anlagentechnik, die mit Effizienzverbesserungen zum Klimaschutz beitragen kann. Zusätzlich wurden Maßnahmen speziell den Neubau betreffend definiert.

Die Entwicklung einzelner Maßnahmen für diese Bereiche erfolgte über mehrere iterative Schritte. Für die Verarbeitung im SCIM-Modell und im EN-easy-Tool ist es zudem wichtig, dass sich die Maßnahmen quantitativ möglichst präzise und eindeutig bestimmen und berechnen lassen. Tabelle 3 zeigt die Maßnahmenübersicht.

Aus Tabelle 3 ist zudem zu entnehmen, ob die jeweilige Maßnahme auf den Neubau (N) oder den Gebäudebestand (B) jeweils bei Wohngebäuden oder bei Nicht-Wohngebäuden anzuwenden ist. Energetische Sanierungsmaßnahmen (G-01-06 und G-15-16) betreffen den Bestandsbau, während die Installation von PV-Anlagen (G-14, G-24) sowohl im Bestand als auch Neubau möglich ist.

Tabelle 3: Übersicht Maßnahmen zur Energieeinsparung und Energieeffizienzsteigerung im Bereich Gebäude

	Sanierung der Gebäudehülle	Neubau / Bestand	
Wohngebäude	G-01 Gebäudesanierung Fenster	B	
	G-02 Gebäudesanierung Dach	B	
	G-03 Gebäudesanierung: Unterste Geschossdecke	B	
	G-04 Gebäudesanierung: Außenwand	B	
	G-05 Gebäudesanierung: Komplett standard	B	
	G-06 Gebäudesanierung: Komplett erweitert	B	
	Erneuerung Heizungsanlage		
	G-07 Erneuerung Erzeuger / Anlagentechnik zur Effizienzverbesserung (konventionell)	B	
	G-08 Erneuerung Erzeuger / Anlagentechnik zur Effizienzverbesserung (zukunftsweisend)	B	
	Nutzung erneuerbarer Energien		
	G-14 Nutzung PV-Anlage	N / B	
	G-38 Nutzung regeneratives Heizöl	B	
	Erneuerung Umwälzpumpe		
	G-09 Austausch der Umwälzpumpen	B	
	Hydraulischer Abgleich		
	G-10 Durchführung eines hydraulischen Abgleichs	B	
	Austausch Elektrogeräte		
	G-11 Anschaffung hocheffizienter Elektrogeräte (nicht durchgängig A++)	N / B	
	G-12 Anschaffung hocheffizienter Elektrogeräte (durchgängig A++)	N / B	
Energieberatung			
G-13 Energieberatung	B		
G-37 Neubau im KFW Effizienzhaus 40 Standard	N		
Nicht-Wohngebäude	Gebäudesanierung		
	G-15 Gebäudesanierung einfach	B	
	G-16 Gebäudesanierung komplett	B	
	Energieberatung und Betriebsoptimierung		
	G-17 Energieaudit	B	
	G-19 Betriebsoptimierung	B	
	G-21 Energieberatung	B	
	Erneuerung Wärmeerzeugung, -verteilung, -übergabe		
	G-23 Erneuerung Wärmeerzeugung	B	
	G-27 Erneuerung Wärme- bzw. Kälteverteilung	B	
	G-28 Erneuerung Wärme- bzw. Kälteübergabe	B	
	Nutzung erneuerbarer Energien		
	G-24 Nutzung PV-Anlage	N / B	
	G-29 Nutzung regeneratives Heizöl	B	
	Erneuerung Umwälzpumpe		
	G-25 Austausch der Umwälzpumpen	B	
	Hydraulischer Abgleich		
	G-26 Hydraulischer Abgleich	B	
	Optimierungen im Neubau		
	G-30 Nutzung regenerativer Wärmesenken zur Gebäudekühlung	N	
	G-31 Bau nach optimierter Green-Building-Planung	N	
	G-32 Einsatz von Niedertemperatur-Flächenheizungen	N	
G-33 Einsatz von geregelter natürlicher Lüftung statt RLT	N		
G-35 Optimierung des außenliegenden Sonnenschutzes zur Senkung des Kühlbedarfs	N / B		
G-36 Reduzierung des Kühlbedarfs durch aktive Nachtlüftung (ggf. inkl. BTA)	N / B		
G-34 Energiemonitoring- und Energieregelkonzept	N / B		

2.3.1.2 Verkehrsmaßnahmen

Gängigen Studien zum Verkehr und insbesondere zu nachhaltiger Mobilität, wie beispielsweise Mobilitätsentwicklungskonzepte des Bundes und der Landesministerien sowie regionale und lokale Verkehrsentwicklungspläne werden in die Entwicklung der Maßnahmen in diesen Ansatz eingebunden. Wichtig ist dabei, welche der Daten in einer breiten Verfügbarkeit vorliegen und inwiefern diese zur Maßnahmenermittlung flächendeckend für variable Bilanzräume weiterverarbeitet werden können. Daher sind nur Verkehrsmaßnahmen analysiert, die quantifizierbar sind. Die Konzepte und Studien werden dahingehend ausgewertet, Handlungsoptionen zur Verbesserung der Energieeffizienz der Verkehrssysteme zu gewinnen. Neben den quantifizierbaren harten Maßnahmen, zu denen die Stärkung des Umweltverbundes, der Wechsel auf Elektromobilität, und das Carpooling im Pendlerverkehr zählen, gibt es auch nicht quantifizierbare weiche Maßnahmen, wie Verkehrsaufklärung (Mobiles-Audit), Verkehrserziehung, Initiativen für eine saubere Stadt/Kommune oder Bike-Sharing.

Aus der in Kapitel 2.2 beschriebenen Auswertungen der MID Daten wurden Parameter entwickelt mit denen die Anzahl der Fahrzeugkilometer (Fz-km) je Raumeinheit pro Jahr berechnet werden können. Über die Parameter Modal Split, Wegelänge, Wegezanzahl und Besetzungsgrad können für die Wohnbevölkerung Fahrleistungen ausgewiesen werden. Im Weiteren wird der Anteil an konventionellen Fahrzeugen, Anzahl der betrachteten Tage/Jahr und der prozentuale Anteil Wohnbevölkerung/Arbeiten und Ausbildung berücksichtigt. Es werden drei harte Maßnahmen abgebildet, mit deren Hilfe die Anzahl der Fahrzeugkilometer im konventionellen MIV in den jeweiligen Stadt- und Landkreisen verringert werden kann, um somit eine Reduzierung der CO₂ Emissionen zu erzielen. Die Maßnahmen für den Bereich Verkehr werden im Folgenden kurz dargestellt und erläutert.

Maßnahme Stärkung Umweltverbund (V-01)

Durch eine Förderung der Bereiche ÖPNV, des Radverkehrs und des Fußgängerverkehrs soll eine Reduzierung des MIV je Raumtyp ausgegeben werden. Durch die Umsetzung der Maßnahme „Stärkung Umweltverbund“ ist eine Reduzierung der CO₂ Emissionen im jeweiligen Bilanzraum bis 2030 möglich (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Reduzierungspotenzial der Maßnahme Stärkung Umweltverbund

Kommune	Reduzierungspotential MIV Anteil	Input	Modal Shift Abnahme	Output	Zeit- raum
Agglomerations- raum	MIV --> ÖPNV, Rad, Fuß	Pers.Km MIV aus Berechnung MID Daten für jeweiligen BBSR- Typ	5 bis 10 % Abnahme MIV Anteil am Modal Split	Reduzierter Wert Fzg.Km für jeweiligen Raumtyp	bis 2030
Verstädterter Raum	MIV --> ÖPNV, Rad, Fuß	Pers.Km MIV aus Berechnung MID Daten für jeweiligen BBSR- Typ	4 bis 9 % Abnahme MIV Anteil am Modal Split	Reduzierter Wert Fzg.Km für jeweiligen Raumtyp	bis 2030
Ländlicher Raum	MIV --> ÖPNV, Rad, Fuß	Pers.Km MIV aus Berechnung MID Daten für jeweiligen BBSR- Typ	1 bis 5 % Abnahme MIV Anteil am Modal Split	Reduzierter Wert Fzg.Km für jeweiligen Raumtyp	bis 2030

Maßnahme Wechsel auf Elektromobilität (V-02)

Die Maßnahme Wechsel auf Elektromobilität sieht eine Verringerung des Anteils an konventionell angetriebenen Pkw und Erhöhung des Anteils an E-Fahrzeuge. Mit Hilfe von Fortschreibungen und Entwicklungspfade aus der gängigen Literatur wurden vier Szenarien für eine Verlagerung konventionell betriebener Fahrzeuge auf elektrobetriebene Fahrzeuge aufgestellt.

- Status Quo (10% E-Mobilität)
- Szenario 1 (15% E-Mobilität)
- Szenario 2 (20% E-Mobilität)
- Szenario Fokus (30% E-Mobilität)

Maßnahme Carpooling (V-03)

Die Maßnahme Carpooling beschränkt sich auf den Bereich des Arbeits- und Ausbildungsverkehrs. Eine Verringerung der Gesamtfahrleistung soll durch die Steigerung des Besetzungsgrades im Pendlerverkehr erreicht werden. Die im Folgenden dargestellten Nachfragemodelle für die einzelnen Raumtypen wurden mit Hilfe von gängigen verkehrsplanerischen Erfahrungswerten definiert (siehe Tabelle 5). Für unterschiedlich dicht besiedelte Räume wurden in Abhängigkeit der BBSR-Raumtypen Carpooling-Potenziale ermittelt.

Tabelle 5: Einsparungspotenziale im Bereich Carpooling

Kommune	Reduzierungspotential MIV Anteil	Input	KFZ-Nutzungsabnahme durch Carpooling	Output	Zeitraum
Agglomerationsräume					
Kernstädte	MIV --> Carpooling --> Besetzungsgrad	Pers.Km MIV aus Berechnung MID Daten für jeweiligen BBSR-Typ	0%	Reduzierter Wert Fzg.Km für jeweiligen Raumtyp	bis 2030
Hochverdichtete Kreise	MIV --> Carpooling --> Besetzungsgrad		0 % - 2 %		
Verdichtete Kreise	MIV --> Carpooling --> Besetzungsgrad		2 % - 4 %		
Ländliche Kreis	MIV --> Carpooling --> Besetzungsgrad		4 % - 6 %		
Verstädterte Räume					
Kernstädte	MIV --> Carpooling --> Besetzungsgrad	Pers.Km MIV aus Berechnung MID Daten für jeweiligen BBSR-Typ	0 % - 2 %	Reduzierter Wert Fzg.Km für jeweiligen Raumtyp	bis 2030
Verdichtete Kreise	MIV --> Carpooling --> Besetzungsgrad		3 % - 5 %		
Ländliche Kreis	MIV --> Carpooling --> Besetzungsgrad		3 % - 5 %		
Ländlicher Räume					
Ländliche Kreis höherer Dichte	MIV --> Carpooling --> Besetzungsgrad	Pers.Km MIV aus Berechnung MID Daten für jeweiligen BBSR-Typ	3 % - 5 %	Reduzierter Wert Fzg.Km für jeweiligen Raumtyp	bis 2030
Ländliche Kreis geringerer Dichte	MIV --> Carpooling --> Besetzungsgrad		3 % - 5 %		

Weitere (nicht-quantifizierbare) Maßnahmen

Neben den direkt quantifizierbaren (harten) Maßnahmen werden im Folgenden 4 weitere (weiche) Maßnahmen beschrieben, die unterstützend auf die Umsetzung vorhandener CO₂ Reduktionspotenziale wirken können.

Verkehrsaufklärung / Mobilitäts-Audit (V-04): Durch Informationen aus Zeitschriften oder freiwilligen Vorträgen können Tipps und Hilfen zum umweltschonenden Fahren durch Reduktion der Fz-km erzielt werden. (Passive Maßnahme)

Verkehrserziehung (V-05): Durch Maßnahmen im Straßenverkehr, wie z.B. Umweltzonen, Feinstaubalarm, Fahrverbote, Geschwindigkeitsdrosselungen kann sich ein verändertes Mobilitätsverhalten in der Bevölkerung ausbilden. (Aktive Maßnahme)

Initiative Saubere Stadt/Kommune (V-06): Eine Senkung der Emissionswerte soll durch Informationskampagnen oder z.B. Plakate erzielt werden.

Bike-Sharing (V-07): Der Fahrradverleih findet in der Regel im öffentlichen Raum oder an öffentlich zugänglichen Stationen statt. Diese Systeme werden von Unternehmen, Kommunen und Kommunalverbänden eingerichtet. Angeboten werden Fahrräder, wie auch Pedelecs. Auf die genaue Wirkweise der weichen Maßnahmen im Modell und auf die Wechselwirkungen unter den Maßnahmen wird in Kapitel 4.4.3 im Detail eingegangen. Eine Übersicht der berücksichtigten Verkehrsmaßnahmen ist in Tabelle 6 gegeben,

Tabelle 6: Verkehrsmaßnahmen

Verkehr			Neubau / Bestand
	V-01	Stärkung Umweltverbund	N / B
	V-02	Wechsel auf E-Fahrzeuge	N / B
	V-03	Carpooling Pendler-Verkehr	N / B
	V-04*	Verkehrsaufklärung (Mobilitäts-Audit)	N / B
	V-05*	Verkehrserziehung	N / B
	V-06*	Initiativen Saubere Stadt / Kommune	N / B
	V-07*	Bike-Sharing	N / B

2.3.1.3 Übergreifende Maßnahmen

Neben Maßnahmen aus dem Gebäude- und Verkehrsbereich werden übergreifende Maßnahmen erarbeitet (vergleiche Tabelle 7), die den Verkehrsteil mit dem Wohngebäude- bzw. Nichtwohngebäudebestand verknüpfen. Darunter zählen intelligente Ladestrategien in der Elektromobilität (z. B. bilateraler Zugriff auf Speicher) oder Vehicle-to-Grid als Interaktion zwischen dem Wohngebäude und Verkehrssektor. Ebenfalls denkbar ist ein Ausbau netzgebundener Versorgungskapazitäten, die sowohl Wohngebäude, als auch Nichtwohngebäude im Bestand und Neubau beeinflussen kann. Eine detaillierte Beschreibung der Einzelmaßnahmen erfolgt im Kapitel 2.3.2.

Tabelle 7: Übergreifende Maßnahmen im Bestand und Neubau

Übergreifend	Verkehr- Strom		Neubau / Bestand
	Ü-01	Förderung von PV-Carports	N / B
	Ü-02	Demandside Management im Verkehr - Haushalte	N / B
	Ü-03	Demandside Management im Verkehr - GHD	N / B
	Nahwärmeversorgung		
	Ü-04	Netzgebundene Wärmeversorgung mit energieeffizienter KWK	N/ B
	Ü-07	Temperaturabsenkung von Wärmenetzen zur Effizienzsteigerung	N / B
	Ü-08	Ausbau solarunterstützter Nahwärme - LowEx Netze	N/ B
	Ü-11	Warmwasserspeicher zur Integration hoher Anteile erneuerbarer Energien	N / B
	Wärmepumpe		
	Ü-05	Netzgebundene Wärmeversorgung mit energieeffizienten Wärmepumpen	
	Ü-09	Abwasserwärmenutzung	N / B
	Stromversorgung (nicht KWK)		
	Ü-06	Nutzung von Skaleneffekten durch (kooperative) Nutzung von PV-Freiflächen	N / B
	Ü-10	Stromspeicher zur Integration hoher Anteile erneuerbarer Energien	N / B
Sonstiges			
Ü-12	Austausch der Straßenbeleuchtung gegen LED-Leuchten	B	
Ü-13*	Quartiers- / Klimaschutzmanager	B	

2.3.2 Maßnahmenimplementierung in SCIM

Im Folgenden wird die Implementierung der Maßnahmen aus den Bereichen Gebäude, Verkehr und übergreifende ins SCIM erläutert. Dabei werden aufbauend auf der oben erläuterten TIMES Local Struktur die Wirkung der Maßnahmen erläutert oder entsprechende Modellerweiterungen für das SCIM Tool vorgenommen (vergleiche [22]). Eine Übersicht der in SCIM implementierten Verkehrsmaßnahmen und die Methode der Implementierung sind in Tabelle 8 gelistet.

Tabelle 8: In SCIM implementierte Verkehrsmaßnahmen

Bezeichnung	Bereich oder Name der Maßnahme	Kurzbeschreibung	Maßnahmenimplementierung ins Modell
V-01	Stärkung des Umweltverbundes	Allgemeine Förderung des ÖPNV bei gleichzeitiger Reduktion des motorisierten Individualverkehrs	Exogene Vorgabe zur Reduktion des motorisierten Individualverkehrs bei gleichzeitiger Erhöhung der Nachfrage nach ÖPNV
V-02	Förderung der E-Mobilität	Emissionsreduktion durch aktive Förderung von Elektromobilität	Mathematische Nebenbedingung, die die Kapazität der Elektrofahrzeuge am gesamten Fuhrpark festlegt
V-03	Carpooling im Pendlerverkehr	Erhöhung des Besetzungsgrade von Fahrzeugen für arbeitsbezogene Wegstrecken von Arbeitnehmern	Exogene Anpassung der Besetzungsgrade von Fahrzeugen für motorisierten Individualverkehr

V-01: Stärkung des Umweltverbundes

Ein Eingreifen in die bestehende Verkehrsstruktur eines betrachteten Bilanzraumes, beispielsweise durch Ausbau des Streckennetzes des ÖPNV und der Fahrradwege, hat einen Wandel des lokalen Modal Split zur Folge. Die Verteilung der Mobilitätsbereitstellung unterliegt einer Verschiebung (bspw. mehr zurückgelegte Kilometer mit ÖPNV auf Kosten des motorisierten Individualverkehrs). Diese Anpassungen im Modalsplit durch Umsetzung der Maßnahme gehen als Veränderungen der exogenen

Nachfragen im MIV ins Modell ein. Die absolute Minderung der Nachfrage nach Fahrleistungen im MIV orientiert sich dabei an der in Kapitel 2.3.1.2 beschriebenen Methodik. Eine gleichzeitige Erhöhung der Mobilitätsnachfrage zur Kompensation in anderen Bereichen, wie dem ÖPNV (in TIMES Local Nachfrage nach Mobilität in Zügen bzw. Bussen) ist vorgesehen.

V-02: Förderung der E-Mobilität

Eine weitere Maßnahme bildet die verstärkte Nutzung von Elektrofahrzeugen zur Mobilitätsbereitstellung. Um die Auswirkungen einer leichten, mittleren und starken Einführung von Elektromobilität innerhalb des Bilanzraums zu bestimmen, wird der Anteil der Elektrofahrzeuge an allen Fahrzeugen im betrachteten Bilanzraum festgelegt. Dabei wird der zu erzielende Anteil der Elektrofahrzeuge für das Zieljahr implementiert. Einen Überblick über die mathematische Restriktion für ein Modelljahr ist in Gleichung 13 dargestellt.

$$\frac{n_{Veh_tech_{Elc}}}{\sum_i n_{Veh_tech_i}} \geq Sh_{Elc} \quad \text{Gleichung 13}$$

mit:

i – Laufvariable für Antriebsarten der Fahrzeuge [-]

$n_{Veh_tech_i}$ – Anzahl der Fahrzeuge mit Antrieb i im betrachteten Modelljahr [#]

$n_{Veh_tech_{Elc}}$ – Anzahl der Elektrofahrzeuge im betrachteten Modelljahr [#]

Sh_{Elc} – Anteil der Elektrofahrzeuge an Gesamtkapazität der Fahrzeuge im MIV [%]

V-03: Carpooling im Pendlerverkehr

Eine in Klimaschutzkonzepten häufig aufgegriffene Maßnahme bildet das Carpooling des Pendlerverkehrs. Betriebliches Mobilitätsmanagement soll die vom Betrieb erzeugten Verkehre umwelt- und sozialorientiert gestalten. Dazu gehören Pendler-, Liefer-, Mitarbeiter- und Besucherverkehr, sowie Dienstreisen. Ein wichtiges Ziel des Mobilitätsmanagements ist es, auf das individuelle Verkehrsverhalten der Mitarbeiter eines Betriebes einzuwirken. Dies soll im Hinblick auf eine stärkere Nutzung alternativer Verkehrsmittel und auf eine bewusste und wirtschaftlichere Nutzung des Pkw geschehen. Eine Umsetzung des Carpooling im Pendlerverkehr z. B. durch aktives Mobilitätsmanagement in Betrieben hat eine Erhöhung der Besetzungsgrade der Fahrzeuge zur Folge (mehr Mitfahrer, weniger Selbstfahrer) und wirkt sich somit direkt auf die Bereitstellung der Modellanfrage nach Personenkilometern (pkm) aus. Für die Bereitstellung der gleichen Mobilitätsnachfrage werden daher weniger Fahrten benötigt. Die Implementierung der Maßnahmen im Modell erfolgt daher über eine exogene Anpassung der Besetzungsgrade aller Fahrzeugtechnologien für den motorisierten Individualverkehr. Die Funktionsweise der Maßnahme ist in Abbildung 14 dargestellt.

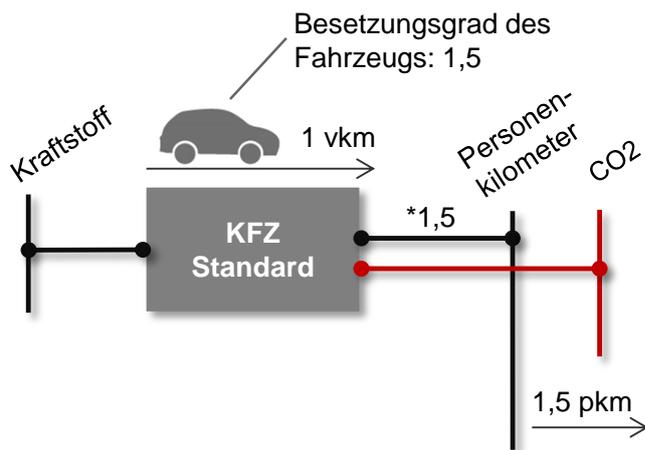


Abbildung 14: Implementierung der Carpooling Maßnahme im Energiesystemmodell

Die in SCIM implementierten Wohn- und Nichtwohngebäude-Maßnahmen als auch die Methode der Implementierung sind in Tabelle 9, Tabelle 10 und Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 9: Im Sustainable City Information Modell implementierte Wohngebäudemaßnahmen

Bezeichnung	Bereich oder Name der Maßnahme	Kurzbeschreibung	Maßnahmenimplementierung ins Modell
G-01 bis G-06	Sanierung der Gebäudehülle in Wohngebäuden	Reduktion des jährlichen Heizwärmebedarfs durch die Sanierung der Gebäudehülle (Außenwand, Fenster, Dach, Kellerdecke) oder durch eine Komplettsanierung Standard bzw. Komplettsanierung erweitert.	Zusätzlich zur exogen vorgegebenen Einsparungen durch Gebäudesanierungen von Bestandsbauten, die innerhalb des Sanierungszyklus erneuert werden, sind im Modell Investitionsoptionen mit vier Potenzialstufen zur Abbildung von Sanierungsmaßnahmen außerhalb des Sanierungszyklus implementiert, die zu einer endogenen Reduktion der Wärmebedarfsnachfrage in den einzelnen Gebäuden führt.
G-07 bis G-08	Erneuerung von Erzeugungsanlagen / Anlagentechnik	Austausch bestehender Wärmeerzeuger durch Investitionen in effiziente/neue Geräte	Endogen verfügbares Investitionsoptionsportfolio im Bereich der Wärmeversorgung in Wohngebäuden
G-09 bis G-10	Austausch von Umwälzpumpen und Durchführung eines hydraulischen Abgleichs	Neue regelbare Umwälzpumpen bieten in Verbindung mit einem hydraulischen Abgleich großes Einsparpotenzial in Heizungssystemen.	Implementierung eines Potenzials zur Reduktion der restlichen Stromanwendung im Wohngebäudebereich
G11 bis G-12	Austausch der Elektrogeräte	Durch den Austausch der Elektrogeräte hin zu einer effizienteren Variante, kann der Strombedarf maßgeblich gesenkt werden	Endogene Investitionsoption im Bereich der restlichen Stromnachfrage in Wohngebäuden
G-13	Energieberatung	Reduktion des Energieverbrauches in Wohngebäuden durch eine energietechnische Optimierung im Rahmen einer Energieberatung	Wird nicht explizit im Modell abgebildet, wird als Unterstützende Maßnahme in Übrige Maßnahmen eingeschlossen
G-14	Nutzung einer PV-Anlage	Die Anwendung einer PV-Anlage zur gebäudeinternen Stromproduktion dient zur Senkung des Strombezugs	Implementierung sektorspezifischer Prozesse, die den Ausbau von PV in Wohngebäuden widerspiegelt (endogen)

Tabelle 10: Im Sustainable City Information Modell implementierte Nichtwohngebäudemaßnahmen (1/2)

Bezeichnung	Bereich oder Name der Maßnahme	Kurzbeschreibung	Maßnahmenimplementierung ins Modell
G-15 bis G-16	Sanierung der Gebäudehülle in Nichtwohngebäuden	Reduktion des jährlichen Heizwärmebedarfs durch die Sanierung der Gebäudehülle (Außenwand, Fenster, Dach, Kellerdecke)	Vier Potenzialstufen je Nicht-Wohngebäudetyp in Form von Einsparprozessen, die den Raumwärmebedarf endogenen reduzieren
G-17 bis G-22	Energieaudit, Betriebsoptimierung, Querschnittstechnologien, Energieberatung	Reduktion des Energieverbrauches in Nichtwohngebäuden durch eine energietechnische Optimierung. Dies kann im Rahmen einer Energiedienstleistung, einer Betriebsoptimierung oder einer Energieberatung, jeweils in verschiedenen Ausprägungen, stattfinden.	Keine direkte Berücksichtigung im SCIM, wird als Unterstützende Maßnahme in übrige Maßnahmen eingeschlossen
G-23	Erneuerung Wärmeerzeugung	Erneuerung der Heizungsanlage in zwei Stufen. In Stufe 1 wird die bestehende Anlage gegen eine neue, dem derzeitigen Stand der Technik entsprechende, ausgetauscht. In Stufe 2 wird zusätzlich ein Teil der benötigten Wärme durch Solarthermie bereitgestellt.	Endogen verfügbares Investitionsoptionsportfolio im Bereich der Wärmeversorgung in Nichtwohngebäuden
G-24	Nutzung PV-Anlage	Die Anwendung einer PV-Anlage zur gebäudeinternen Stromproduktion dient zur Senkung des Strombezugs aus dem öffentlichen Netz.	Implementierung sektorspezifischer Prozesse, die den Ausbau von PV in Nichtwohngebäuden widerspiegelt (endogen)
G-25 bis G-26	Austausch der Umwälzpumpen und Hydraulischer Abgleich der Heizungsanlage	Austausch der Umwälzpumpen der Heizungsanlagen, wodurch der Strombedarf zum Betrieb der Heizungsanlagen reduziert wird. Durch die Optimierung des Heizungssystems mit Hilfe des hydraulischen Abgleichs können die Verluste im Netz reduziert werden wodurch wiederum die Effizienz der Anlage steigt.	Implementierung eines Potenzials zur Reduktion der restlichen Stromanwendung im Nichtwohn-Gebäudebereich
G-27 bis G-28	Erneuerung Wärme- bzw. Kälteverteilung und Übergabe	Austausch bestehender Wärme und Kälteerzeuger sowie der Verteilung durch Investitionen in effiziente/neue Geräte	Endogen verfügbares Investitionsoptionsportfolio im Bereich der Wärme- und Kälteversorgung und Verteilung in Nichtwohngebäuden
G-29	Nutzung regeneratives Heizöl	Die Nutzung von Regenerativem Heizöl anstelle von vollständig fossilem dient dazu, die Netto-CO ₂ -Emissionen zu senken.	Endogen verfügbare Investitionsmöglichkeit in Biodiesel bzw. Bioheizöl im Bereich der Wärme- und Kälteversorgung in Nichtwohngebäuden

Tabelle 11: Im Sustainable City Information Modell implementierte Nichtwohngebäudemaßnahmen (2/2)

Bezeichnung	Bereich oder Name der Maßnahme	Kurzbeschreibung	Maßnahmenimplementierung ins Modell
G-30	Nutzung regenerativer Wärmesenken zur Gebäudekühlung	Nutzung von z. B. Erdsonden zur Bereitstellung von Wärmesenken	Implementierung von oberflächennaher Geothermie als Investitionsoption zur Wärme und Kälteversorgung von Nichtwohngebäuden
G-31	Bau nach optimierter Green-Building-Planung	Verschärfter Baustandard mit reduziertem Primärenergiebedarf	Diese Maßnahme, betrifft ausschließlich den Neubau. Implementierung von Einsparoptionen, die dem reduzierten Primärenergieverbrauch durch Neubaustandards entspricht
G-32	Einsatz von Niedertemperatur-Flächenheizungen	Reduktion der Verluste durch Temperaturabsenkung der Wärmebereitstellung und Wärmeverteilung in Neubauten	Keine direkte Berücksichtigung im SCIM, wird als Unterstützende Maßnahme in Übrige Maßnahmen eingeschlossen. Betrifft ausschließlich den Neubau
G-33	Einsatz von geregelter natürlicher Lüftung statt Raumlüftungstechnik	Reduktion des Stromverbrauchs durch Einsatz von natürlicher Lüftung in Neubauten	Keine direkte Berücksichtigung im SCIM, wird als Unterstützende Maßnahme in Übrige Maßnahmen eingeschlossen. Betrifft ausschließlich den Neubau
G-34	Energiemonitoring- und Energieregulierungskonzept	Der Aufbau eines Monitoring-Konzeptes dient zur Überwachung der Verbräuche und zur anschließenden Optimierung des Betriebs.	Keine direkte Berücksichtigung im SCIM, wird als Unterstützende Maßnahme in Übrige Maßnahmen eingeschlossen.
G-35	Optimierung des außenliegenden Sonnenschutzes zur Senkung des Kühlbedarfs	Reduktion des Kühlbedarfs durch Einsatz eines außenliegenden Sonnenschutzes in Neubauten	Keine direkte Berücksichtigung im SCIM, wird als Unterstützende Maßnahme in Übrige Maßnahmen eingeschlossen. Betrifft ausschließlich den Neubau
G-36	Reduzierung des Kühlbedarfs durch aktive Nachtlüftung	Reduktion des Stromverbrauchs für Kühlung durch Einsatz aktiver Nachtlüftung in Neubauten	Keine direkte Berücksichtigung im SCIM, wird als Unterstützende Maßnahme in Übrige Maßnahmen eingeschlossen. Betrifft ausschließlich den Neubau

G-01 bis G-06 + G-15 bis G-16: Sanierung der Gebäudehülle in Wohn- und Nichtwohngebäuden

Zusätzlich zu exogen vorgegebenen Raumwärmeeinsparungen durch Gebäudesanierungen von Bestandsbauten, die innerhalb des Sanierungszyklus erneuert werden, sind im Modell Investitionsoptionen mit vier Potenzialstufen zur Abbildung von Sanierungsmaßnahmen außerhalb des Sanierungszyklus implementiert. Diese Potenziale stellen endogene Prozesse dar, die im Rahmen der Optimierung genutzt werden können. Modellseitig werden für die einzelnen Sanierungsstufen entsprechende maximale Einsparpotenziale implementiert, die zur Deckung der Raumwärmenachfrage beitragen und somit die restliche Nachfrage durch die Wärmebereitstellungstechnologien reduzieren. Jeder Stufe werden kapazitätsspezifische Investitionen für die Umsetzung der Maßnahme sowie ein maximales Potenzial zugeschrieben. Für jeden Wohngebäudetyp sowie für Nichtwohngebäude werden separate Einsparpotenziale und somit Prozesse im Modell implementiert. Abbildung 15 stellt die Integration der Sanierungsmaßnahmen (in rot) für einen Gebäudetyp in die Modellstruktur dar.

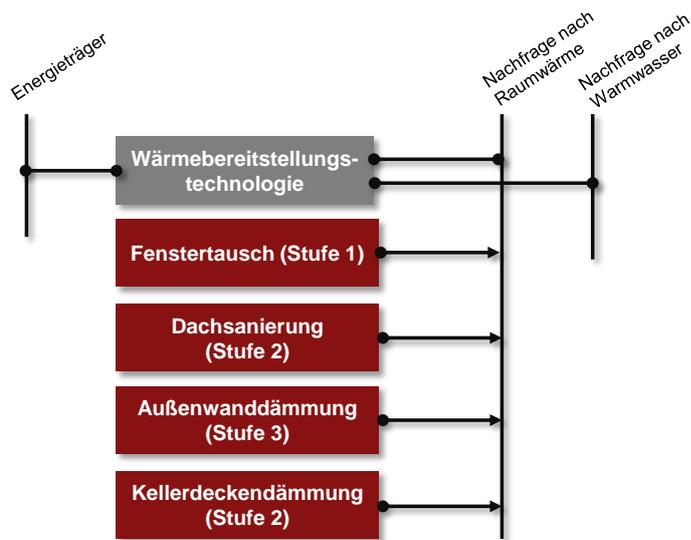


Abbildung 15: Übersicht der Sanierungsmodellierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden im SCIM

G-09 + G-10 + G-25 + G-26: Austausch der Umwälzpumpen und Hydraulischer Abgleich der Heizungsanlage in Wohn- sowie Nichtwohngebäuden

Analog zur oben beschriebenen Methodik zur Implementierung von Einsparpotenzialen durch Gebäudesanierungen werden stromseitige Einsparpotenziale implementiert, die im Zusammenhang mit dem Austausch der Umwälzpumpen und dem hydraulischen Abgleich der Heizungsanlagen realisiert werden können. Die Potenziale für die Einsparungen ergeben sich aus dem Stromverbrauch der restlichen Stromanwendungen, die die Stromnachfrage für Umwälzpumpen beinhaltet. Die im Rahmen der Umsetzung der Maßnahme sinkenden Wärmeverteilverluste bzw. eine Reduktion des Endenergieeinsatzes der Heizungen werden modellseitig nicht berücksichtigt.

G-11 + G-12: Austausch der Elektrogeräte

Der Austausch von Elektrogeräten durch Technologien mit einer höheren Effizienz kann den Strombedarf in Wohngebäuden senken. Modellseitig sind endogene Investitionsoptionen im Bereich der restlichen Stromnachfrage in Wohngebäuden, hierzu zählen unter anderem Kochen, Waschen, Trocknen, Spülen, Kühlen/Gefrieren oder Licht hinterlegt, die jeweils unterschiedlichen Energieverbrauchsklassen entsprechen. Dabei werden sowohl die Kosten, als auch die Wirkungsgrade jeder Technologie berücksichtigt. Abbildung 16 stellt den schematischen Aufbau der Nutzenergiebereitstellung der einzelnen Bereiche dar und zeigt am Beispiel des Kühlens/Gefrierens welche alternativen Technologien (in rot) im Vergleich zur Referenz (Kühlschrank Klasse B) im Zusammenhang mit der Optimierung zur Bereitstellung der Nutzenergie gezogen werden können.

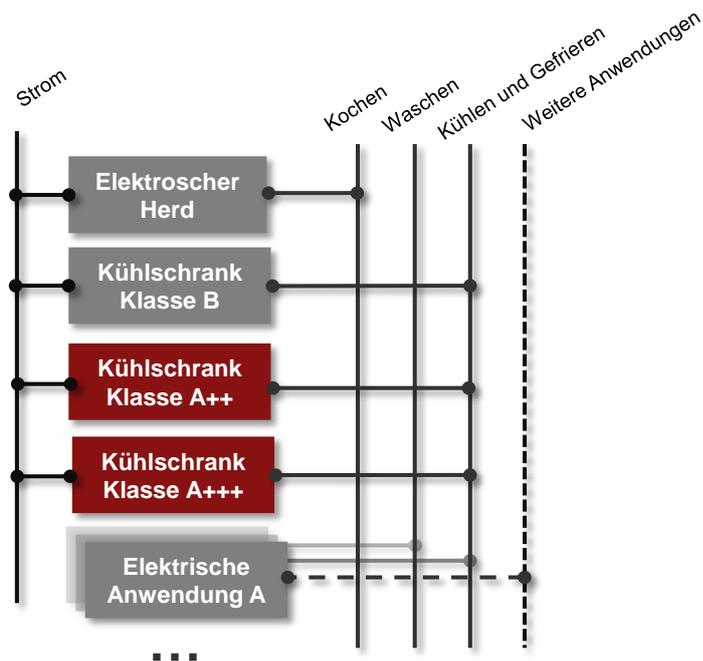


Abbildung 16: Investitionsoptionen im Bereich der Stromanwendungen

G-14 + G-24 + Ü-06: Differenzierung der Photovoltaik nach Sektor und Implementierung von Umlagen

Im TIMES Local Modell wird zwischen den Einspeiseoptionen der Photovoltaik (PV) in den verschiedenen Sektoren differenziert. Dabei werden die aufgrund der typischen Installationskapazität unterschiedlich hohen spezifischen Investitionen der PV für Wohngebäude, Nichtwohngebäude und Freiflächenanwendungen berücksichtigt. Für jeden Anwendungsbereich der PV wird ein limitiertes Dachflächenpotenzial zugeordnet. Freiflächen-PV Potenziale werden separat ausgewiesen. Es findet eine Unterscheidung zwischen Netzeinspeisung und Direktverbrauch des Solarstroms statt. PV-Strom kann zunächst direkt beim Prosumer verbraucht oder alternativ ins öffentliche Stromnetz eingespeist werden. Die Einspeisung wird dabei mit einem festen Vergütungssatz entlohnt, der den Systemkosten gutgeschrieben wird. Da der Strompreis aus dem öffentlichen Netz inklusive aller Steuern und Umlagen oberhalb der Vergütung liegt, kann durch Förderung der Eigenstromnutzung die Differenz zwischen dem sektoralen Strom-Einkaufspreis und der sektoral spezifischen Einspeisevergütung dazu genutzt werden, die Strombezugskosten zu reduzieren. Dies ist darauf zurückzuführen, dass direkt verbrauchter Strom für Anlagen unter 10 kWel und bis 10 MWh/a von Netzentgelten und der EGG-Umlage befreit ist. Zusätzlich kann der Strom-Eigenverbrauchsanteil durch den Einsatz von Stromspeichern gesteigert werden. Dabei kann jeder Sektor Investitionen in dezentral platzierte Batteriespeicher tätigen, um PV-Strom Überschüsse zwischen zu speichern und zu späteren Zeitpunkten zu nutzen. Aggregationseffekte der einzelnen Verbraucher, die aufgrund der Verwendung eines Punktmodells auftreten, werden durch Vorgabe maximaler Eigenverbrauchsanteile je Verbrauchergruppe berücksichtigt [23, 24]. Zusätzlich werden vier Potenzialstufen für den Verteilnetzausbau ins Modell implementiert, die stufenweise linear proportional zum Ausbau der PV verlaufen [22].

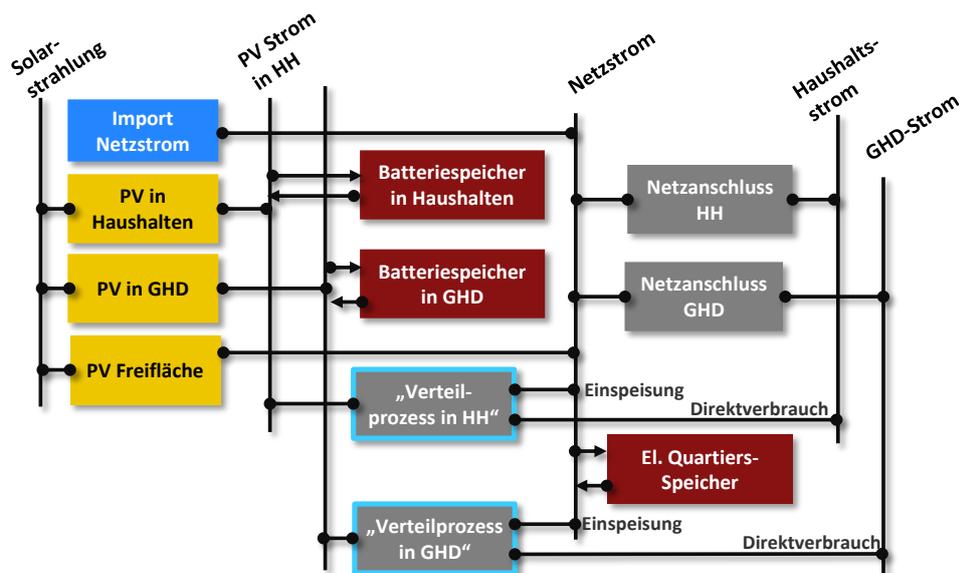


Abbildung 17: Modellierung sektorspezifischer PV in SCIM

G-23 + G-27 + G-28: Erneuerung der Wärme- bzw. Kälteerzeugung, -verteilung und -übergabe

Der Austausch bestehender Wärme- und Kältebereitstellungsanlagen durch Technologien mit einer höheren Effizienz kann den Endenergieeinsatz in sowohl Wohn- als auch Nichtwohngebäuden senken. Modellseitig sind hierzu analog zur oben beschriebenen Struktur der elektrischen Anwendungen endogene Investitionsoptionen im Bereich der Wärme- und Kältebereitstellung in Wohn- und Nichtwohngebäuden hinterlegt. Das Technologieportfolio setzt sich zusammen aus Gas-, Öl- und Pelletkesseln, Luft-, LPG-, und Erdwärmepumpen, elektrische Nachtspeicherheizungen, Nah- und Fernwärme Hausübergabestationen und Solarthermie. Je Technologiegruppe kann zusätzlich noch nach unterschiedlichen Effizienzklassen unterschieden werden. Neben den Investitionsoptionen in Heizzentralen mit gleichzeitiger Raumwärme- bzw. Kälte- und Warmwasserbereitstellung werden auch dezentrale Warmwasserbereitstellungstechnologien im Modell berücksichtigt. Jeder Technologie bzw. jedem dieser Prozesse sind typische Investitions- und Wartungs-/Instandhaltungskosten sowie Effizienzen hinterlegt. Die Technologien bilden ein endogen verfügbares Investitionsoptionsportfolio im Bereich der Wärme- und Kälteversorgung sowie in der Verteilung von Wohn und Nichtwohngebäuden.

G-29 + G-30: Nutzung von regenerativem Heizöl und von Wärmesenken zur Gebäudekühlung

Zur Abbildung dieser Maßnahmen sind im Modell endogen verfügbare Investitionsmöglichkeiten in Biodiesel bzw. Bioheizölkessel und in oberflächennahe Geothermie in Kombination mit Wärmepumpen im Bereich der Wärme- und Kälteversorgung in Nichtwohngebäuden berücksichtigt.

Die Implementierung der übergreifenden Maßnahmen in SCIM ist in Tabelle 11 und Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 12: Im Sustainable City Information Modell implementierte übergreifende Maßnahmen (1/2)

Bezeichnung	Bereich oder Name der Maßnahme	Kurzbeschreibung	Maßnahmenimplementierung ins Modell
Ü-01	Förderung von PV-Carports	Ableitung verfügbarer Dachfläche durch Installation von Carports mit PV-Nutzung	Förderung von PV-Carports durch Erhöhung des PV-Dachflächenpotenzials, Potenzial ist gekoppelt an Anzahl von Einfamilien- und Reihenhäusern
Ü-02-Ü-03	Demandside-Management Verkehr mit Haushalte und GHDI	Stromseitige Sektorkopplung des Verkehrs mit Gebäudebereich durch intelligente Einbindung der Elektromobilität ins Energiesystems mithilfe intelligenter Ladestrategien und Vehicle-to-Grid	Implementierung von Ladeganglinien in Elektromobilität und Einbindung einer Rückspeiseoption aus mobilen Batteriespeichern in Elektrofahrzeugen in das öffentliche Stromnetz über einen Vehicle-to-Grid Prozess
Ü-04	Kooperative Energiebereitstellung für Wohn- und Nichtwohngebäude durch KWK	Ziel der Maßnahme ist es, den Primärenergieverbrauch und den CO ₂ -Ausstoß zu reduzieren, indem die Wärmeversorgung netzgebunden von effizienter Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) erfolgt anstatt von Einzelgebäude-Wärmeversorgungslösungen.	Implementiert als zentrale Erzeugungstechnologie zur Bereitstellung von Nahwärme
Ü-05	Kooperative Energiebereitstellung für Wohn- und Nichtwohngebäude durch Wärmepumpen	Ziel der Maßnahme ist es, mithilfe von Wärmepumpen die Umgebungswärme nutzbar zu machen und in die Wärmeversorgung netzgebundener Kapazitäten einzubinden.	Implementiert als zentrale Erzeugungstechnologie zur Bereitstellung von Nahwärme
Ü-06	Nutzung von Skaleneffekten durch (kooperative) Nutzung von PV-Freiflächen und großen Solarthermie-Anlagen	Einbindung großer Solaranlagen (wärme- und stromseitig) auf verfügbaren Freiflächen innerhalb des betrachteten Bilanzraums	Implementierung von Freiflächen PV Potenzialen und eines separaten PV Prozesses mit spezifisch reduzierten Investitionen

Tabelle 13: Im Sustainability City Information Model implementierte übergreifende Maßnahmen (2/2)

Bezeichnung	Name der Maßnahme	Kurzbeschreibung	Maßnahmenimplementierung ins Modell
Ü-07	Effizienzsteigerung in bestehenden Nahwärmenetzen	Effizienzsteigerung durch Integration moderner Wärmeerzeugungsanlagen. Zusätzliche Reduktion des Primärenergieverbrauchs und des CO ₂ -Ausstoßes, durch Absenkung der Temperaturen in netzgebundenen Wärmeversorgungs-konzepten von Standard (90°C Vorlauf/ 60°C Rücklauf) auf Niedertemperatur-Nahwärmeversorgung (60°C/45°C) Damit sind Effizienzvorteile entlang der Wärmebereitstellungskette verbunden	Alternative Investitionsoptionen, die parallel zur konventionellen Nahwärme zugebaut werden können (endogen). Temperaturabsenkung von Wärmenetzen zur Effizienzsteigerung berücksichtigt durch alternative Investitionsoption, die parallel zur konventionellen Nahwärme zugebaut werden kann
Ü-08	Ausbau solar-unterstützter Nahwärme - LowEx Netze	Ziel der Maßnahme ist es, den Anteil der erneuerbaren Wärme in der Nahwärmeversorgung durch Einspeisung von Freiflächen-Solarthermie zu erhöhen und damit den CO ₂ -Ausstoß in der Wärmeversorgung zu verringern.	Endogene Investitionsoption im Bereich von LowEx Wärmenetzen
Ü-09	Abwasserwärmennutzung	Dekarbonisierung der Wärmeversorgung durch Abwasserwärmennutzung mittels Wärmepumpen gegenüber konventionellen Heizungssystemen	Abwasserwärmennutzung (inkl. Wärmepumpe) als Investitionsoption mit beschränktem Potenzial zur Bereitstellung von lokal nutzbarer Wärme z.B. durch Einspeisung ins Wärmenetz
Ü-10	Stromspeicher	Mit stationären elektrischen Speichersystemen kann der Eigenverbrauch von photovoltaisch erzeugtem Strom erhöht werden. Quartiersspeicher können eine Alternative zum konventionellen Netzausbau darstellen.	Stromspeicher zur Integration hoher Anteile Erneuerbarer Energien sowohl auf zentraler Ebene als auf Gebäudeebene implementiert
Ü-11	Warmwasserspeicher	Ziel der Maßnahme ist es, den Anteil der Erneuerbaren Wärme in der Wärmeversorgung zu erhöhen und Überschüsse an Erneuerbaren im System in Form von Wärme zu speichern	Warmwasserspeicher zur Integration hoher Anteile Erneuerbarer (z.B. mithilfe von Power-to-Heat sowohl auf zentraler Ebene als Quartiersspeicher als auch auf Gebäudeebene als kleiner Kellerspeicher implementiert
Ü-12	Austausch der Straßenbeleuchtung gegen LED-Leuchten	Die Straßenbeleuchtung hat einen relevanten Anteil am kommunalen Stromverbrauch. Hier besteht Stromeinsparpotenzial durch Modernisierung alter Leuchten.	Endogene Investitionsoption im Bereich der Straßenbeleuchtung
Ü-13	Quartiers- / Klimaschutzmanager	Ziel der Maßnahme ist die Etablierung eines Klimaschutzmanagers, der Umsetzung der verschiedenen Maßnahmen innerhalb des Bilanzraums steuert und fachlich-inhaltlich unterstützt, begleitet und deren Wirksamkeit überprüft.	Keine direkte Berücksichtigung im SCIM, wird als Unterstützende Maßnahme in übrige Maßnahmen eingeschlossen.

Ü-02+Ü-03: Demandside-Management Verkehr mit Haushalte und GHD

Die Abbildung der Elektromobilität zur Bereitstellung von Fahrleistungen (aufgeteilt in Kurz- und Langstrecke) erfolgt im Modell in Form von drei verketteten Prozessen, einem Beladungsprozess, einem Speicherprozess und dem Elektrofahrzeug. Durch diesen Ansatz ist es möglich eine Entkopplung zwischen der Stromnachfrage (dem Beladungsprozess) auf Netzebene und dem Stromverbrauch, der während der Fahrt anfällt, zu erreichen. Zusätzlich ist durch die Implementierung eines Vehicle-to-Grid Prozesses die Option für eine Rückspeisung des Stroms aus der Autobatterie ins Verteilnetz vorgesehen. Dies kann bei Bedarf im Zusammenhang mit DSM durch intelligente Steuerung zum Ausgleich von Spitzen oder Unterdeckungen im Netz genutzt werden (siehe Abbildung 18). Die Potenziale zu CO₂-Einsparung ergeben sich aus der direkten Nutzung von Strom zu Zeiten mit negativer Residuallast. Stromüberschüsse erhalten im Falle eines Exportes keine CO₂ Gutschrift und später anfallende Bedarfe müssen aus dem allgemeinen Strombereitstellungsportfolio gedeckt werden. In mobilen Batteriespeichern zwischengespeicherter Strom kann daher, auch unter Berücksichtigung der anfallenden Speicherverluste, zu einer Reduktion der lokalen Stromerzeugung zu Zeiten, in denen die Erzeugung aus EE die Stromnachfrage nicht deckt.

Die Beladungskurve wird dabei dem Energiesystemmodell exogen vorgegeben. Die Inputparameter liefert hierbei die Mobilität in Deutschland Studie und eine anschließende Markov Chain Monte Carlo Simulation des Mobilitäts-Verbraucherverhaltens [25]. Im Zuge der Simulation der Mobilitätsganglinien werden Wochenprofile der Personen- und Fahrzeugkilometer sowie der Lasten der Ladeinfrastruktur erstellt [26]. Durch Vorgabe der maximalen Verfügbarkeit der Elektroauto-Beladung im Energiesystemmodell ergibt sich endogen ein Speicherinhalt je Zeitsegment. Der Beladungszustand der Batterie bestimmt den Einsatz der Elektrofahrzeuge. Hierbei kann das Modell die im Speicher zur Verfügung stehende elektrische Energie zur Bereitstellung der Mobilitätsnachfrage oder für eine Rückspeisung ins Stromnetz nutzen. Der Speichereinsatz erfolgt somit modellendogen [22].

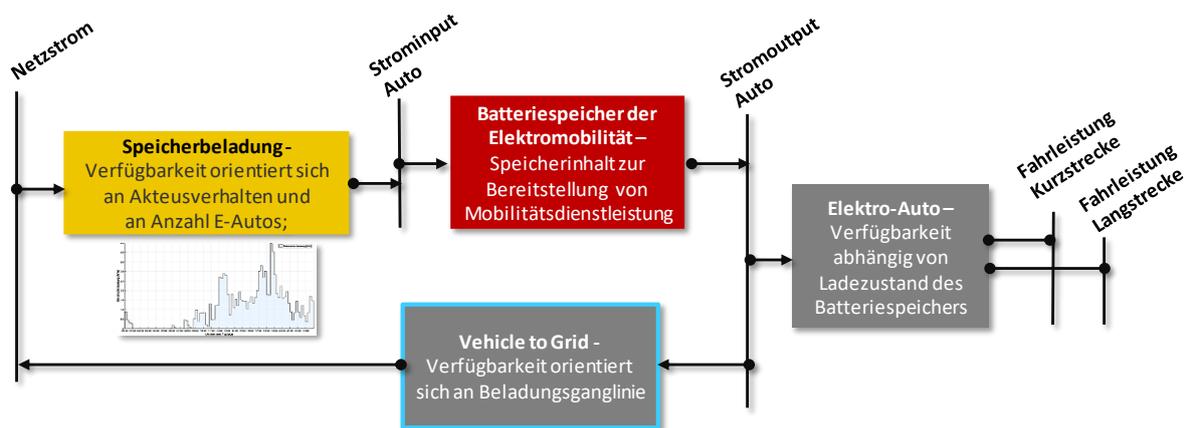


Abbildung 18: Modellierung der Elektromobilität und der Be- und Entladungsstruktur der mobilen Speicher

Ü-04 + Ü-05 + Ü-08: Kooperative Energiebereitstellung für Wohn- und Nichtwohngebäude durch KWK/Wärmepumpe und Ausbau solarunterstützter Nahwärme - LowEx Netze

Neben konventioneller Nahwärmesysteme basierend z. B. auf Gaskesseln ist modellseitig eine Wärmeerzeugung aus Blockheizkraftwerken (BHKW) und zentralen Wärmepumpen vorgesehen. Zusätzlich wird die Investitionsoption der solarunterstützten Nahwärme berücksichtigt. Diese können als Alternativen zur Bereitstellung der Nah- und Fernwärme für Wohn- und Nichtwohngebäude genutzt werden (siehe Abbildung 19 in rot), um die Effizienz (BHKW) bzw. den Einsatz erneuerbarer Wärme (Wärmepumpe, Solarthermie) zu steigern.

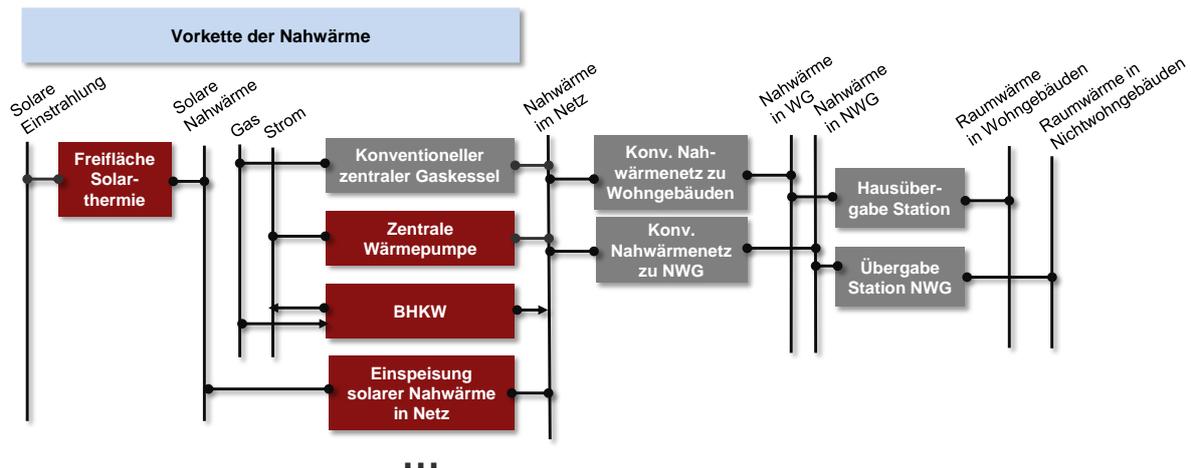


Abbildung 19: Modellstruktur der Nah- und Fernwärme

Ü-08: Effizienzsteigerung in bestehenden Nahwärmenetzen

Neben der erzeugerseitigen Effizienzsteigerung durch Integration moderner Wärmeerzeugungsanlagen können zusätzlich durch Absenkung der Temperaturen in netzgebundenen Wärmeversorgungskonzepten Einsparungen beim Primärenergieverbrauch und beim CO₂-Ausstoß realisiert werden. Diese resultieren aus einer Reduktion der Wärmeverluste entlang der Wärmebereitstellungskette. Modellseitig wird dieser Zusammenhang über den Ausbau der Wärmeinfrastruktur bzw. die Wärmeverteilung zum Verbraucher berücksichtigt. Alternative Investitionsoptionen mit geringeren Wärmeverlusten durch Reduktion der Vor- und Rücklauftemperaturen können endogen parallel zum konventionellen Nahwärmenetz zugebaut werden (siehe Abbildung 20 in rot markiert). Varianten dieser modernen Nahwärmenetze können z. B. „Low-Exergy“ Netze darstellen.

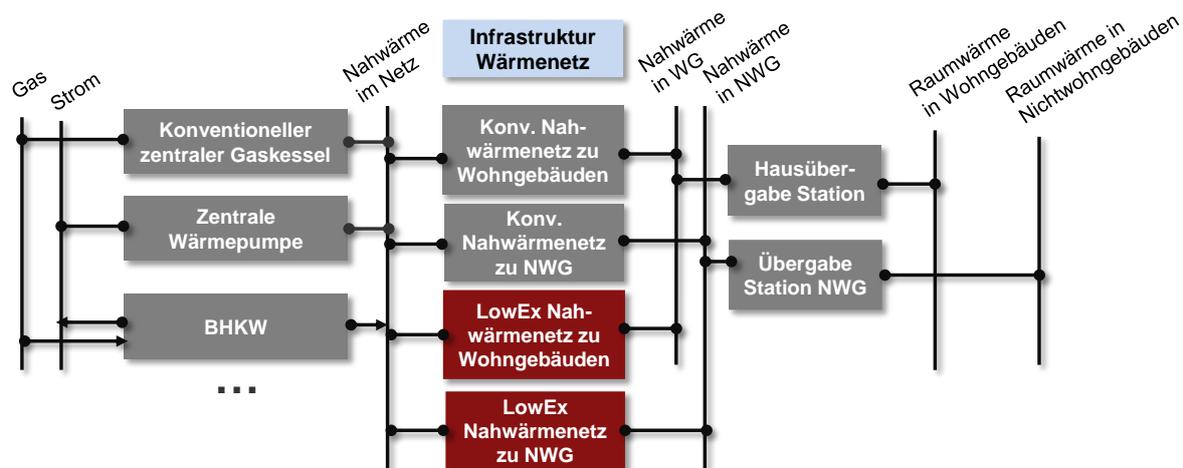


Abbildung 20: Modellstruktur der Verteilungsprozesse von Nah- und Fernwärme

Ü-09: Abwasserwärmenutzung

Analog zur oben beschriebenen Methodik der alternativen Investitionsoptionen zur Nahwärmebereitstellung ist im Modell ein Prozess zur Nutzung von Abwasserwärme implementiert. Diese Investitionsoption berücksichtigt die allgemeinen Kosten für die Wärmeübertrager sowie die Wärmepumpe mit beschränktem Potenzial zur Bereitstellung von lokal nutzbarer Wärme, die ins Wärmenetz eingespeist werden kann. Grundlage zur Potenzialbestimmung bzw. zur Einsparung liefert hierbei die Abwassermenge in Abhängigkeit der Größe des Bilanzraumes. Unter Berücksichtigung von Verschmutzungsverlusten und Jahresnutzungsgraden der Wärmeübertrager und der Wärmepumpe basierend auf [27] wird die Wärmemenge ermittelt, welche gegenüber der Referenz gewonnen werden kann. Die anfallende und verwertbare Abwassermenge, welche des Bilanzraumes variieren kann, wird in Abhängigkeit der Einwohnerzahl korrigiert [28]. Zusätzlich erfolgt eine Verfeinerung der landesbezogenen Potenziale anhand [27].

Ü-10 + Ü-11: Modellierung von Speichern und weiteren Flexibilitätsoptionen

Im Folgenden wird die modelltechnische Abbildung von thermischen und elektrischen Speicher- und Flexibilitätsoptionen erläutert, die im Zusammenhang mit der Abbildung der Maßnahmen eine bedeutende Rolle einnehmen [22].

Flexibilitätsoptionen in den Bereichen Strom, Wärme und Mobilität ermöglichen einen zeitlichen und räumlichen Ausgleich von Angebot und Nachfrage. Es werden zwei Arten von thermischen Speichern im Modell berücksichtigt. Neben zentralen Wärmespeichern zur Zwischenspeicherung von Nahwärme sind Investitionsoptionen für einen Warmwassertank auf Gebäudeebene implementiert. Für die Modellierung von stationären Lithium-Ionen Batteriespeichern wird zwischen Quartiersspeichern, die zur Netzstabilisierung und Speicherung von elektrischer Energie auf Niederspannungsebene dienen und dezentralen stationären Lithium-Ionen Batteriespeichern, die direkt bei den Verbrauchern installiert sind, unterschieden. Zusätzlich stellt auf der elektrischen Seite die eingeschränkte Nutzung von Vehicle-

to-Grid ebenfalls eine Variante der Systemflexibilität dar. Zur weiteren Flexibilisierung des Energiesystems werden die Optionen eines elektrischen Heizstabs im Nahwärmenetz oder Großwärmepumpen als Power-to-Heat Anwendung im Modell berücksichtigt. Darüber hinaus ist im Modell für dezentrale Wärmebereitstellungstechnologien (Öl- und Gaskessel) in Haushalten und GHD, die Option der Installation eines Heizstabes implementiert, der ebenfalls für Power-to-Heat eingesetzt werden kann.

Die modelltechnische Abbildung eines Speichers findet in TIMES Local als Abfolge von drei Prozessen statt. Dazu gehören ein Einspeicher-, ein Speicher- und ein Ausspeicherprozess. Während dem Einspeicher- und Ausspeicherprozess jeweils eine Leistung als Kapazität zugeordnet wird, beschreibt die Kapazität des Speicherprozesses den Inhalt und damit die speicherbare Energiemenge [20]. Dies ermöglicht eine modellendogene Bestimmung der Relation zwischen Speicherinhalt zu Speicherleistung. Dabei sind die Speicher auf der wöchentlichen Ebene des Modells implementiert, sodass der Speichereinsatz innerhalb der einzelnen Typwochen optimal eingesetzt wird, jedoch nicht übergreifend über die einzelnen Typwochen hinweg genutzt werden kann. Ein saisonaler Speichereinsatz findet damit nicht statt [29].

Ü-12: Austausch der Straßenbeleuchtung gegen LED-Leuchten

Der Austausch bestehender Straßenbeleuchtung durch moderne LEDs mit einer höheren Effizienz kann den Strombedarf in Gemeinden senken. Modellseitig ist hierzu eine Investitionsoption im Bereich der Straßenbeleuchtung hinterlegt. Dabei werden sowohl die Kosten, als auch der Wirkungsgrad des Prozesses berücksichtigt.

3 Angewandte Fallstudien

Im Rahmen der Anwendung des entwickelten Modellgenerators SCIM werden zwei Fallstudien analysiert. Die erste Fallstudie betrachtet Metzingen, d.h. eine Bestandskommune. Die zweite Fallstudie hat die Bewertung von Neubaukonzepten im Fokus und konzentriert sich auf ein mögliches Nutzungskonzept des Flughafens Berlin Tegel nach Beendigung des Flugbetriebs.

3.1 Fallstudie Metzingen

Die Stadt Metzingen ist eine baden-württembergische Mittelstadt, gelegen an der Schwäbischen Alb in der Region Neckar-Alb und untergliedert sich in drei Stadtteile: Metzingen, Glerns und Neuhausen. Metzingen ist mit 21.612 Einwohnern (Stand 2012) die zweitgrößte Stadt des Landkreises Reutlingen und bildet ein Mittelzentrum für die umliegenden Gemeinden. Metzingen, vor allem bekannt durch Fabrikverkäufe zahlreicher Textilunternehmen, kennzeichnet sich vor allem durch die Position eines starken Wirtschaftsstandortes [30].

3.1.1 Analyse der Ausgangssituation

Die Fläche der Stadt Metzingen beträgt 3.458 ha und die sich daraus ergebende Einwohnerdichte von 617 Einwohnern pro km² liegt doppelt so hoch wie der Landeswert in Baden-Württemberg (300 Einwohner/km²) (vgl. Tabelle 14). Mit einer Haushaltsgröße von 2,3 Personen im Mittel (insgesamt: 9.507 Haushalte) liegt Metzingen im Landesdurchschnitt (Baden-Württemberg: 2,1 Personen/Haushalt). In Metzingen waren in 2011 11.284 sozialversicherungspflichtig Beschäftigte gemeldet, wovon ein Drittel (3.767) im produzierenden Gewerbe tätig waren [30].

Tabelle 14: Steckbrief für die Stadt Metzingen 2012

Basis- und Strukturdaten Metzingen		Quelle
Fläche	3.458 ha	Statistisches Landesamt BW
Einwohner	21.612 (Stand 2012)	Statistisches Landesamt BW
Private Haushalte	9.176 (2011)	Zensus 2011
	9.507 (2014)	Statistisches Landesamt BW
Betriebe	ca. 700	Stadt/Stadtwerke Metzingen
... davon Industrie	89	Stadt/Stadtwerke Metzingen
Erwerbstätige	11.284 (2011)	Statistisches Landesamt BW
... davon Industrie	3.767	Statistisches Landesamt BW

Die Methodik der Endenergiebilanzerstellung für die Fallstudie Metzingen basiert auf dem Klimaschutzkonzept der Kommune [30]. Dabei wurden zur Ermittlung der sektorspezifischen Endenergiebedarfe und für die einzelnen Anwendungen die in Tabelle 15 gelisteten Quellen verwendet.

Tabelle 15: Verwendete Datenquellen zur Erstellung der Energiebilanz für Metzingen nach Sektor und Kategorie im Jahr 2012 [30]

Sektor	Anwendungsbereich		
	Strom	Wärme	Kraftstoffe
Private Haushalte	Stadtwerke, Durchschnittswerte in Abhängigkeit von der Haushaltsgröße (BDEW, Zensus [7, 31])	LUBW Daten, Schornsteinfegerdaten [30, 32]	
Kommunale Liegenschaften	Energiebericht Stadtwerke/Stadt [30]	Energiebericht Stadtwerke/Stadt [33]	
Industrie	Fragebogen, Stadtwerke, Statistisches Landesamt [33, 34]	LUBW Daten, Schornsteinfegerdaten [30, 32]	
Gewerbe / Handel / Dienstleistungen	Fragebogen, Stadtwerke, IFEU [30, 35]	Umfrage, Stadtwerke, Schornsteinfegerdaten IFEU [30, 32, 35]	
Motorisierter Individualverkehr Verkehr und motorisierter ÖPNV (Busse)			Verkehrsleistung und Berechnungsverfahren Endenergiebedarf nach Methodik in Kapitel 2.2
(Bahn-) Verkehr	Herleitung aus CO ₂ -Bilanzen des Statistischen Landesamtes BW [36]		

3.1.1.1 Endenergieverbrauch 2012 in Metzingen

Der Endenergieverbrauch in Metzingen beläuft sich auf 481 GWh im Jahr 2012. Mit ca. 288 GWh entfällt der Großteil des Endenergieverbrauchs auf die Bereitstellung von Wärme. Davon werden 5 % aus Erneuerbaren Energien gewonnen, wie Umwelt- und Erdwärme, Abwasser und Solarthermie. 81 GWh werden nach der in Kapitel 2.2 dargestellten Methodik in Form von Kraftstoffen für Mobilität eingesetzt. Durch die Biokraftstoff-Beimischungsquoten in Benzin und Diesel ergibt sich im Bereich des Verkehrs ein Anteil von etwa 6 % und am Gesamtenergieverbrauch ein Anteil von ca. 1 %, der auf Erneuerbare Energien zurückzuführen ist. Der Stromverbrauch in Höhe von 113 GWh macht 21 % des gesamten Endenergieverbrauchs in Metzingen im Jahr 2012 aus (siehe Tabelle 52 im Anhang). Eine Übersicht der Verteilung der Endenergieverbräuche aufgeteilt auf die verschiedenen Energieträger ist in Abbildung 21 dargestellt. Deutlich wird der hohe Anteil des Erdgases mit ca. 40 % am gesamten Endenergieverbrauch gefolgt von Strom (21 %). Die Nahwärmeversorgung mit 4 % als auch die Wärmebereitstellung direkt auf Basis Erneuerbarer Energien, wie z. B. aus Holz oder Solarthermie, mit 4 % spielen in Metzingen eine untergeordnete Rolle.

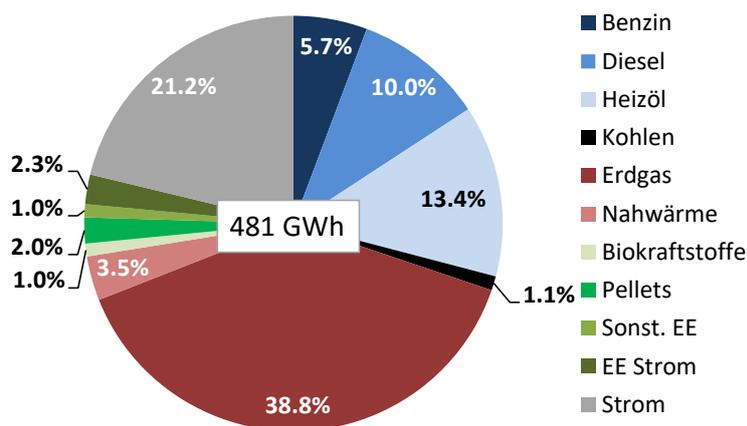


Abbildung 21: Endenergieverbrauch in Metzingen in 2012 nach Energieträgern

3.1.1.2 CO₂-Emissionen 2012 in Metzingen

Bei gegebenen Endenergiebedarfen und der Zuordnung zu einzelnen Energieträgern können mit Hilfe von spezifischen Emissionsfaktoren [g CO₂ je kWh] die damit einhergehenden CO₂-Emissionen bestimmt werden. Tabelle 16 stellt die verwendeten Emissionsfaktoren ohne Vorketten dar. Für erneuerbare Energieträger wird ein Emissionsfaktor von 0 g CO₂ pro kWh angenommen. Für nachwachsende Rohstoffe, wie Pellets und Holzhackschnitzel, wurde ebenfalls CO₂-Emissionsneutralität unterstellt [30].

Tabelle 16: CO₂-Emissionsfaktoren 2012 nach Energieträgern (ohne Vorkette)

Emissionsfaktoren nach Energieträgern	g CO ₂ pro kWh
Kohlen	338
Heizöl	266
Erdgas	201
Benzin	259
Diesel	266
Nahwärme ² Metzingen 2012	224
Strom Bundesmix ³ 2012	574
Strom Regionalmix ⁴ Metzingen 2012	512

² Eigene Berechnung, in der die Stromgutschrift-Methode zur Allokation von Strom und Wärme aus KWK-Erzeugung angewandt wurde.

³ „Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2014“, Umweltbundesamt 2015.

⁴ Eigene Berechnung. Emissionsfaktor, der sich aus dem Strombezug und der Eigenerzeugung ergibt.

Die verursacherbezogenen Emissionen betragen in Metzingen im Basisjahr 140 kt CO₂⁵. Dies ergibt einen durchschnittlichen Pro-Kopf-Emissionswert von 6,5 t CO₂/ppa. Zum Vergleich, die Pro-Kopf-CO₂-Emissionen des Landes Baden-Württemberg in 2012 betragen 8,7 t CO₂ pro Einwohner⁶. Dabei spielen die kleinen Verbraucher in Form von privaten Haushalten mit 39 % eine bedeutende Rolle gefolgt von der Industrie mit 23 % (siehe Abbildung 22). Der Anteil der Emissionen des Verkehrssektors und des GHD Sektors liegen mit jeweils 18 % auf einem Niveau.

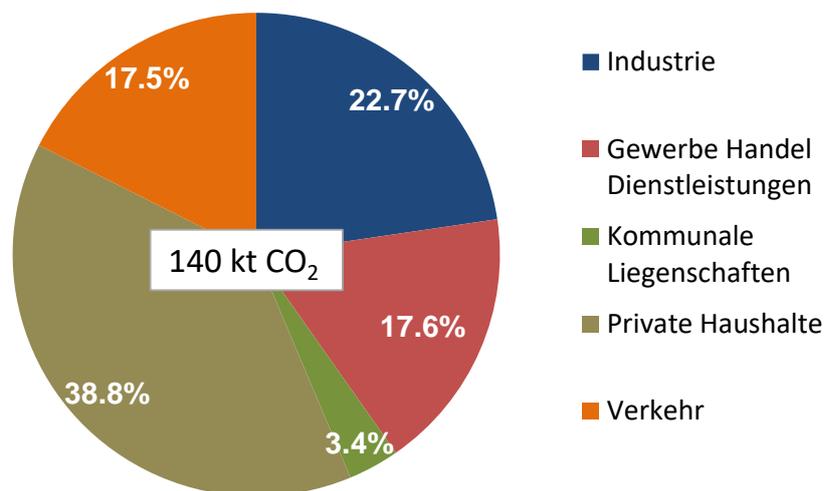


Abbildung 22: Endenergiebasierte Territorialbilanz: Energiebedingte CO₂-Emissionen in Metzingen in 2012 nach Sektoren (ohne Witterungskorrektur)

Abbildung 23 stellt die CO₂-Emissionen aufgeschlüsselt nach Energieträgern dar. Es ist zu erkennen, dass der Stromverbrauch für über 40 % der Emissionen verantwortlich ist gefolgt von Erdgas mit 27 %. Diesel und Benzin als Kraftstoffe im Verkehrssektor emittieren ca. 27 % der Gesamtemissionen in Metzingen. Werden die mit der Nahwärmeerzeugung verbundenen CO₂-Emissionen dem Nahwärmeverbrauch zugerechnet, so resultiert ein Anteil von 2,7 %.

⁵ Unter Anwendung der endenergiebasierten Territorialbilanz und der in Tabelle 16 dargestellten Emissionsfaktoren ohne Vorketten

⁶ Verursacherbilanz (hier vergleichbar mit endenergiebasierter Territorialbilanz, da Straßenverkehr vom Statistischen Landesamt hier quellenbilanziert wird); Einwohnerzahl nach Zensus, Energiebericht 2014, Statistisches Landesamt

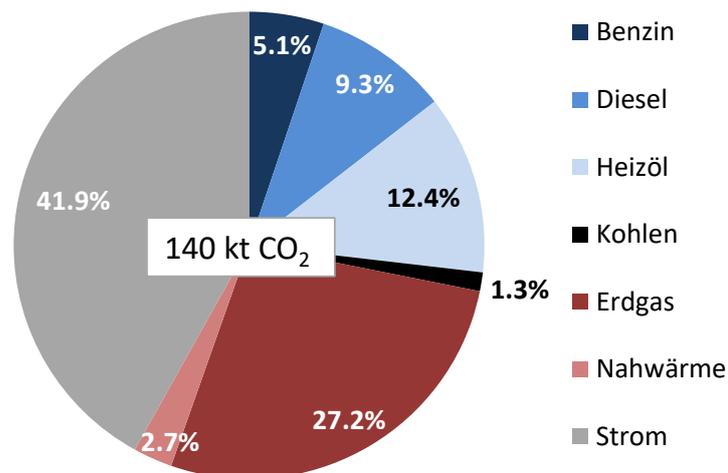


Abbildung 23: Endenergiebasierte Territorialbilanz: Energiebedingte CO₂-Emissionen in Metzingen in 2012 nach Energieträgern (ohne Witterungskorrektur)

3.1.2 Analyse des Gebäudebestands

Für das im Kapitel 2.3 beschriebene SCIM-Modell wurden Lastprofile in stündlicher Auflösung für den Nutzenergiebedarf von Wärme, für die Warmwasserbereitstellung und für Strom simulativ auf Basis der Deutschen Wohngebäudetypologie des IWU erstellt.

Zunächst wird kurz beschrieben, wie die erstellten Basisprofile für den Anwendungsfall um weitere Varianten ergänzt werden. Dies ist zum einen für die Anwendung des Betrachtungsansatzes auf die Fallstudien Metzingen und Berlin TXL notwendig, zum anderen für die allgemeine Verwendung im EN-Easy Tool. Später wird im Rahmen des EN-Easy-Modells näher auf die Beschreibung der Energieeinspar- und Energieeffizienzmaßnahmen eingegangen. Hierfür sind ebenfalls die Untervarianten zu den simulierten Basisprofilen erforderlich.

Um die Energieeinsparung durch Verbesserungen der Gebäudehülle bewerten zu können, werden entsprechende Verbesserungen ausgehend von den jeweiligen Basisprofilen über TRNSYS-Simulationen abgebildet. Die Basisprofile bilden die jeweiligen Gebäudetypen und Baualtersklassen im Zustand ihrer Erbauung ab (Fenstersanierung kann dabei bereits erfolgt sein). Um den Einfluss von Sanierungsmaßnahmen zu ermitteln, wurden die folgenden Varianten für alle Gebäude bis Baualtersklasse 1994 simuliert.

- Fenstersanierung
- Dachsanierung
- Außenwandsanierung
- Sanierung der untersten Geschossdecke
- Einfache Gebäudesanierung (Fenster, Dach, Außenwand)
- Komplette Gebäudesanierung (Fenster, Dach, Außenwand, unterste Geschossdecke, Wohnraumlüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung, Verbesserung der Dichtigkeit des Gebäudes)

Ausgehend vom Basiszustand des jeweiligen Gebäudes wurden dafür die folgenden Bauteile und Eigenschaften angepasst.

Tabelle 17: Anforderungen Verbesserungen Bauteile (Drees & Sommer)

Anforderungen Verbesserungen		
Fenster	1,30	[W/(m ² *K)]
Dach	0,24	[W/(m ² *K)]
Unterste Geschossdecke	0,30	[W/(m ² *K)]
Außenwand	0,24	[W/(m ² *K)]
RLT WRG	0,80	[-]
Infiltration	0,10	[1/h]

Die angegebenen U-Werte entsprechen dabei den Anforderungen der Energieeinsparverordnung EnEV 2014/2016 bei Sanierung der entsprechenden Bauteile.

Bei den Baualtersklassen 1995 – 2009 wurden keine entsprechenden Sanierungsprofile erstellt, da davon ausgegangen wird, dass bei Gebäuden dieses Baualters noch keine derartigen Sanierungen durchgeführt werden. Hier wird in Anlehnung an die Gebäudesteckbriefe des IWU das Basisprofil auf die Sanierungsstufen „Modernisiert I“ und „Modernisiert II“ skaliert, um bei Bedarf dennoch entsprechende Profile zur Verfügung zu haben (im Anhang ist als Beispiel einer der Gebäudesteckbriefe aus der Deutschen Wohngebäudetypologie [4] beigefügt).

Für die Baualtersklassen 2010 – 2016 und später sind, ergänzend zu den Basisprofilen, Profile für einen verbesserten Neubaustandard skaliert worden. In diesen Baualtersklassen bildet das Basisprofil die EnEV-Anforderungen ab, zudem sind die Profile nach Randbedingungen für den KfW Effizienzhaus 70 und KfW Effizienzhaus 40 Standard verfügbar, um über den gesetzlichen Anforderungen liegende Bedarfsprofile bereit zu halten. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine umfassende Datenbank stündlicher Energiebedarfsprofile für den Nutzenergiebedarf Wärme, Warmwasser und Strom erstellt wurde. Neben den Basisprofilen wurden für die Nutzwärme Profile verschiedener Sanierungsvarianten ergänzt.

Für die Anwendung in den Fallstudien und für die spätere Umsetzung im EN-Easy Tool hat es sich jedoch gezeigt, dass die Vielzahl an Profilen und die große Anzahl an Varianten zu komplex sind, vor allem für eine schnelle und einfache Verarbeitung und Auswertung. Aus diesem Grund wird das Gebäudemodell vereinfacht. Es wird keine stündliche Betrachtung bzw. Berechnung wie im SCIM-Modell mehr vorgenommen, sondern nur noch eine jährliche Bilanzierung betrachtet. Aus den Simulationsprofilen werden dafür die flächenbezogenen Werte der jeweiligen Altersklassen und Sanierungsvarianten herangezogen. Zudem erfolgt die Einteilung nicht mehr in die fünf Gebäudetypen EFH, RH, MFH, GMH und Hochhäuser, sondern nur noch in die Typen EFH und MFH. Der Flächenbezug ist dabei immer die Netto-Grundfläche NGF bzw. mit Novellierung der DIN 277:2016 die Netto-Raumfläche (NRF) (in diesem Projekt wird noch die Begrifflichkeit Netto-Grundfläche NGF verwendet).

Die folgende Tabelle zeigt die vereinfachten flächenbezogenen Bedarfswerte für den Basiszustand, die aus den Simulationsprofilen abgeleitet sind und sowohl für die Fallstudien als auch als Input für das EN-Easy Tool dienen.

Tabelle 18: Flächenbezogene Energiebedarfs Basiszustand

Baualtersklasse	EFH [kWh/(m ² NGF*a)]			MFH [kWh/(m ² NGF*a)]		
	Wärme	WWB	Strom	Wärme	WWB	Strom
bis 1859	167	10	36	172	15	25
1860 - 1918	164	10	36	131	15	25
1919 - 1948	150	10	36	151	15	25
1949 - 1957	164	10	36	141	15	25
1958 - 1968	164	10	36	115	15	25
1969 - 1978	139	10	36	120	15	25
1979 - 1983	109	10	36	105	15	25
1984 - 1994	120	10	36	108	15	25
1995 - 2001	100	10	36	83	15	25
2002 - 2009	70	10	36	53	15	25
2010 - 2015	40	10	36	48	15	25
ab 2016	26	10	36	46	15	25

Für die einzelnen Maßnahmen zur Energieeinsparung und Energieeffizienzverbesserung werden ebenfalls die flächenbezogenen Bedarfswerte herangezogen, wobei sich dabei nur die für den Nutzenergiebedarf Wärme je nach Sanierungsvariante ändern. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Energiebedarfe für die Warmwasserbereitstellung und die für elektrischen Strom bei einer Gebäudesanierung nicht ändern.

Auf die Profile für Nicht-Wohngebäude wird bei den Erläuterungen zur Fallstudie Berlin TXL eingegangen, da hier der Fokus fast ausschließlich auf Nicht-Wohngebäuden liegt.

3.1.3 Analyse des Verkehrs

Die Stadt Metzingen wird nach der BBSR Raumtypeneinteilung dem Landkreis Reutlingen, der Kategorie verstäderten Räumen-Verdichtete Kreise, zugeordnet. Tabelle 19 stellt eine Übersicht der Inputs für die Berechnungsgrundlagen des Verkehrsmodells aus MID, Zensus und MOP dar.

Aus den statistischen Daten und der im Kapitel 2.2 erläuterten Methodik ergibt sich für den Zweck Wohnen für das Fallbeispiel Metzingen ein Modal Split Anteil MIV von 62,68 %, eine durchschnittlichen täglichen Wegelänge von 14,85 km und einer Wegehäufigkeit von 1,69 Wegen pro Tag. Dabei beträgt der Besetzungsgrad der Fahrzeuge im Mittel ca. 1,53 Personen je Pkw. Im Zusammenhang mit dem Wegezweck Arbeit und Ausbildung finden in Metzingen je Beschäftigten 1,70 Fahrten am Tag mit je einer Länge von 19,18 km statt. Der Besetzungsgrad für den Zweck Arbeit und Ausbildung wird mit rund 1,48 Pers/Fz und einen Modal Split Anteil des MIV von mit 76,41 % angegeben.

Tabelle 19: Berechnungsgrundlagen Verstärkte Räume Verdichtete Kreise [34]

Bundesland:	Baden-Württemberg
Region:	Reutlingen
Stadt:	Metzingen
Einwohnerzahl:	21.612 EW
Beschäftigte:	11.284 ErW
Modal Split Anteil MIV Zweck Wohnen:	62,68 %
Wegelänge Zweck Wohnen:	14,85 km/d
Wegeanzahl Zweck Wohnen:	1,69 Wege/d
Besetzungsgrad Zweck Wohnen:	1,53 Pers/Fz
Modal Split Anteil MIV Zweck Arbeit und Ausbildung:	76,41 %
Wegelänge Zweck Arbeit und Ausbildung:	19,18 km
Wegeanzahl Zweck Arbeit und Ausbildung:	1,70 Wege
Besetzungsgrad Zweck Arbeit und Ausbildung:	1,48 Pers/Fz

Im Folgenden wird die Berechnung der Verkehrsleistung in Metzingen erläutert und die Anwendung der Berechnung zur Bestimmung der CO₂-Einsparpotenziale, die durch die Umsetzung der in Kapitel 2.3.1.2 vorgestellten Maßnahmen realisiert werden können, dargestellt.

3.1.3.1 Berechnung Fahrleistung IST-Zustand für die Fallstudie Metzingen

Zur Berechnung des IST-Zustandes der Gesamtfahrleistungen im Verkehrssektor werden die Fahrleistungen für den Zweck Wohnen mit der Fahrleistung des Zwecks Arbeit und Ausbildung addiert. Gleichung 14 gibt eine allgemeine Vorgehensweise der Berechnung des IST-Zustandes wieder. Die ausführliche Darstellung der Berechnung und Erklärung der verwendeten Variablen ist in Gleichung 1 dargestellt.

$$FL_{IST, Sum} = FL_{V_{Woh}} + FL_{V_{Arb}}$$

Gleichung 14

mit:

$FL_{IST, Sum}$ – Summe der Fahrleistungen innerhalb des Bilanzraums in einem Jahr [Fz.km/a]

$FL_{V_{zw}}$ – Fahrleistung je Fahrzeug pro Jahr für Zweck Wohnen oder Arbeiten [Fz.km/a]

Für den IST-Zustand ergibt sich eine Fahrleistung von ca. 54.703.963 Fz.km für den Bereich der Wohnbevölkerung und von ca. 13.523.877 Fz.km für den Bereich Arbeiten und Ausbildung pro Jahr in Metzingen. Insgesamt beträgt die gesamte jährliche Fahrleistung des motorisierten Individualverkehrs in Metzingen 68.227.840 Fahrzeugkilometer.

3.1.3.2 Berechnung Fahrleistung Maßnahmen-Zustand für die Fallstudie Metzingen

Zur Berechnung des Maßnahmenzustandes der Gesamtfahrleistungen im Verkehrssektor werden die Fahrleistungen für den Zweck Wohnen mit der Fahrleistung des Zwecks Arbeit und Ausbildung addiert. Gleichung 15 gibt eine allgemeine Vorgehensweise der Berechnung des Maßnahmenzustandes wieder. Die ausführliche Darstellung der Berechnung und Erklärung der verwendeten Variablen ist in Gleichung 1 dargestellt.

$$FL_{Ma\ddot{a}\beta, Sum} = FL_{V_{Woh}} + FL_{V_{Arb}}$$

Gleichung 15

mit:

$FL_{MAB, Sum}$ – Summe der Fahrleistungen innerhalb des Bilanzraums in einem Jahr [Fz.km/a]

$FL_{V_{Zw}}$ – Fahrleistung je Fahrzeug pro Jahr für Zweck Wohnen oder Arbeiten [Fz.km/a]

Zur Berechnung des Reduzierungspotentials stehen für das Fallbeispiel Metzingen für den Bereich des Wohnbevölkerungsverkehrs, folgende quantitative Maßnahmen zur Reduzierung der Fahrleistung im konventionellen MIV zur Verfügung:

- der Umstieg auf Elektromobilität
- die Stärkung des Umweltverbundes

Im Bereich Arbeits- und Ausbildungsverkehr gibt es folgende quantitative Maßnahme:

- Carpooling

In Tabelle 20 sind die Reduzierungspotenziale aller Maßnahmen für Metzingen dargestellt, unterteilt nach Fahrtzweck und als Mittelwert aus den Spannen der Einzelmaßnahmen.

Tabelle 20: Mögliche Reduzierungspotenzial der umsetzbaren Maßnahmen für Metzingen

Reduzierungspotenzial	Reduzierungspotenzial		
	Fahrtzweck [Fz.km]		Mögliche Gesamtreduzierung [Fz.km]
	Zweck Wohnen	Zweck Arbeiten	
Stärkung Umweltverbund (4% - 9%)	5.672.875	1.150.433	6.823.307
Elektromobilität (10 % - 30%)	5.262.205	3.539.819	8.802.024
Carpooling (3 % - 5%)	-	518.947	518.947

Durch die Maßnahme Stärkung Umweltverbund können die ausgegebenen Reduzierungsmaßnahmen (vgl. Kapitel 2.3.1.2) eine Einsparung der zurückgelegten Fz.km zwischen 4% - 9% erreichen. Dargestellt in Fahrzeugkilometer ergibt dies für den Fahrtzweck Wohnen eine mögliche Reduzierung im Mittel von 5.672.875 Fz.km und für den Fahrtzweck Arbeiten und Ausbildung von 1.150.433 Fz.km. Insgesamt kann durch die Maßnahme Stärkung Umweltverbund eine Einsparung der jährlich gefahrenen Fahrzeugkilometer von 6.823.307 Fz.km erreicht werden.

Durch die Maßnahme Elektromobilität können die ausgegebenen Reduzierungsmaßnahmen (vgl. Kapitel 2.3.1.2) eine Einsparung der zurückgelegten Fz.km zwischen 10% - 30% erreichen. Dargestellt in Fahrzeugkilometern ergibt dies für den Fahrtzweck Wohnen eine mögliche Reduzierung im Mittel von 5.262.205 Fz.km und für den Fahrtzweck Arbeiten und Ausbildung von 3.539.819 Fz.km. Insgesamt kann durch die Maßnahme Elektromobilität eine Einsparung der jährlich gefahrenen Fahrzeugkilometer von 8.802.024 Fz.km erreicht werden.

Durch die Maßnahme Carpooling können die ausgegebenen Reduzierungsmaßnahmen (vgl. Kapitel 2.3.1.2) eine Einsparung der zurückgelegten Fz.km für den Zweck Arbeiten und Ausbildung zwischen 3 % - 5 % erreichen. Dargestellt in Fahrzeugkilometern ergibt dies für den Fahrtzweck Arbeiten und Ausbildung eine mögliche Reduktion im Mittel von insgesamt 518.947 Fz.km.

3.1.3.3 Einsparpotenzial CO₂ und Kosten IST-Zustand zu Maßnahmen-Zustand für die Fallstudie Metzingen

Nach der Berechnung der Fahrleistung für den IST-Zustand und den Maßnahmenzustand (vgl. Kapitel 3.1.3.1 und 3.1.3.2) soll entsprechend Gleichung 5 und Gleichung 9 der Gesamtausstoß an t CO₂/a für Metzingen dargestellt werden. Berechnet wird dieser Wert zunächst für den Fahrtzweck Wohnen mit der Maßnahme Stärkung Umweltverbund und Elektromobilität für das Bestandsjahr 2016. Für den Fahrtzweck Arbeiten- und Ausbildung wird zu den beiden Maßnahmen die Maßnahme Carpooling ergänzt.

Im Weiteren wird nach Gleichung 5 und Gleichung 9 der Gesamtausstoß an t CO₂/a für den definierten Betrachtungshorizont 2030 unter Berücksichtigung eines reduzierten Modal Split Anteils MIV (Reduzierungspotentiale vgl. Kapitel 2.3.1.2) ermittelt.

Für Metzingen kann, für die Maßnahme Stärkung Umweltverbund, bei einer möglichen maximalen Senkung des Modal Split Anteils MIV um 9 %, der Gesamtausstoß für den Wohnbevölkerungsverkehr von 7.057 t CO₂/a auf 6.044 t CO₂/a gesenkt werden. Dadurch können rund 1.013 t CO₂/a vermieden werden (Gleichung 11). Für den Arbeits- und Ausbildungsverkehr ergibt sich eine Einsparung von 1.745 t CO₂/a auf 1.539 t CO₂/a. Dadurch können rund 205 t CO₂/a vermieden werden.

Für die Maßnahme Elektromobilität kann, bei einer möglichen Reduzierung des Modal Split Anteils MIV um 10 %, 15 %, 20 % oder 30%, eine Einsparung des Gesamtausstoßes für den Wohnbevölkerungsverkehr ausgegeben werden (Gleichung 5). Für den Bestand von 0,06 % Elektrofahrzeuge im Jahr 2016 hat dies eine Einsparung von 4 t CO₂/a zur Folge. Für den Betrachtungshorizont 2030 wird nach Gleichung 5 bei einer Reduzierung des Modal Split Anteils MIV zugunsten anderer Verkehrsträger (Fuß, Rad, ÖPNV) um 10 % eine Einsparung von 701 t CO₂/a erreicht. Bei Reduzierung des Modal Split Anteils MIV um 15 % ergeben sich Einsparungen von 1.054 t CO₂/a. Eine Reduzierung des Modal Split Anteils MIV um 20 % hat Einsparungen von 1.407 t CO₂/a zur Folge. Für das Szenario mit einer Reduzierung des Modal Split Anteils MIV um 30 % beträgt die Vermeidung sogar 2.113 t CO₂/a.

Kostenseitig muss nach Gleichung 7 für die Einsparung von einer t CO₂ ein Betrag von 1.952 €/t CO₂*a innerhalb der Kommune Metzingen investiert werden.

Für den Arbeits- und Ausbildungsverkehr kann, analog zum Wohnbevölkerungsverkehr (Gleichung 5), für den Grundbestand von 0,06 % Elektrofahrzeuge im Jahr 2016 eine Einsparung von 10 t CO₂/a ausgewiesen werden. Für den Betrachtungshorizont 2030 wird nach Gleichung 5 für eine Reduzierung des Modal Split Anteils MIV zugunsten anderer Verkehrsträger (Fuß, Rad, ÖPNV) von 10 % eine Einsparung von 164 t CO₂/a erreicht. Bei Reduzierung des Modal Split Anteils MIV um 15 % wird eine Einsparung von 251 t CO₂/a erreicht. Bei Reduzierung des Modal Split Anteils MIV um 20 % wird eine Einsparung von 338 t CO₂/a erreicht. Bei Reduzierung des Modal Split Anteils MIV um 30 % beträgt dies eine Einsparung von 513 t CO₂/a.

Kostenseitig muss nach Gleichung 7 für die Einsparung von einer t CO₂ ein Betrag von 1.950 €/t CO₂*a innerhalb der Kommune Metzingen investiert werden.

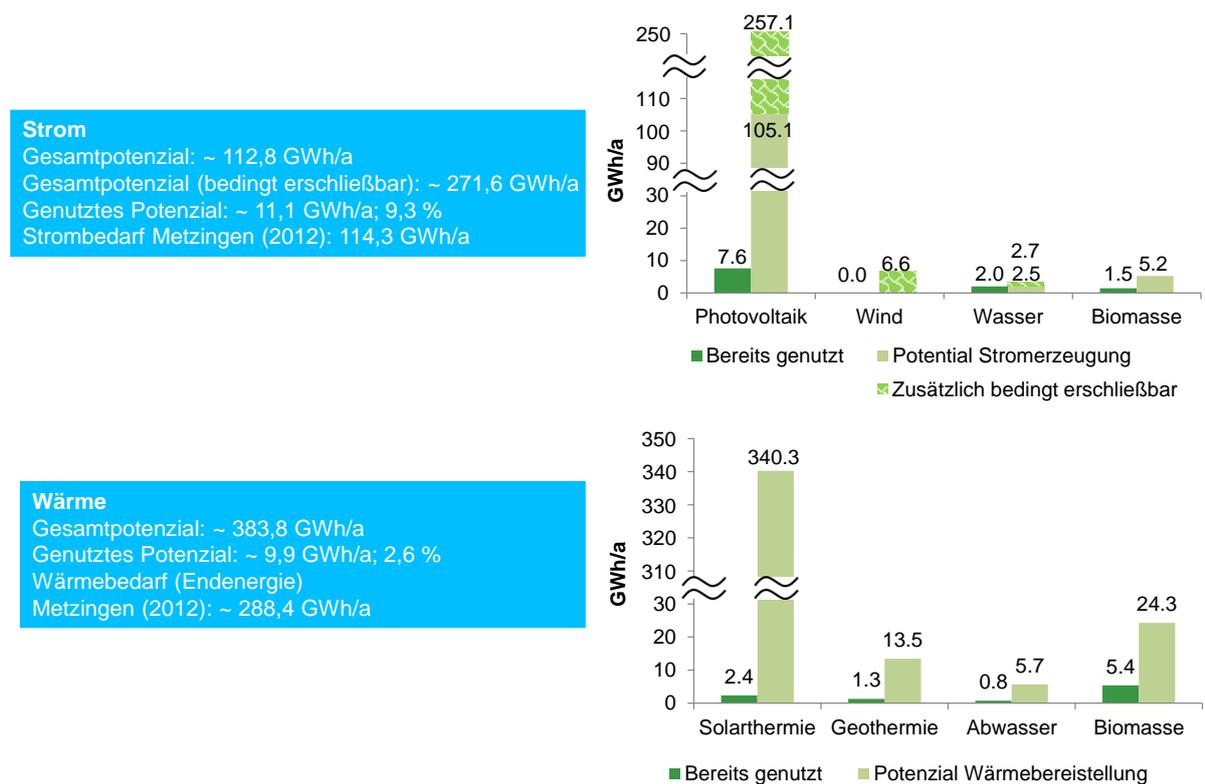
Für den Arbeits- und Ausbildungsverkehr (Maßnahme Carpooling) kann für Metzingen nach Gleichung 9, durch eine mögliche maximale Reduzierung des Besetzungsgrades um 5 %, der Gesamtausstoß für den Arbeits- und Ausbildungsverkehr von 1.343 t CO₂/a auf 1.279 t CO₂/a gesenkt werden und somit rund 64 t CO₂/a vermieden werden.

Kostenseitig muss nach Gleichung 10 für die Einsparung von einer t CO₂ ein Betrag von 256 €/t CO₂*a innerhalb der Kommune Metzingen investiert werden.

3.1.4 Szenarien – Rahmenannahmen

Im folgenden Abschnitt werden die Rahmenannahmen für die SCIM Szenarien erläutert. Dazu zählen die Annahmen für die Potenziale und die Fortschreibung des Bilanzraums Metzingen.

Die Berechnung der Potenziale Erneuerbarer Energien für den Bilanzraum Metzingen wurde unter anderem auf Basis eines geographischen Informationssystems (GIS) der Fallstudie sowie mit Hilfe von Einzelanalysen bestimmt. Abbildung 24 stellt eine Übersicht der Potenziale in Metzingen, jeweils ihrer Endnutzung für Strom bzw. für Wärme zugeordnet, dar [30].



Potenziale von Solarthermie wurde eine Wärmeengewinnung auf Basis von Vakuumröhren angenommen. Aufgrund der Flächenkonkurrenz ist eine gleichzeitige Ausnutzung der PV und Solarthermie-Potenziale auf den gegebenen Flächen nicht möglich. Das ausgewiesene Windpotenzial wurde dem Energieatlas der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg sowie einer standortspezifischen Einzel-Potenzialstudie entnommen [37]. Das bedingt erschließbare Windpotenzial schließt dabei die eingeschränkt nutzbaren Flächen in Metzingen ein [32]. Das maximal nutzbare Potenzial für die Wasserkraftnutzung basiert auf dem Energieatlas der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg [32]. Die wärmeseitige Nutzung der Geothermie resultiert aus dem Zubaupotenzial von Erdwärmepumpen in Neubauten und durch Modernisierungen von Bestandsbauten und wurde anhand des GIS für den Bilanzraum ermittelt. Für die Biomasse-Potenziale wurden die zur Verfügung stehenden landwirtschaftlichen Flächen und deren energetische Nutzung sowie einer für den Bilanzraum vorliegenden Potenzialstudie verwendet [36, 38]. Für die Nutzung der Biomasse wurde unterstellt, dass sie zum Teil in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen eingesetzt wird. Die gleichzeitige Erschließung der Wärme- und Strompotenziale schließen sich hier nicht gegenseitig aus. Das wärmeseitige Potenzial des Abwassers basiert auf einer Detailanalyse des Abwassersammlers am Ermstal [39].

Fortschreibung der Fallstudie Metzingen

Unter Berücksichtigung der Charakteristika der Fallstudie Metzingen werden eine Bevölkerungs-, Beschäftigtenentwicklung sowie eine Fortschreibung der Gebäudestruktur vorgenommen. Basierend auf der Bevölkerungsvorausrechnung der Regionalstatistik des Statistischen Landesamtes Baden Württemberg wird der gesamte Wohnraumbedarf und die damit einhergehende Nachfrage nach Nutzenergie in den Gebäude bestimmt (siehe Tabelle 21) [34].

Tabelle 21: Bevölkerungswachstum in Metzingen

	2012	2015	2020	2025	2030
Anzahl Bewohner [#]	21.612	22.943	23.802	24.194	24.244

Dabei entfällt auf den Gebäudebestand im Basisjahr eine Abrissquote von 0,15 %/a, die bis auf 0,5 % in 2050 linear ansteigt. Die resultierende Reduktion des Wohnraums wird durch den Zubau von Neubauten abgefangen unter Berücksichtigung der Entwicklung der spezifischen pro Kopf Wohnflächennachfrage [40]. Mit der Fortschreibung der Wohnraumnachfrage geht eine Anpassung der Nutzenergiebedarfe nach Raumwärme, Warmwasser, Kochen, Licht und Reststrom einher. In Verbindung mit der Entwicklung der nachgefragten Wohnfläche des Betrachtungsgebietes findet eine Fortschreibung der Dachflächenpotenziale für die Nutzung von Solarenergie statt. Neue Dachflächenpotenziale werden in den entsprechenden Jahren durch den Neubau PV und Solarthermie erschlossen. Die durch die Abrissquote bedingte Minderung des Dachflächenpotenzials wird ebenfalls berücksichtigt. Die Grundlage für die Entwicklung der Beschäftigung sowie die zukünftige Beurteilung des Standortes Metzingen aus wirtschaftlicher Perspektive liefert die Energiereferenzprognose des BMWi [40]. Dabei wurde die Entwicklung des Endenergieverbrauchs an die Bruttowertschöpfungsprognose in Deutschland gekoppelt⁷. Für den GHD Sektor und die Industrie

⁷ eigene Berechnungen, siehe [32]

wurden ausgehend vom Ist-Zustand im Basisjahr die Entwicklungen des Endenergieverbrauchs je Erwerbstätigen bis 2030 berechnet und auf Metzingen übertragen [40]. Im GHD Sektor wird der zusätzlich geplante Ausbau der Outlet Verkaufsflächen bis zum Jahr 2020 berücksichtigt. Darüber hinaus wird die Mobilitätsnachfrage des motorisierten Individualverkehrs sowie des Nutzlastverkehrs anhand des Bevölkerungswachstums und der Bruttowertschöpfungsprognose bestimmt⁷ [36].

Ausgehend vom IST-Zustand des Bilanzraums (2012) wird somit anhand von Indikatoren die Fortschreibung der einzelnen Energiedienstleistungsnachfragen entwickelt. Tabelle 22 liefert eine Übersicht der Angaben zu der Entwicklung in den einzelnen Sektoren [33, 41].

Tabelle 22: Sektoral indizierte Fortschreibung und Wohnflächennachfrage in Metzingen (2012 = 100 %)

	2012	2015	2020	2025	2030
Industrie aggregiert [%]	100,0	99,3	98,7	98,0	102,1
GHD klein [%]	100,0	102,6	105,2	110,8	112,6
GHD groß [%]	100,0	101,3	102,6	118,6	119,6
Verkehr MIV [%]	100,0	106,7	111,0	117,5	120,2
Nutzlastverkehr [%]	100,0	101,6	107,3	125,3	125,5
Wohnfläche Bestand [1000 m²]	1086,2	1075,8	1065,3	1150,0	1039,0
Wohnfläche Neubau [1000 m²]	0	11,4	39,8	56,9	80,0

3.1.5 Szenariendefinition

Die abgebildeten Maßnahmen wurden in zwei Szenarien für die Fallstudie Metzingen getestet. Das Basisszenario besteht aus keinen Einschränkungen bezüglich CO₂ Grenzen, Technologieförderungen und auch keinen Mindestquoten Erneuerbarer Energien. Es werden die oben erläuterten Annahmen zur Fortschreibung der Nachfragen getroffen. Das Basisszenario (BASE) beinhaltet zudem eine maximal zulässige Nutzung der zu Verfügung stehenden Dachflächenpotenziale für den Ausbau von PV oder Solarthermie in Höhe von 50 % des technischen Potenzials. Der Ausbau von Solarmodulen auf Freiflächen ist ebenfalls nicht zugelassen. Um nun die Wirkung der einzelnen Maßnahmen im Kontext eines lokalen Emissionsziels zu bewerten wird im zweiten Szenario eine Obergrenze für die verursacherbedingten CO₂-Emissionen definiert. Als Basis werden hierzu die Ziele der Landesregierung BW herangezogen. Diese hat im Zusammenhang mit der Dekarbonisierung des Energiesystems im Sinne der „Energiewende 50/80/90“ das Ziel ausgesprochen bis 2050 eine Reduktion des Primärenergieverbrauchs um 50 %, einem Anteil an Erneuerbaren von 80 % und damit eine Minderung des CO₂ Ausstoßes um 90 % verglichen zum Jahr 1990 zu erreichen [42]. Basierend auf den 50/80/90 Zielen wird für die Fallstudie Metzingen für das Jahr 2030 eine Reduktion der gesamten CO₂-Emissionen um 80 % im Vergleich zu 1990 [42]. Dies entspricht einem pro Kopf Ausstoß von 1,6 t CO₂ pro Person pro Jahr. Darüber hinaus soll bis 2020 eine CO₂-Reduktion um 25 % erzielt werden. Darüber hinaus ist ein Zubau von Gallium-Arsenid Photovoltaik Zellen und von Windkraft aufgrund der

bedingten Erschließbarkeit nicht zulässig. Die energetische Nutzung der landwirtschaftlichen Flächen wird ebenfalls ausgeschlossen. Eine Übersicht der Szenariendefinition im SCIM ist in Tabelle 23 gegeben.

Tabelle 23: Szenarienbeschreibung für BASE und ZIEL für die Fallstudie Metzingen

Szenario	Beschreibung
Referenzszenario (BASE)	Moderates Bevölkerungswachstum sowie moderates Beschäftigungswachstum (allgemein konservative Stadtentwicklung), Fortschreibung stützend auf Statistischem Landesamt BW, Energiereferenzprognose, Wirtschaftswachstum 1,3 %/a [33], keine Vorgabe von CO ₂ – Zielen; konservativer Ausbau Erneuerbarer Energien → 50 % des technischen Solarflächenpotenzials (PV; Solarthermie) verfügbar, keine energetische Nutzung der Freiflächen
CO₂-Reduktionsszenario (Ziel1)	Ziel: 80 % CO₂ Einsparung im Vgl. zu 1990 bis 2030 \cong 1,6 t CO ₂ / ppa Angelehnt an Landesziele BW 50/80/90 [42] → bindende Bedingung für SCIM ; volles technisches Solardachflächenpotenzial für PV, Solarthermie sowie Freiflächen verfügbar

Eine weitere Annahme betrifft die Entwicklung der Stromerzeugungsstruktur in Deutschland bis 2030, die einen direkten Einfluss auf den Strommixfaktor hat, der für den Stromimport in den Bilanzraum zu unterstellen ist. Die verursacherbezogenen CO₂-Emissionen lehnen sich an die Prognose des Umweltbundesamtes [43] und werden für die Stützjahre interpoliert (vgl. Tabelle 24). Zudem findet für eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse keine Variation der Strommixfaktoren zwischen BASE und ZIEL-Szenario statt.

Tabelle 24: Import von Strom aus Mittelspannungsebene basierend auf Entwicklung des Strommixes [43]

Strommixfaktor	2012	2015	2020	2025	2030
BASE - Szenario [t CO₂/MWh]	0,584	0,534	0,491	0,445	0,400
Zielszenario [t CO₂/MWh]	0,584	0,534	0,491	0,445	0,400

Die Energieträgerpreise und ihre Entwicklung im Betrachtungszeitraum lehnen sich an die Angaben des World Energy Outlook 2015 [44] an.

Für die Bewertung von Investitionsoptionen wird eine Vollkostenrechnung (kapital-, betriebs- und bedarfsgebundene Kosten)⁸ auf Basis der Annuitätenmethode vorgenommen. Zahlungen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallen, werden dabei durch Diskontierung auf das Basisjahr 2012 vergleichbar gemacht. Als interner Kalkulationszinssatz werden 3 % angenommen. Im Weiteren werden für die Kapitalkosten noch sektorspezifische Zinssätze angesetzt, um die unterschiedlichen

⁸ vgl. VDI 2067

Investitionskalküle von privaten Haushalten, dem GHD-Sektor und der Industrie zu berücksichtigen. Im Vergleich zum Haushaltssektor (3%) werden für den GHD-Sektor und die Industrie mit 8 % bzw. 15 % höhere interne Kalkulationszinssätze angesetzt, um die unterschiedlichen Zeit- und Risikopräferenzen zu berücksichtigen. Ein hoher Zinssatz impliziert eine hohe Zeitpräferenz und einen hohen Risikozuschlag für Investitionen. Für die wirtschaftlichen Sektoren (GHD und Industrie) ist beides als ausgeprägter anzunehmen im Vergleich zum Haushaltssektor. Überdies werden im Verkehr-Sektor je nach Zuordnung (privat oder gewerblich) noch 3 bzw. 8% als interner Kalkulationszinssatz verwendet. Dem öffentlichen Sektor als Teilbereich des GHD wird noch gesondert ein Zinssatz von 5% zugeordnet, um das geringere wirtschaftliche Risiko im Vergleich zum sonstigen GHD-Sektor zu berücksichtigen [45].

3.1.6 Ergebnisse des Szenarienanalyse

3.1.6.1 Endenergieverbrauch in Metzgingen

Welchen Einfluss ein ambitioniertes CO₂-Reduktionsziel auf die Endenergieträgerstruktur hat, wird in Abbildung 25 dargestellt. Der Endenergieverbrauch ist in beiden Szenarien verglichen zum Basisjahr rückläufig. Im Basisszenario sinkt dieser in 2030 auf 1602 TJ und im Zielszenario auf 1430 TJ. Dies entspricht einer Reduktion um 7,5 % bzw. 17,6 %. Es wird jedoch deutlich, dass mit zunehmenden Einschränkungen der CO₂-Emissionen vor allem Mineralölprodukte und Erdgas durch den Einsatz Erneuerbarer (bestehend aus Umwelt-, Erdwärme, Solarkraft und Biomasse) verdrängt werden.

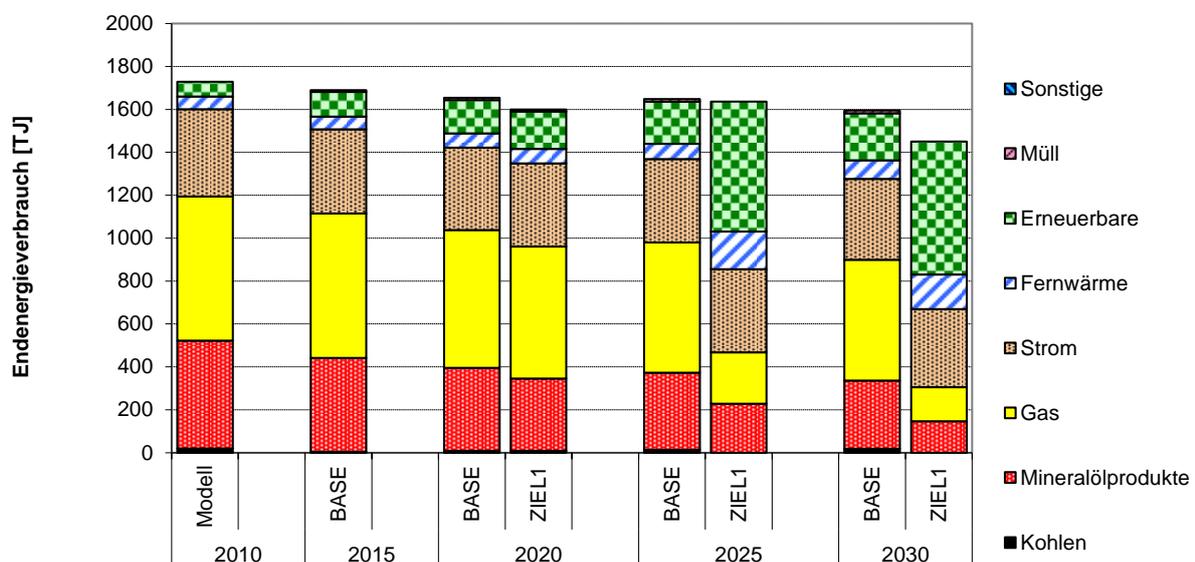


Abbildung 25: Entwicklung des gesamten Endenergieverbrauchs nach Energieträgern in Metzgingen (Vergleich des Basisszenarios und des Zielszenarios)

Wird die Endenergienachfrage der Haushalte im Detail betrachtet so ist zu erkennen, dass ein Großteil der Wärmenachfrage im Zielszenario durch Pelletkessel bereitgestellt wird. Der Einsatz klimaneutraler Biomasse stellt hier eine kostengünstige Alternative zur Dekarbonisierung der Wärmeerzeugung in Haushalten dar. Trotz Bevölkerungswachstum bis 2030 und dem daraus resultierenden Anstieg der

kumulierten Wohnfläche ist in beiden Szenarien eine Reduktion der Endenergienachfrage für Raumwärme erkennbar.

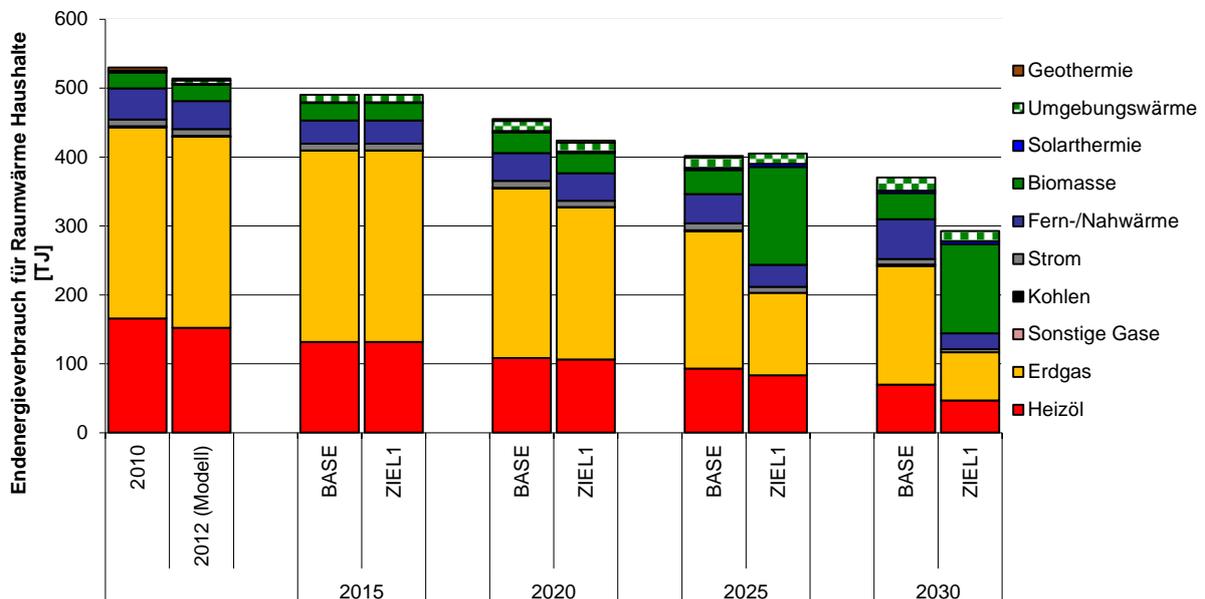


Abbildung 26: Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern für Haushalte in Metzingen

Dies ist sowohl auf den im Vergleich zum Bestand hohen Standard der Neubauten als auch die verstärkte Nutzung von Sanierungsmaßnahmen zurückzuführen (siehe Abbildung 27).

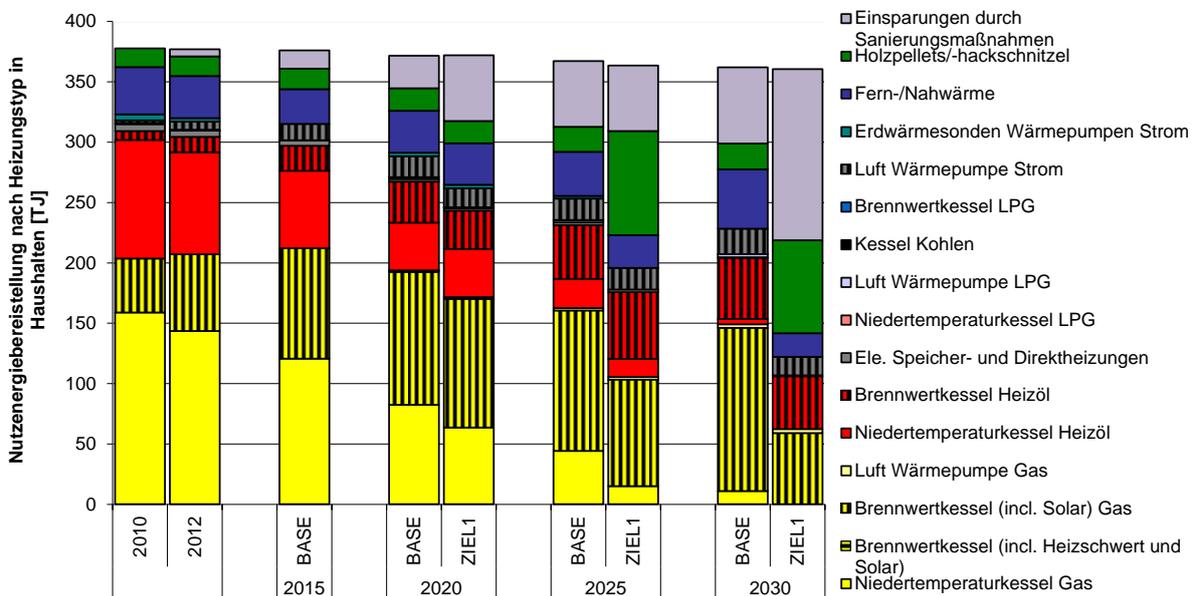


Abbildung 27: Nutzenergiebereitstellung von Raumwärme in Haushalten nach Technologietyp in Metzingen

Während im Basisszenario die Nutzenergienachfrage in diesem Bereich für den Haushaltssektor abzüglich der durchgeführten Sanierungen bis 2030 um ca. 17 % zurückgeht verglichen zu 2012, wird

im Zielszenario dank umfangreicher Gebäudeerneuerungsmaßnahmen eine Reduktion um 41 % erzielt, in Referenz zum Basisjahr. Zusätzlich ist erkennbar, dass der Einsatz fester Biomasse in Wohngebäuden zur Bereitstellung von Wärme in erster Linie konventionelle Gas - aber zum Teil auch Brennwertkessel ersetzt. Ein Ausbau von effizienten Wärmepumpen findet im Zielszenario nicht statt. Dies ist den hohen Investitions- und Wartungskosten geschuldet. Ebenfalls die Versorgung von Wohngebäuden mit Nahwärme spielt aufgrund der relativ gesehen höheren Wärmegestehungskosten im Vergleich zu Pelletkesseln im Zusammenhang mit ambitionierten Emissionszielen eine abnehmende Rolle. Stadtteile von Metzingen, die nicht ans Gasnetz angeschlossen sind sowie eine Obergrenze für den Import fester Biomasse führen dazu, dass ein Grundsockel an Heizölbetriebenen Heizungen in 2030 im Zielszenario vorhanden ist.

Der Einsatz biogener Energieträger, die klimaneutral sind, ist im Kontext von CO₂-Reduktionszielen neben dem Haushaltssektor auch im Verkehrssektor zu beobachten (Abbildung 28). Hier werden bis 2030 die Mineralölprodukte Benzin und Diesel zu großen Teilen durch Bioethanol und Biodiesel ersetzt. Beide Szenarien weisen deutlich verringerte CO₂ Emissionen im Vergleich zum Basisjahr auf. Die Reduktion des gesamten Endenergieverbrauchs im Verkehr im Zielszenario bis zum Jahr 2030 ist auf die Maßnahme „Umweltverbund“ zurückzuführen, die durch geringeren motorisierten Individualverkehr im Vergleich zur Referenz zu weniger Fahrten und daher zu einer geringeren Energiedienstleistungsnachfrage führt (-14 % im Vgl. zu 2012). Darüber hinaus erzielt die verstärkte Nutzung der Elektromobilität aufgrund der höheren spezifischen Wirkungsgrade im Vergleich zu fossil betriebenen Fahrzeugen eine weitere EEV Reduktion.

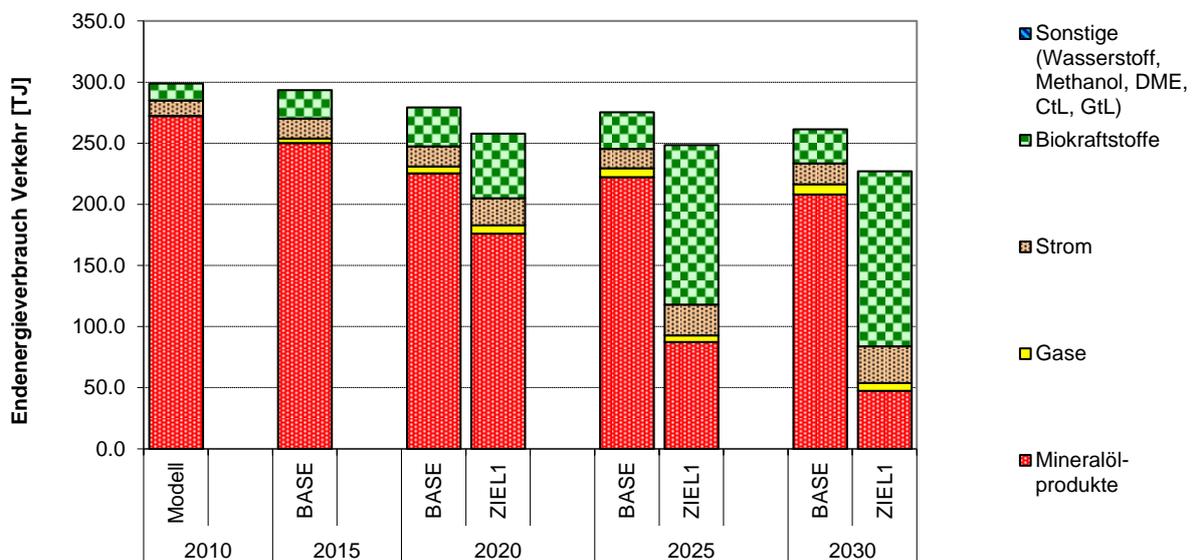


Abbildung 28: Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern für Verkehr

3.1.6.2 Strombereitstellung und Strombedarf

Abbildung 29 zeigt die zeitliche Entwicklung des Strombedarfs für die beiden Szenarien. Hierbei ergibt der zeitliche Verlauf aber auch der Vergleich zwischen den Szenarien keine deutliche Veränderung des Strombedarfs. Der leichte Anstieg im Verkehrssektor im Zielszenario wird durch die zunehmende

Elektromobilität verursacht. Die aus der Elektrifizierung des Verkehrssektors, der Zunahme der Bevölkerung und aus dem Wirtschaftswachstum resultierende gestiegene Stromnachfrage können durch Effizienzgewinne im Strombereich vollständig kompensiert werden.

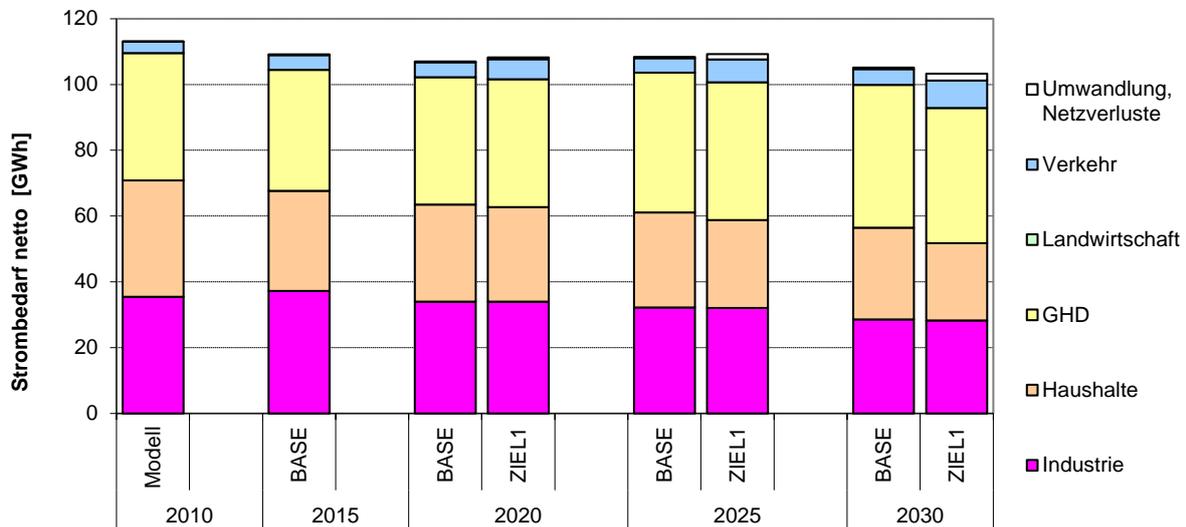


Abbildung 29: Entwicklung des Strombedarfs nach Sektoren in Metzingen

Wird nun die Strombereitstellungsstruktur in Abbildung 30 betrachtet, so ist erkennbar, dass 72 % der Strombereitstellung in 2030 im Zielszenario auf Erneuerbaren Energien basiert.

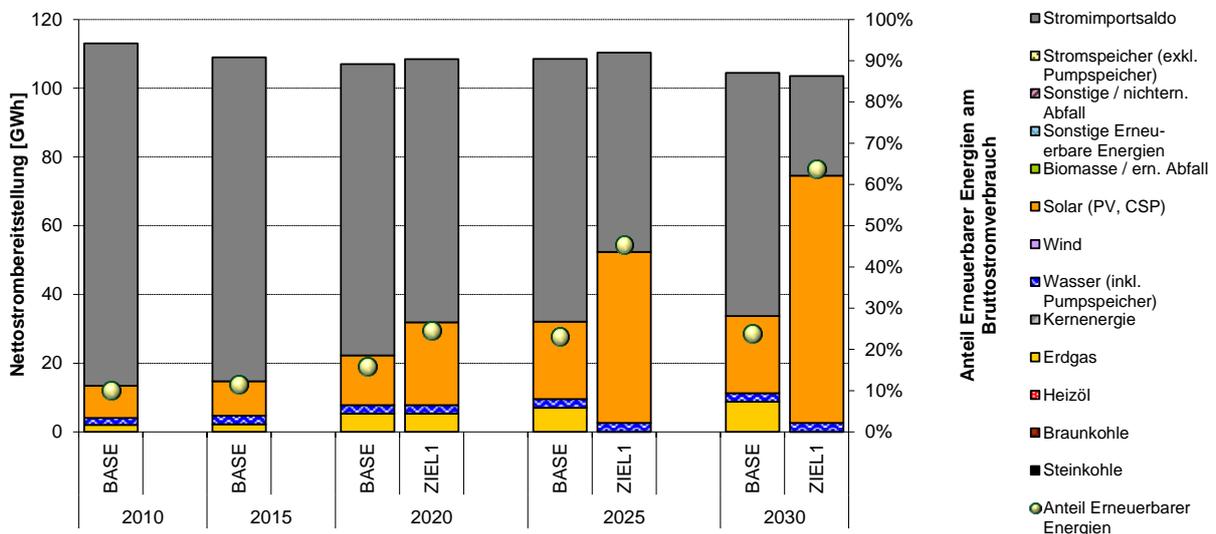


Abbildung 30: Entwicklung der Strombereitstellung in Metzingen

Mit 24 % liegt dieser Wert im Basisszenario in 2030 deutlich darunter. Zudem findet kein Einsatz von fossil befeuerten BHKWs im Zielszenario statt. Die Zunahme der auf erdgasbasierten Strombereitstellung in der Referenz bis 2030 wird durch die Nutzung der Nahwärme in Haushalten und

GHD gefördert. Der wärmegeführte Einsatz von BHKWs trägt zur Wärmeversorgung des Bilanzraums bei, bei gleichzeitiger Stromspeisung ins Netz. Dies führt aus Systemsicht zu geringen spezifischen Gesteungskosten beim Strom.

3.1.6.3 CO₂-Emissionen

In Abbildung 31 sind die CO₂ Emissionen der beiden Szenarien für die Fallstudie Metzgingen dargestellt. Der Vergleich zeigt den Unterschied zwischen einem BASE-Pfad und den gesetzten politischen Klimazielen deutlich. Während im Basisszenario in 2030 ein CO₂ Ausstoß in Höhe von ca. 100 kt pro Jahr vorliegt, wird dieser Wert im Zielszenario bis auf ein Niveau von 40 kt pro Jahr reduziert. Die CO₂ Reduktion um 40 % im Basisszenario bis 2030 im Vergleich zum Ausgangszustand in 2012 kann als volkswirtschaftlich ökonomisches Potenzial, unter Berücksichtigung der Fortschreibung des Bilanzraums, verstanden werden. Ein Blick auf die sektorale Verteilung der CO₂ Emissionen verdeutlicht, dass die größten relativen Einsparungen im GHD und Haushaltssektor zu erzielen sind. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass diese Sektoren in Relation zur Industrie bzw. zum Verkehr ein hohes Verhältnis zwischen PV Potenzial, sowie alternativen Versorgungsmöglichkeiten und dazu relativ gesehen niedriger Endenergienachfrage aufweisen. Hinzukommt, dass je ins öffentliche Stromnetz eingespeiste Kilowattstunde PV-Strom, dem entsprechenden Sektor, in dem die PV Anlage installiert ist, eine CO₂-Gutschrift zugeschrieben wird und zwar in Höhe des allgemeinen Strom-Faktors. Dieses sektorale CO₂-Budget kann dazu führen, dass ein Sektor, trotz Nutzung fossiler Energieträger einen relativ geringen CO₂ Ausstoß aufweist.

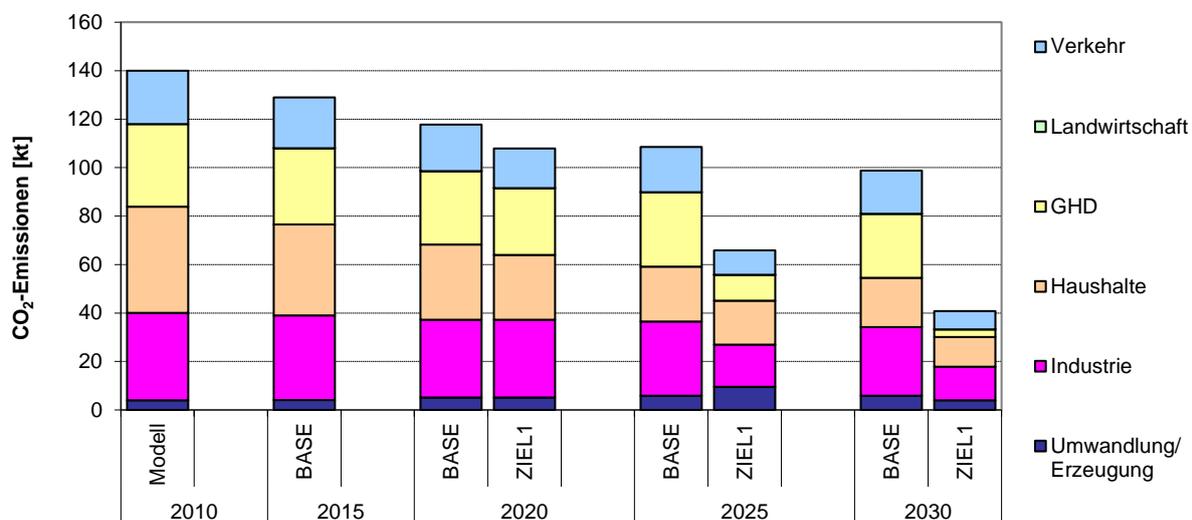


Abbildung 31: Entwicklung der sektorspezifischen CO₂ Emissionen in Metzgingen (Vergleich des Basisszenarios und des Zielszenarios)

Ein Blick auf die gesamten CO₂ Emissionen verdeutlicht, dass die größten relativen Einsparungen im GHD und Verkehrssektor zu erzielen sind. Im Basisszenario fallen die Emissionen um 31,3 % und im Zielszenario gar um 71,4 % im Vergleich zum Ausgangszustand in 2012. Die CO₂ Reduktion im Basisszenario bis 2030 kann dabei als volkswirtschaftlich ökonomisches Potenzial, unter Berücksichtigung der Fortschreibung des Bilanzraums, verstanden werden.

3.1.7 Auswirkungen der Klimaschutzmaßnahmen

Der Szenarienvergleich hat gezeigt, dass durch die zusätzlichen Ziele des Klimaschutzes bzw. mit der Umsetzung der Klimaschutzmaßnahmen eine deutliche Veränderung in der Versorgungsstruktur des Energiesystems durchgeführt wird. Neben der starken Elektrifizierung ist vor allem der Einsatz der biogenen Energieträger im Verkehr und im Haushaltsbereich für die Wärmebereitstellung erkennbar. Die Erhöhung der Stromnachfrage im Vergleich zum Startjahr, verursacht durch die Elektrifizierung sowie das Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum können fast vollständig durch Effizienzgewinne bei den Verbrauchstechnologien kompensiert werden. Zudem erfordert die CO₂-Reduktion eine Dekarbonisierung der Nahwärme. Vor allem im Bereich der Industrie, wo notwendige Prozesstemperaturen im konventionellen Betrieb den Einsatz von Öl, Kohle, Gas oder Strom erfordern ist eine Transition notwendig. Die Ergebnisse zeigen, dass eine neue Struktur mit kleinen Hochtemperatur Nahwärmenetzen die Industrie beliefern kann, gespeist durch Solarthermie, Wärmepumpe und den Einsatz von elektrischen Zusatzheizern zur Erhöhung der erforderlichen Temperaturen.

Einen Überblick über die Systemkosten der beiden Szenarien und die sich daraus ergebenden Kosten für die CO₂-Einsparungen sind in Tabelle 25 dargestellt.

Tabelle 25: Systemkosten und resultierende CO₂ Vermeidungskosten für Basis- und Zielszenario für Fallstudie Metzgingen

	BASE	ZIEL1
CO₂ Emissionen pro Kopf pro Jahr in 2030 [t/ppa]	4,1 (-37 % ggü. 2010)	1,8 (-72 % ggü. 2010)
Kumulierte CO₂ – Emissionen bis zum Zieljahr 2030 [kt]	2.411,9	1.899,1
Kumulierte CO₂ Einsparungen gegenüber Basisszenario [kt]	-	512,8 (-21 %)
Jährliche CO₂ Einsparungen in 2030 gegenüber Basisszenario [kt]	-	56,5
Diskontierte Systemkosten [T€]	1.011.549	1.250.966
Durchschnittliche Mehrkosten pro Kopf pro Jahr [€₂₀₁₀/ppa]	-	414,3
Durchschnittliche spezifische CO₂ – Vermeidungskosten [€₂₀₁₀ /t CO₂]	-	466,7

Die Diskontierung der Systemkosten wurde dabei mit einer globalen Diskontrate bzw. einem internen Zinssatz von 7,5% vorgenommen. Die durchschnittlichen spezifischen CO₂ – Vermeidungskosten

werden dabei als Quotient der Systemkostendeltas und der kumulierten CO₂ Einsparungen gegenüber dem Basisszenario bestimmt. Auffällig sind dabei die hohen Mehrkosten je Einwohner für die Erreichung des Emissionsziels 80 % weniger CO₂ im Jahr 2030 zu emittieren im Vergleich zu 1990.

3.1.8 Energiewirtschaftliche Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

Zur Erreichung ambitionierter Emissionsziele ist in einem städtischen Bilanzraum der Beitrag von allen Sektoren erforderlich. Dabei spielt die Transformation des Energiesystems für die Versorgung der privaten Haushalte und des GHD-Sektor eine tragende Rolle: Zusammen beläuft sich ihr Anteil an der gesamten CO₂-Einsparung im Klima-Szenario bis 2030 gg. 2010 auf 63 % (zum Vergleich Industrie: 22 %, Verkehr: 14 %). Das größte relative Einsparpotenzial innerhalb eines Sektors besteht im GHD-Bereich (91 % CO₂-Reduktion von 2030 gg. 2010), gefolgt von den privaten Haushalten (73 % CO₂-Reduktion). Im Verkehr beträgt die CO₂-Reduktion 64 % und der Industrie 61 % gegenüber 2012. Zudem wird deutlich, dass die an das Jahr 2030 angepassten Landesziele nur in Verbindung mit dem Einsatz biogener Rohstoffen zu erfüllen sind. Neben dem Einsatz fester Biomasse im Zusammenhang mit der „Wärmewende“ sind Biokraftstoffe auch im Verkehr eine wirtschaftliche Alternative im Zusammenhang mit Klimaschutz. Ob das Potenzial bzw. die Kundenakzeptanz, vor allem im Verkehrsbereich gegeben ist, bleibt zu bezweifeln. Aus Systemkostensicht bietet sich jedoch der Einsatz von Biomasse in einem kleinen Bilanzraum an. Die Förderung von biomassebasierten Rohstoffen, vor allem im Bereich der Wärmeversorgung in Haushalten und insbesondere in Einfamilienhäusern kann einen bedeutenden Beitrag zu den Emissionszielen leisten. Für die Nutzung von Biomasse sollte angesichts aktueller Naturschutzprobleme (z. B. Artensterben) ein naturschutzverträglicher Anbau sichergestellt werden. Zudem muss gewährleistet sein, dass eine breite energiewirtschaftliche Nutzung von biogenen Energieträgern dem Konzept der Nachhaltigkeit durch den Anbau von Monokulturen nicht entgegenwirkt. Für die Umsetzung der Maßnahmen aus Sicht der lokalen Energieversorgungsunternehmen kann hierbei die Erweiterung des Geschäftsfeldes auf den Verkauf von Biomassebasierten Brennstoffen aus nachhaltigem Anbau genannt werden.

Deutlich wird auch, dass die Erreichung der ambitionierten CO₂-Reduktionsziele für die Fallstudie Metzgingen in direktem Zusammenhang mit der verstärkten Nutzung von Solarenergie verknüpft ist. Zum einen findet stromseitig ein Ausbau von PV statt, wodurch Solarstrom einen Großteil des Bedarfs decken kann und zum anderen bietet Solarthermie Potenzial zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung durch Einbindung an bestehende Wärmenetze. Eine diesbezügliche Inzentivierung z. B. eine kommunale Förderung bzw. Unterstützung der Stakeholder seitens der Stadt kann dazu dienen Hemmnisse, die eine Umsetzung blockieren, abzubauen. Zusätzlich kann die Nutzung von Contracting-Modellen die Akzeptanz in dieser Hinsicht weiter erhöhen.

Es ist hervorzuheben, dass für eine erfolgreiche Umsetzung der Energiesystemtransformation in den meisten Fällen eine Kooperation mit den lokalen Energieversorgungsunternehmen bzw. der Wohnungswirtschaft erforderlich ist. Dabei können lokal verankerte EVUs unter Umständen neue Geschäftsfelder und z. B. Kampagnen für Heizungsumwälzpumpenaustausch verknüpft mit Erneuerung der Heizungen initiieren. Denkbar ist auch die Erschließung neuer Energiequellen z: B. Abwasserwärmenutzung in Verbindung mit Abwärmenutzung lokaler Industriebetriebe. Vor allem regional verankerte EVUs weisen für eine Umsetzung Kontaktvorteile zu entsprechenden Akteuren bzw. Stakeholdern auf. Aus Sicht der Wohnungswirtschaft gilt es dagegen Gebäude und Quartiere hinsichtlich der breiten Nutzung von Elektromobilität anzupassen. Dies erfordert z. B. Neubaugebäude

mit entsprechender Infrastruktur auszustatten. Dazu gehören unter anderem einen Ladeanschluss für Elektrofahrzeuge und entsprechend dimensionierte Stromleitungen für deren Einsatz. Eine weitere Option stellt die Installation von Elektroladeanschlüssen an privaten Stellplätzen und Tiefgaragen. Zudem gilt es umfangreiche Sanierungsmaßnahmen im Gebäudebestand umzusetzen, um eine Reduktion des Wärmebedarfs, welcher den größten Bestandteil der darstellt, realisieren zu können.

Die vorliegenden CO₂-Emissions Reduktionsziele erfordern auf städtischer Ebene zum einen eine klare und koordinierte Informationspolitik und zum anderen eine zentral organisierte Instanz, z. B. einen Klimaschutzbeauftragten, die zur Monitoring und gegebenenfalls zur Korrektur bei der Realisierung der Maßnahmen dient. Für eine Umsetzung der Klimaschutzziele seitens der Stadt und Stadtverwaltung ist ein Gesamtkonzept für die Öffentlichkeitsarbeit erforderlich. Dazu gehört die Einbindung aller Teilnehmer, sodass in GHD Betrieben beispielsweise Kampagnen gestartet werden können wie „Energie und Klimaschutz im Büro“ oder im Zusammenhang mit einem Bildungsauftrag „in der Schule“. Eine Anlaufstelle für das Energiemanagement in kommunalen Gebäuden, das ebenfalls als Informationsstelle für Bürger dient, z. B. durch Beratungen zum Thema Sanierungsmöglichkeiten von Bestandsbauten, kann ebenfalls einen Beitrag leisten.

Zudem kann verkehrsseitig die Stadtentwicklungsplanung den Fokus auf die Förderung des Umweltverbundes und der E-Mobilität legen. Dies kann durch Vergünstigungen bei Fahrten mit nachhaltigen Verkehrsmitteln, den Einsatz von Jobtickets für örtliche Verkehrsbetriebe oder z. B. durch eine verdichtete Taktung des ÖPNV und die Einführung von Anschlussicherungen für eine verbesserte Anbindung des Umlandes. Eine weitere Option besteht in der Benutzungsfreigabe von Busspuren, falls vorhanden, ab einem definierten Pkw Besetzungsgrad (sogenannte „carpool lanes“). Ein zusätzliches Ziel kann die Attraktivitätssteigerung durch entsprechende Verkehrsflächengestaltung im Bereich des Nichtmotorisierten Verkehrs darstellen. Dazu zählt unter anderem die Förderung von Flächen für den Rad- und Fußgängerverkehr. Im Hinblick auf die Elektrifizierung des Verkehrssektors gilt es bei der verkehrlichen Infrastruktur die Elektromobilität in den Planungsprozess einzubeziehen. Dazu zählt z. B. die Installation von öffentlichen Ladesäulen oder die Ausweisung von Stellflächen für Elektromobilität.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass viele Ansatzpunkte bei der städtischen Verwaltung liegen, eine vollständige Umsetzung der Klimaschutzaktivitäten eine Zusammenarbeit mit den oben genannten Akteuren erfordert.

3.2 Fallstudie Flughafen Berlin TXL

3.2.1 Analyse der Ausgangssituation

In Berlin wird mit dem neuen Flughafen BER der Flugverkehr auf einen neuen zentralen Luftverkehrsknoten konzentriert. Der neue Flughafen ist im Bau, so dass früher oder später die bisherigen Flughäfen ihre aktuelle Nutzung verlieren und im Sinne einer kontinuierlichen Stadtentwicklung einer neuen Nutzung zugeführt werden. Einer dieser Flughäfen ist der bis dato in Betrieb befindliche Flughafen Berlin Tegel oder kurz Berlin TXL, der voraussichtlich nach Fertigstellung des Hauptstadtflughafens BER den Flugbetrieb auf dem Gelände des Flughafens Tegel einstellen wird. Damit wird das Flughafengelände und die sich darauf befindlichen Gebäude, Infrastrukturen und sonstigen Anlagen den Grundstückseigentümern (Bundesrepublik Deutschland,

Land Berlin) übergeben. Die Grundstücksflächen erstrecken sich über ca. 159 ha, zudem gibt es ca. 33 Bestandsgebäude mit einer Gebäudenutzfläche von rd. 135.000 m². Das Nachnutzungskonzept sieht vor allem die Entwicklung eines Forschungs- und Industrieparks für urbane Technologien vor. Die folgende Abbildung zeigt eine Visualisierung einer möglichen Nutzung des Flughafengeländes.



Abbildung 32: Masterplan "The Urban Tech Republic" [46]

In der Mitte des Bildes lässt sich das typische sechseckige Terminalgebäude erkennen, das das Zentrum des neuen Stadtquartiers bilden soll. Darum herum wird das Gelände neu entwickelt, auch im nördlichen Teil, wo sich bisher die Start- und Landebahnen befinden.

Drees & Sommer war beauftragt im Rahmen des Stadtentwicklungsprojektes einen Masterplan für die Infrastruktur zu erstellen. Hierzu gehört auch die Konzeptentwicklung für ein Energiekonzept, woraus sich Randbedingungen und Parameter für die Fallstudie, bzw. für die Bedarfsermittlung ableiten lassen.

Das Entwicklungsgebiet TXL grenzt sich für die Fallstudie in einigen Punkten von Metzingen ab. Zwar gibt es auf dem Entwicklungsgebiet einige Bestandsgebäude, Größe und Anzahl sind jedoch im Gegensatz zu den geplanten Neubauvorhaben gering. Daher kann das Gebiet als nahezu reines Neubaugebiet betrachtet werden, im Gegensatz zu Metzingen, das als Fallstudie für ein Gebiet mit Bestandsgebäuden steht. Zudem ist der Anteil an Wohnflächen gering, da fast ausschließlich Flächen für Handel, Gewerbe, Dienstleistung und Industrie vorgesehen sind, also Nicht-Wohngebäude. Die folgende Abbildung 33 bzw. Tabelle 26 zeigen eine mögliche Nutzungsverteilung, die auch für den Masterplan als Grundlage diente.

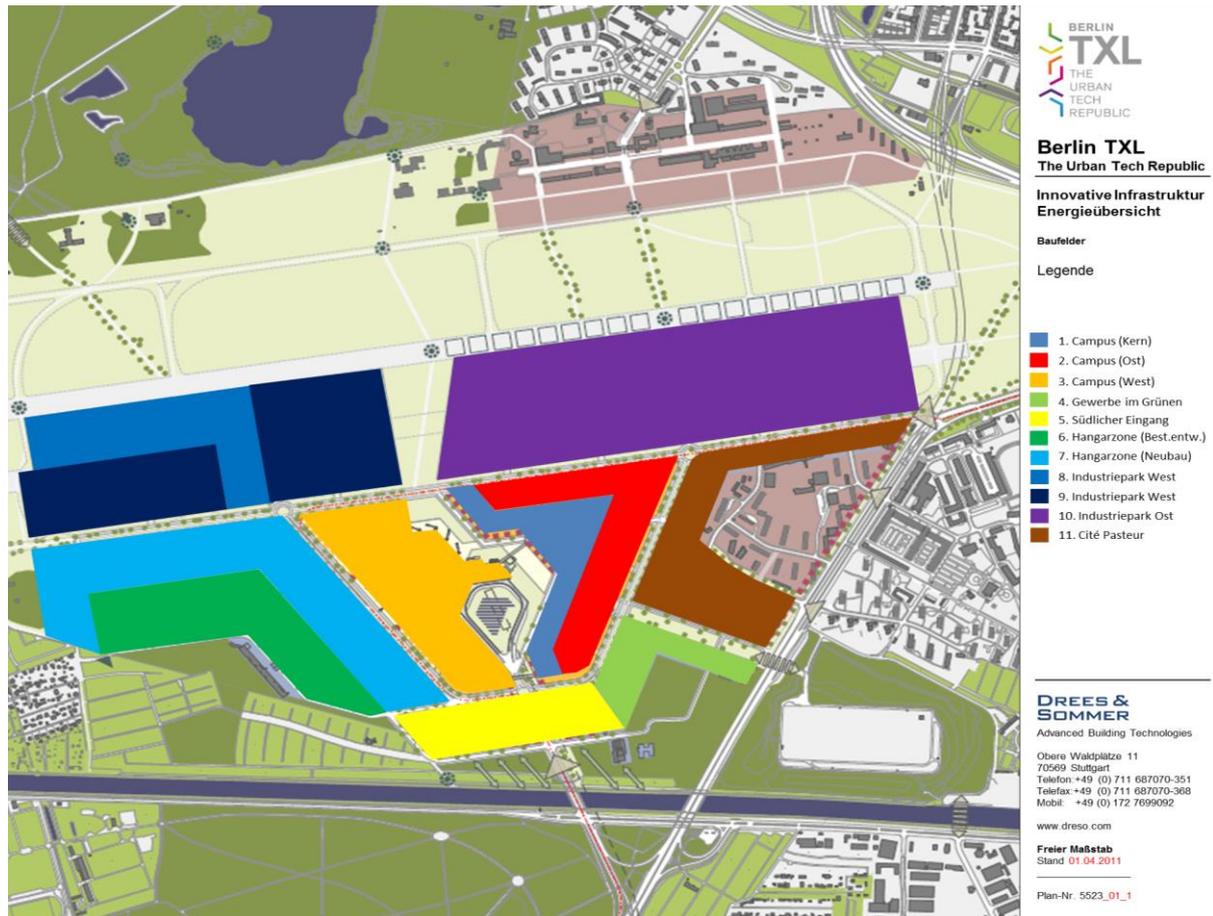


Abbildung 33: Einteilung von Berlin TXL in die einzelnen Bauflächen und Bauphasen [46]

Tabelle 26: Verteilung der Nutzungsarten auf Basis von Nutzungsszenarien [41]

Nutzungsarten	1. Retail	2. Büro	3. Wohnen	4. Studentenwohnheim	5. Nahversorgung	6. Hochschule	7. Labor	8. Prod. Gewerbe (Industrie)	9. Prod. Gewerbe (Handwerk)	10. Logistikhalle
Industrie (Büro/DL gering)		5%						95%		
Industrie (Büro/DL hoch)		20%						80%		
Produz. Gewerbe (Büro/DL gering)		5%							95%	
Produz. Gewerbe (Büro/DL hoch)		20%							80%	
Nicht-prod. Gewerbe	15%	10%					20%		35%	20%
Forschung/Entwicklung/DL		25%				25%	50%			
Kernnutzung	10%			70%	20%					
Handel	100%									
Wohnen			100%							

Für den Masterplan wurde auf Grundlage von Gebäudegrundflächen und Annahmen zu Geschossanzahlen ein Flächenmodell entwickelt, siehe folgende Tabelle 27.

Tabelle 27: Nutzflächenaufteilung Flughafen Berlin Tegel [46]

Teilnutzungsnr.	Teilnutzungen	Max. m ² BGF pro Nutzung	Max. m ² NGF pro Nutzung	Anteil an Fläche
TN1	1. Retail	49.731	39.785	4%
TN2	2. Büro	217.813	174.251	16%
TN3	3. Wohnen	26.994	21.596	2%
TN4	4. Studentenwohnheim	7.918	6.334	1%
TN5	5. Nahversorgung	2.262	1.810	0%
TN6	6. Hochschule	88.375	70.700	6%
TN7	7. Labor	223.554	178.843	16%
TN8	8. Prod. Gewerbe (Industrie)	368.693	294.954	26%
TN9	9. Prod. Gewerbe (Handwerk)	367.129	293.703	26%
TN10	10. Logistikhalle	46.804	37.443	3%
	Summe	1.399.273	1.119.418	100%

Auf der Bearbeitungsebene des Masterplans gibt es außer den Nutzungsflächen keine weiteren Details zu den Gebäuden, da es z. B. auch noch keinen Architektenentwurf gibt.

3.2.2 Analyse des Gebäudebestands

Die bisherigen Beschreibungen zum Gebäudemodell in den vorangegangenen Kapiteln konzentrieren sich auf Wohngebäude. Da mit der Fallstudie Flughafen Berlin TXL ein Gebiet mit fast ausschließlich Nicht-Wohngebäuden betrachtet wird, wird analog zu den Wohngebäuden die Bedarfsseite für das SCIM-Modell und das vereinfachte EN-Easy Tool mittels Simulationen mit stündlicher Auflösung abgebildet.

Im Gegensatz zu Wohngebäuden, wo eine breite Datengrundlage zu Baualtersklassen und verschiedenen Typologien existiert, gibt es für Nicht-Wohngebäude keine Daten, die unterschiedliche Typen differenziert nach Baualter im Bestand abbilden. Zwar werden in der Fallstudie Berlin TXL vor allem Nicht-Wohngebäude im Neubau betrachtet, für die komplette Betrachtung in diesem Projekt und für die Anwendung in der Fallstudie Metzingen sind auch Bedarfsprofile für den Bestand von Nicht-Wohngebäuden notwendig. Eine weitere Eigenschaft von Nicht-Wohngebäuden sind eine Vielzahl unterschiedlicher Nutzungsmöglichkeiten und damit Randbedingungen und Parameter, die teils stark variieren. Bei Wohngebäuden hingegen ist das Nutzungsprofil Wohnen über alle Altersklassen und Gebäudetypologie recht einheitlich.

Nach umfangreicher Recherche zum Energiebedarf von Nicht-Wohngebäuden hat sich ergeben, dass eine Nutzungsaufteilung wie in Tabelle 27 dargestellt, in diesem Detailgrad nicht möglich, bzw. nicht zielführend ist. Daher wurde festgelegt, alle Nicht-Wohngebäude in die drei übergeordneten Kategorie Gewerbe, Handel und Dienstleistung (GHD) einzuteilen. Für den Bereich Industrie kann kein Bedarfsprofil erstellt werden. Grund hierfür ist, dass der Energiebedarf je nach tatsächlichem Prozess in der Industrie enorm variieren kann, so dass eine möglichst allgemeine Angabe noch viel schwieriger als in den Bereichen Gewerbe, Handel, Dienstleistung möglich ist. Eine weitere Eigenschaft von Nicht-Wohngebäuden im Vergleich zu Wohngebäuden ist, dass ein Bezug des Energiebedarfs nicht ohne Weiteres auf eine Bezugsfläche wie z. B. der NGF wie bei Wohngebäuden möglich ist. Als Bezugseinheiten im Bereich der Nicht-Wohngebäude werden auch weitere Größen wie z. B. die Anzahl der Beschäftigten verwendet.

Aufgrund der genannten Schwierigkeiten wird auf Ergebnisse der Studie „Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2011 – 2013“ [35] zurückgegriffen. Hieraus werden zunächst allgemeine Energiebezüge für den Bereich Gewerbe, Handel und Dienstleistung (GHD) abgeleitet. Stellvertretend für das Gewerbe wird der Bereich Herstellungsbetriebe, stellvertretend für den Handel der Bereich Handel und für Dienstleistungen der Bereich Bürobetriebe herangezogen. Die folgende Tabelle zeigt die aus durchschnittlichen Betriebsgrößen der in der Studie betrachteten Datenmenge abgeleiteten m^2 je Beschäftigtem.

Tabelle 28: GHD Flächenbedarf je Beschäftigten (Drees & Sommer)

Nutzung	Bezeichnung Studie	$\text{m}^2_{\text{BGF}}/\text{Beschäftigtem}$	$\text{m}^2_{\text{NGF}}/\text{Beschäftigtem}$
Gewerbe	Herstellungsbetriebe	77,1	61,7
Handel	Handel	81,9	65,6
Dienstleistung	Bürobetriebe	37,2	29,7

Zudem wird aus den durchschnittlichen Endenergieverbrauchsangaben für Wärme und Strom aus der Studie über eine Energieaufwandszahl von 1,45 ein Nutzenergiebedarf für die Bereiche Gewerbe, Handel, Dienstleistung abgeleitet, siehe folgende Tabelle.

Tabelle 29: GHD Nutzenergiebedarf Bestand (Drees & Sommer)

Bestand		kWh/(m ² _{NGF} *a)		
Nutzung	Bezeichnung Studie	Wärme	Kälte	Strom
Gewerbe	Herstellungsbetriebe	95	4	68
Handel	Handel	79	17	70
Dienstleistung	Bürobetriebe	127	8	73

Im nächsten Schritt werden 1-Zonen-TRNSYS-Modelle aufgebaut, in die, neben den bauphysikalischen Eigenschaften, Infiltration, Belüftung und Betriebszeiten, interne Gewinne aus Personenbelegung, Beleuchtung und Geräten sowie eine internen Grundlastwie etc. eingehen (vgl. Kapitel 2.1). Im Anhang sind hierzu die Randbedingungen und Parameter zu finden.

Nach Simulation und Erstellung der stündlichen Profile werden diese auf die in der oben genannten Tabelle gemachten Bedarfswerte skaliert, so dass die Profile die durchschnittlichen Energiebedarfe im Bestand für Gewerbe, Handel und Dienstleistung darstellen. Zur Verdeutlichung zeigt die folgende Abbildung 34 die Nutzwärmeganglinie für den Bestand im Gewerbe.

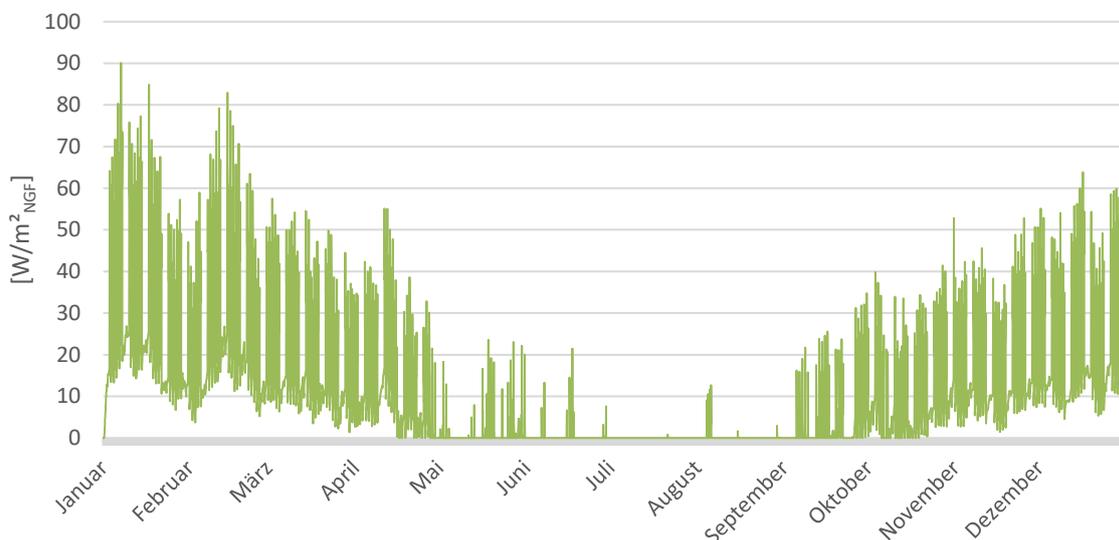


Abbildung 34: Nutzwärmebedarf Gewerbe Bestand

Nach Skalierung der Simulationsprofile auf die aus der Studie „Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2011 – 2013“ [35] abgeleiteten Bedarfswerte, werden die Simulationsrandbedingungen jeweils auf ein Neubaugebäude der Typen

Gewerbe, Dienstleistung und Handel angepasst. Aus den sich hieraus ergebenden Profilen ergeben sich wiederum die folgenden Energiebedarfswerte für den Neubau.

Tabelle 30: GHD Nutzenergiebedarf Neubau (Drees & Sommer)

Neubau		kWh/(m ² _{NGF} *a)		
Nutzung	Bezeichnung Studie	Wärme	Kälte	Strom
Gewerbe	Herstellungsbetriebe	44	13	68
Handel	Handel	30	30	70
Dienstleistung	Bürobetriebe	28	27	73

Zu beachten ist, dass sich der Strombedarf zwischen Bestand und Neubau nicht ändert, da davon ausgegangen wird, dass dieser nicht von der Gebäudebeschaffenheit abhängt, sondern von der Nutzung, die hier bei dem angegebenen Strombedarf einem durchschnittlichen Verbrauch entspricht. Zudem wird im Nicht-Wohngebäudebereich kein Profil für die Warmwassernutzung verwendet, weil davon ausgegangen wird, dass der Bedarf an Warmwasser bei den Nicht-Wohngebäuden zu vernachlässigen ist.

Die Erläuterung zu den Nicht-Wohngebäuden erfolgt hier an dieser Stelle, da Bedarfsprofile vor allem im Neubau für die Betrachtung der Fallstudie Berlin TXL benötigt werden, jedoch auch im Bereich Nicht-Wohngebäude bei der Fallstudie Metzingen im Bestand. Im Anhang sind die Profile für die Nicht-Wohngebäude zu finden.

An dieser Stelle wird mit Hilfe der aus dem vorherigen Kapitel bekannten Flächenaufstellungen und den über die Bedarfswerte aus der Studie „Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2011 – 2013“ [35] abgeleiteten Bedarfsprofilen, bzw. Bedarfswerten der energetische IST-Zustand des Entwicklungsgebietes Berlin TXL dargestellt. Es wird dabei angenommen, dass das gesamte Gebiet zum Zeitpunkt der kompletten Fertigstellung betrachtet wird, und nicht wie in der Realität in unterschiedlichen Bauabschnitten über mehrere Jahre realisiert wird. Zudem wird der Sektor der Industrie nicht berücksichtigt, da hierfür keine geeigneten Profile erstellt werden konnten.

Tabelle 31: Nutzenergiebedarf Fallstudie Berlin TXL (Drees & Sommer)

	m ² BGF	m ² NGF	Wärme MWh/a	davon Raum- wärme	davon WWB	Raum- kälte	Strom	davon Beleuch- tung	davon andere Strom- verbraucher
Wohnen	34.912	27.930	1.704	1.285	419	-	754	-	-
Gewerbe	637.486	509.989	22.343	21.592	751	6.754	34.716	13.352	21.364
Handel	49.731	39.785	1.179	1.141	37	1.208	2.767	1.359	1.408
Dienst- leistung	308.451	246.760	6.961	6.725	235	6.773	18.069	8.146	9.923
Summen	1.030.580	824.464	32.187	30.744	1.443	14.735	56.306	22.858	32.695

Die Bedarfswerte für den Bereich Wohnen werden aus den ermittelten Werten, beschrieben im Gebäudemodell weiter oben, für den Neubau übernommen (Raumwärme 46 kWh/(m²*a), WWB 15 kWh/(m²*a), Strom 27 kWh/(m²*a)).

Abbildung 35 und Abbildung 36 zeigen zum einen den Gesamtnutzenergiebedarf von Berlin TXL auf Basis der Flächendaten aus der Masterplanstudie von Drees & Sommer und der oben hergeleiteten Bedarfswerte, und zum anderen die Bedarfe, aufgeteilt in die Bereiche Wohnen, Gewerbe, Handel und Dienstleistung.

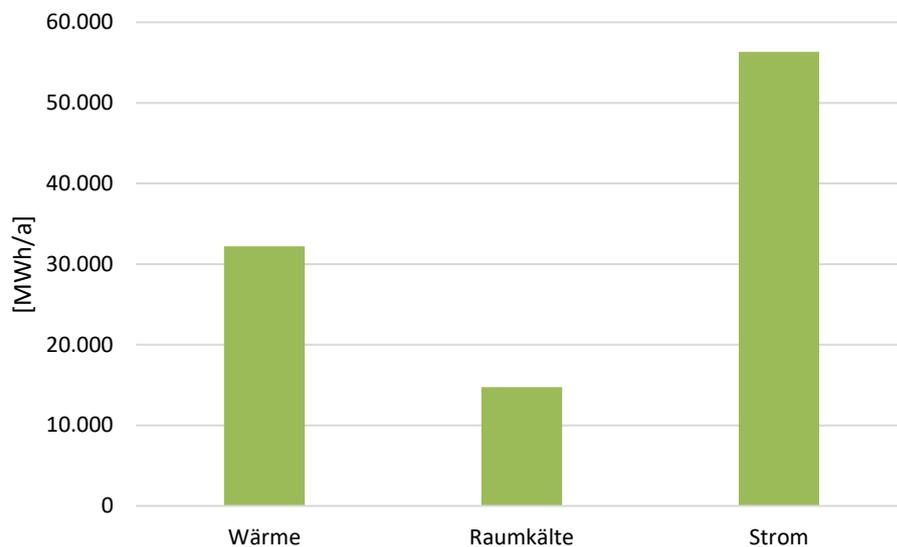


Abbildung 35: Anwendungsbezogene Nutzenergiebedarf nach Berlin TXL Masterplan [46]

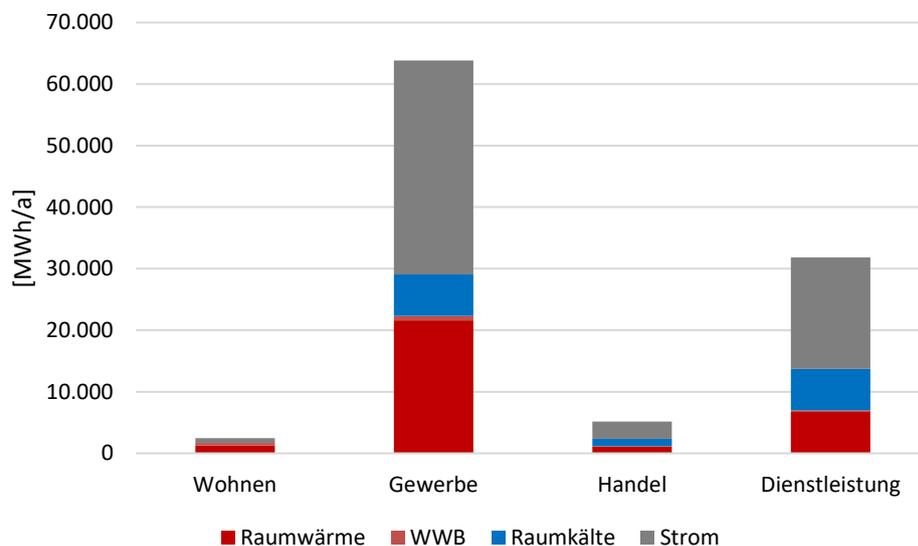


Abbildung 36: Nutzenergiebedarf detailliert nach Berlin TXL Masterplan [46]

3.2.3 Analyse des Verkehrs

Das Fallbeispiel Berlin TXL soll als Validierungsbeispiel des Verkehrsmodells für ein Neubaugebiet dienen. Die bisherigen Berechnungsschritte finden nur in Bestandsgebiete eine Anwendung. In Neubaugebieten fehlen Informationen über Einwohner- und Beschäftigtenzahlen. Für dieses Gebiet

wurde über eine Abschätzung des Verkehrsaufkommens durch Vorhaben der Bauleitplanung [47] eine Abschätzung der zu erwartenden Einwohner- und Beschäftigtenzahlen vorgenommen. Im Ergebnis werden für das Gebiet 694 Einwohner und 18.856 Beschäftigte prognostiziert. Die geringe Anzahl der Einwohner lässt sich durch die geringe Anzahl von zukünftigem Wohnen begründen. Auf dem Gelände ist ein geplantes Studentenwohnheim vorgesehen.

Berlin TXL wird nach der BBSR Raumtypeneinteilung der Stadt Berlin, der Kategorie Agglomerationsraum Kernstadt, zugeordnet. Tabelle 32 stellt eine Übersicht der Inputs für die Berechnungsgrundlagen des Verkehrsmodells aus MID, Zensus und MOP dar.

Tabelle 32: Berechnungsgrundlagen Agglomerationsraum Kernstadt

Bundesland:	Berlin
Region:	Berlin
Stadt:	Berlin TXL
Einwohnerzahl:	694 EW
Beschäftigte:	18.856 ErW
Modal Split Anteil MIV Zweck Wohnen:	49,66 %
Wegelänge Zweck Wohnen:	13,77 km
Wegeanzahl Zweck Wohnen:	1,68 Wege
Besetzungsgrad Zweck Wohnen:	1,53 Pers/Fz
Modal Split Anteil MIV Zweck Arbeit und Ausbildung:	58,07%
Wegelänge Zweck Arbeit und Ausbildung:	17,88 km
Wegeanzahl Zweck Arbeit und Ausbildung:	1,67 Wege
Besetzungsgrad Zweck Arbeit und Ausbildung:	1,54 Pers/Fz

Aus der im Kapitel 2.2 erläuterten Methodik ergibt sich für den Zweck Wohnen für das aus statistischen Daten des Raumtypes berechnete Fallbeispiel Berlin TXL folgende Werte:

- Modal Split Anteil MIV von 49,66 %,
- durchschnittliche tägliche Wegelänge von 13,77 km und
- Wegehäufigkeit von 1,68 Wegen pro Tag

Dabei beträgt der Besetzungsgrad der Fahrzeuge im Mittel ca. 1,53 Personen je Pkw. Im Zusammenhang mit dem Wegezweck Arbeit und Ausbildung finden in Berlin TXL je Beschäftigten 1,67 Fahrten am Tag mit je einer Länge von 17,88 km statt. Der Besetzungsgrad für den Zweck Arbeit und Ausbildung wird mit rund 1,54 Pers/Fz und einem Modal Split Anteil des MIV von 58,07 % angegeben.

Im Folgenden Kapitel wird die Berechnung der Verkehrsleistung in Berlin TXL erläutert und die Anwendung der Berechnung zur Bestimmung der CO₂-Einsparpotenziale, die durch die Umsetzung der in Kapitel 2.3.1.2 vorgestellten Maßnahmen realisiert werden können, dargestellt.

3.2.3.1 Berechnung Fahrleistung IST-Zustand für die Fallstudie Berlin TXL

Zur Berechnung des IST-Zustandes der Gesamtfahrleistungen im Verkehrssektor werden die Fahrleistungen für den Zweck Wohnen mit der Fahrleistung des Zwecks Arbeit und Ausbildung addiert. Gleichung 16 gibt eine allgemeine Vorgehensweise der Berechnung des IST-Zustandes wieder. Die ausführliche Darstellung der Berechnung und Erklärung der verwendeten Variablen ist in Gleichung 1 dargestellt.

$$FL_{IST,Sum} = FL_{V_{Woh}} + FL_{V_{Arb}} \quad \text{Gleichung 16}$$

mit:

$FL_{IST,Sum}$ – Summe der Fahrleistungen innerhalb des Bilanzraums in einem Jahr [Fz.km/a]

$FL_{V_{Zw}}$ – Fahrleistung je Fahrzeug pro Jahr für Zweck Wohnen oder Arbeiten [Fz.km/a]

Für den IST-Zustand ergibt sich eine Fahrleistung von ca. 1.281.771 Fz.km für den Bereich der Wohnbevölkerung und von ca. 15.111.702 Fz.km für den Bereich Arbeiten und Ausbildung pro Jahr in Berlin TXL. Insgesamt beträgt die jährliche Fahrleistung in Berlin TXL 16.393.473 Fzkm.

3.2.3.2 Berechnung Fahrleistung Maßnahmen-Zustand für die Fallstudie Berlin TXL

Zur Berechnung des Maßnahmenzustandes der Gesamtfahrleistungen im Verkehrssektor werden die Fahrleistungen für den Zweck Wohnen mit der Fahrleistung des Zwecks Arbeit und Ausbildung addiert. Gleichung 17 gibt eine allgemeine Vorgehensweise der Berechnung des Maßnahmenzustandes wieder. Die ausführliche Darstellung der Berechnung und Erklärung der verwendeten Variablen ist in Gleichung 1 dargestellt.

$$FL_{Maß,Sum} = FL_{V_{Woh}} + FL_{V_{Arb}} \quad \text{Gleichung 17}$$

mit:

$FL_{Maß,Sum}$ – Summe der Fahrleistungen innerhalb des Bilanzraums in einem Jahr [Fzkm/a]

$FL_{V_{Zw}}$ – Fahrleistung je Fahrzeug pro Jahr für Zweck Wohnen oder Arbeiten [Fzkm/a]

Zur Berechnung der Reduzierungspotentiale stehen für das Fallbeispiel Berlin TXL für den Bereich des Wohnbevölkerungsverkehrs, folgende quantitative Maßnahmen zur Reduzierung der Fahrleistung im konventionellen MIV zur Verfügung:

- der Umstieg auf Elektromobilität
- die Stärkung des Umweltverbundes

Im Bereich Arbeits- und Ausbildungsverkehr gibt es keine zusätzliche Reduzierungsmöglichkeit im Bereich Carpooling, da das Reduzierungspotenzial im Agglomerationsraum Kernstadt bei 0 % liegt.

In Tabelle 33 sind die Reduzierungspotenziale aller Maßnahmen für Berlin TXL dargestellt, unterteilt nach Fahrtzweck und als Mittelwert aus den Spannen der Einzelmaßnahmen.

Tabelle 33: Mögliche Reduzierungspotenzial der Maßnahmen für Berlin TXL

Reduzierungspotenzial	Reduzierungspotenzial		
	Fahrtenzweck [Fz.km]		Mögliche Gesamtreduzierung [Fz.km]
Maßnahme	Zweck Wohnen	Zweck Arbeiten	
Stärkung Umweltverbund (5% - 10%)	193.581	1.951.744	2.145.325
Elektromobilität (10 % - 30%)	516.218	5.204.650	5.720.868
Carpooling (0%)	-	-	-

Durch die Maßnahme Stärkung Umweltverbund kann durch die ausgegebenen Reduzierungsmaßnahmen (vgl. Kapitel 2.3.1.2) eine Einsparung der zurückgelegten Fz.km zwischen 5% - 10% erreicht werden. Dargestellt in Fahrzeugkilometer ergibt dies für den Fahrtenzweck Wohnen eine mögliche Reduzierung im Mittel von 193.581 Fz.km und für den Fahrtenzweck Arbeiten und Ausbildung von 1.951.744 Fz.km. Insgesamt kann durch die Maßnahme Stärkung Umweltverbund eine Einsparung der jährlich gefahrenen Fahrzeugkilometer von 2.145.325 Fz.km erreicht werden.

Durch die Maßnahme Elektromobilität kann durch die ausgegebenen Reduzierungsmaßnahmen (vgl. Kapitel 2.3.1.2) eine Einsparung der zurückgelegten Fz.km zwischen 10% - 30% erreicht werden. Dargestellt in Fahrzeugkilometern ergibt dies für den Fahrtenzweck Wohnen eine mögliche Reduzierung im Mittel von 516.218 Fz.km und für den Fahrtenzweck Arbeiten und Ausbildung von 5.204.650 Fz.km. Insgesamt kann durch die Maßnahme Elektromobilität eine Einsparung der jährlich gefahrenen Fahrzeugkilometer von 5.720.886 Fz.km erreicht werden.

Für die Maßnahme Carpooling kann für die ausgegebenen Reduzierungsmaßnahmen (vgl. Kapitel 2.3.1.2) keine Gesamtverbesserung erzielt werden.

3.2.3.1 Einsparpotenzial CO₂ und Kosten IST-Zustand zu Maßnahmen-Zustand für die Fallstudie Berlin TXL

Nach der Berechnung der Fahrleistung für den IST-Zustand und den Maßnahmenzustand soll entsprechend Gleichung 5 und Gleichung 9 der Gesamtausstoß an t CO₂/a für Berlin TXL dargestellt werden. Berechnet wird dieser Wert zunächst für den Fahrtzweck Wohnen und den Fahrtzweck Arbeiten- und Ausbildung für das Bestandsjahr 2016.

Im Weiteren wird nach Gleichung 5 und Gleichung 9 der Gesamtausstoß an t CO₂/a für den definierten Betrachtungshorizont 2030 unter Berücksichtigung eines reduzierten Modal Split Anteils MIV (Reduzierungspotentiale vgl. Kapitel 2.3.1.2) ermittelt.

Für Berlin TXL kann, für die Maßnahme Stärkung Umweltverbund, bei einer möglichen maximalen Senkung des Modal Split Anteils MIV um 10 %, der Gesamtausstoß für den Wohnbevölkerungsverkehr von 165 t CO₂/a auf 132 t CO₂/a gesenkt werden. Dadurch können rund 33 t CO₂/a eingespart werden (Gleichung 11). Für den Arbeits- und Ausbildungsverkehr ergibt sich eine Einsparung von 1.949 t CO₂/a auf 1.614 t CO₂/a. Dadurch können rund 336 t CO₂/a vermieden werden. (Gleichung 11).

Für die Maßnahme Elektromobilität kann, bei einer möglichen Reduzierung des Modal Split Anteils MIV um 10 %, 15 %, 20 % oder 30%, eine Einsparung des Gesamtausstoßes für den Wohnbevölkerungsverkehr ausgegeben werden (siehe Gleichung 5). Für den Anteil von 0,06 % Elektrofahrzeugen am Bestand im Jahr 2016 hat dies eine Einsparung von gerundet 0 t CO₂/a zur Folge. Für den Betrachtungshorizont 2030 wird nach Gleichung 5 bei einer Reduzierung des Modal Split Anteils MIV zugunsten anderer Verkehrsträger (Fuß, Rad, ÖPNV) um 10 % eine Einsparung von 17 t CO₂/a erreicht. Bei Reduzierung des Modal Split Anteils MIV um 15 % ergeben sich Einsparungen von 25 t CO₂/a. Eine Reduzierung des Modal Split Anteils MIV um 20 % hat Einsparungen von 33 t CO₂/a zur Folge. Für das Szenario mit einer Reduzierung des Modal Split Anteils MIV um 30 % beträgt die Vermeidung sogar 50 t CO₂/a.

Kostenseitig muss zur Umsetzung der Maßnahme nach Gleichung 7 für die Einsparung von einer Tonne CO₂ ein Betrag von 2.665 €/t CO₂*a innerhalb des Quartiers Berlin TXL investiert werden.

Für den Arbeits- und Ausbildungsverkehr kann, analog zum Wohnbevölkerungsverkehr (Gleichung 5), für den Grundbestand von 0,06 % Elektrofahrzeuge im Jahr 2016 eine Einsparung von 12 t CO₂/a ausgewiesen werden. Für den Betrachtungshorizont 2030 wird nach Gleichung 5 für eine Reduzierung des Modal Split Anteils MIV zugunsten anderer Verkehrsträger (Fuß, Rad, ÖPNV) von 10 % eine Einsparung von 183 t CO₂/a erreicht. Bei Reduzierung des Modal Split Anteils MIV um 15 % wird eine Einsparung von 281 t CO₂/a erreicht. Bei Reduzierung des Modal Split Anteils MIV um 20 % wird eine Einsparung von 378 t CO₂/a erreicht. Bei Reduzierung des Modal Split Anteils MIV um 30 % beträgt dies eine Einsparung von 573 t CO₂/a.

Kostenseitig muss hierzu nach Gleichung 7 für die Einsparung von einer Tonne CO₂ durchschnittlich ein Betrag von 2.802 €/t CO₂*a innerhalb des Quartiers Berlin TXL investiert werden.

3.2.4 Szenarien – Rahmenannahmen

Im Folgenden Abschnitt werden die Rahmenannahmen für die SCIM Szenarien erläutert. Dazu zählen die allgemeinen Annahmen für die Potenziale und die Fortschreibung des Bilanzraums Berlin TXL.

Für die Fallstudie Berlin TXL wird zunächst anhand der Bebauungspläne eine Prognose bezüglich der zu erwartenden Nutzenergienachfragen errechnet (vgl. Tabelle 34). Diese basieren auf Gebäudeebene auf einer technischen Herleitung der Planungsgrundlage von Drees & Sommer [46]. Die Nutzenergiebedarfe beziehen sich dabei für einen Neubaustandard.

Tabelle 34: Nutzenergiebedarfe für Strom und Wärme bei Abschluss der Bauflächenkonversion in Berlin TXL [46]

	GHD	Wohngebäude
Wärmenachfrage (Raumwärme und Warmwasser) [TJ]	137,18	6,13
Kühlungsbedarf [TJ]	54,85	0
Strom (aggregiert für alle restlichen Stromanwendungen) [TJ]	267,82	2,71

Ausgehend vom IST-Zustand des Bilanzraums wird anhand Indikatoren eine Fortschreibung der einzelnen Energiedienstleistungsnachfragen entwickelt. Die daraus abgeleiteten sektoralen Entwicklungen der Flächenbedarfe können Tabelle 35 entnommen werden.

Tabelle 35: Baufortschritt in Berlin TXL [46]

	2012	2015	2020	2025	2030	2035
Nutzfläche Neubau klein GHD [1000 m²]	34,6	34,6	297,3	381,1	485,4	581,7
Nutzfläche Neubau groß GHD [1000 m²]	57,8	57,8	150,3	225,2	287,6	413,9
Wohnfläche Neubau [1000 m²]	0	7,9	14,5	23,6	34,9	34,9

Die Bestimmung der Verkehrsleistungsnachfrage für Berlin TXL basiert auf dem in Abschnitt 2.2 vorgestellten Verkehrsmodell. Dabei werden anhand der zu erwartenden Einwohner und Beschäftigten innerhalb des Bilanzraums in 2035 Nachfragen nach Mobilität hergeleitet. Die Veränderung der Mobilitätsnachfragen basiert dabei ebenfalls auf den Flächenentwicklungen der Bebauung von Berlin TXL (siehe Tabelle 36). Eine Differenzierung Entwicklungen für den MIV, ÖPNV und Güterverkehr ist dabei nicht möglich.

Tabelle 36: Fortschreibung der Mobilitätsnachfrage in Berlin TXL

	2012	2015	2020	2025	2030	2035
Veränderung der Mobilitätsnachfrage [%]	100,0	100,0	493,1	671,9	862,3	1115,5

Für die Potenziale der Fallstudie Berlin TXL gilt, dass die Einbindung verfügbarer landwirtschaftlicher Flächen, lokaler Biomasse und anfallender Abfallprodukte, aufgrund fehlender spezifischer Standortanalysen nicht betrachtet werden. Zudem bestehen keine Wind-, Wasser- und Abwasser-Potenziale. Oberflächennahe Geothermie zur Einbindung in die Wärmeversorgung wird dagegen im Modell berücksichtigt. Darüber hinaus wird das solare Potenzial an die Dachflächen und

Fassadenflächen des Gebäudebestandes gekoppelt. Die Entwicklung der Potenziale für gebäudeintegrierte PV- und Solarthermieflächen sind in Tabelle 37 gegeben.

Tabelle 37: Verfügbare Flächen zur Nutzung von Solarthermie und Photovoltaik [48]

	2012	2015	2020	2025	2030	2035
Solarpotenzial Fläche Dach [1000 m²]	0	43.0	212.2	289.1	371.1	480.0
Solarpotenzial Fläche Fassade [1000 m²]	0	8.1	39.8	54.2	69.6	90.0
Solarpotenzial Freifläche [1000 m²]	0	33.3	66.7	100.0	100.0	100.0

3.2.5 Szenariendefinition

Der Einfluss der in SCIM implementierten Maßnahmen im Kontext von CO₂ Emissions-Reduktionszielen wird analog zur Fallstudie Metzingen anhand eines Szenarienvergleichs analysiert. In einem Basisszenario (BASE) wird das Energiesystem von Berlin TXL ohne Vorgabe von Energie- oder Klimazielen definiert. Ausgehend vom Basisszenario findet ab 2020 die Vorgabe von zusätzlichen Klimaschutzzielen im Zielszenario statt. Das CO₂-Emissionsziel des Zielszenarios wird für die Fallstudie Berlin TXL auf 50 % der kumulierten Emissionen des Basiswertes im Jahr 2030 definiert (Tabelle 38).

Tabelle 38: Szenarienbeschreibung für BASE und ZIEL für die Fallstudie Berlin TXL

Szenario	Beschreibung
Referenzszenario (BASE)	Vorgabe von Bauflächenerschließungen, keine Vorgabe zu Erneuerbaren Ausbaupfade, keine CO₂ - Emissionsziele
CO₂-Reduktionsszenario (ZIEL1)	Ziel: 50 % CO₂ Einsparung im Vgl. zur Basis Erreichung des Ziels bereits im Stützjahr 2030

Im Zusammenhang mit der einer verursachergerechten Zuordnung der Emissionen spielen die Stromimporte und die damit einhergehenden Emissionen für die Gewinnung der elektrischen Energie eine bedeutende Rolle. Die Entwicklung des Strommixfaktors, basierend auf den prognostizierten durchschnittlichen Emissionen der Strombereitstellung in Deutschland nach Umweltbundesamt ist in Darüber hinaus wird der lokale Nahwärmemixfaktor und die Nahwärme Emissionen endogen aus den vorgelagerten Bereitstellungsketten im Modell (z. B. solarthermieunterstützte Nahwärmeeinspeisung, Gas- oder Ölkessel, Pellets usw.) berechnet und sind somit im Gegensatz zum Strommixfaktor direkter Bestandteil der Optimierung.

Tabelle 39 dargestellt [43]. Der Zielwert für 2035 wurde dabei aus den vorherigen Perioden extrapoliert. Hieraus ergibt sich, dass zukünftig eine relative CO₂-Einsparung im Vergleich zum Ausgangszustand

allein durch den Bezug von weniger CO₂ intensivem Strom realisiert werden kann. Dies hängt direkt mit dem Anteil der Erneuerbaren an der Nettostrombereitstellung in Deutschland zusammen [41, 43].

Darüber hinaus wird der lokale Nahwärmemixfaktor und die Nahwärme Emissionen endogen aus den vorgelagerten Bereitstellungsketten im Modell (z. B. solarthermieunterstützte Nahwärmeeinspeisung, Gas- oder Ölkessel, Pellets usw.) berechnet und sind somit im Gegensatz zum Strommixfaktor direkter Bestandteil der Optimierung.

Tabelle 39: Spezifische Emissionen für Strom für BASE und ZIEL1 für die Fallstudie Berlin TXL

	2012	2015	2020	2025	2030	2035
BASE - Szenario [t CO₂/MWh]	0,584	0,534	0,491	0,445	0,400	0,360
Zielszenario [t CO₂/MWh]	0,584	0,534	0,491	0,445	0,400	0,360

Während in der Fallstudie Metzingen das Zieljahr auf 2030 definiert wird, bietet sich an dieser Stelle aufgrund der einzelnen Bauphasen und der geplanten Fertigstellung des Berlin TXL Komplexes das Zieljahr 2035 an [46, 48]. Der weitere Vergleich mit den Ergebnissen des EN-easy Tools sowie eine direkte Gegenüberstellung der Ergebnisse der Fallstudie Metzingen sind jedoch dadurch nicht möglich. Hier wurde in beiden Fällen ein Zeithorizont bis 2030 berücksichtigt. Die geplante Entwicklung der Konversionsflächen bis zum Jahr 2030 wird mit ca. 85 % als bedeutend weit fortgeschritten erachtet, was eine Interpretation der Ergebnisse ohne Berücksichtigung der finalen Bauphase zwischen 2030 und 2035 erlaubt. Daher werden für eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit der Fallstudie Metzingen die Modellläufe bis zum Jahr 2030 dargestellt. Energieträgerpreise sowie ihre Entwicklung über den Zeithorizont lehnen sich an den World Energy Outlook 2015 [44] an. Es werden die gleichen Zinssätze wie in der Metzinger Fallstudie unterstellt (siehe Abschnitt 3.1.5).

3.2.6 Ergebnisse des Szenarienvergleichs für die Fallstudie Berlin TXL

3.2.6.1 Endenergieverbrauch in Berlin TXL

Eine Gegenüberstellung der Endenergieverbräuche des Basis- und Zielszenarios in stellt das Wachstum der Konversionsfläche in Berlin TXL dar (Abbildung 37). Während das Basisszenario keine Vorgabe bezüglich CO₂ beinhaltet, findet im Zielszenario eine 50 %-ige Reduktion der gesamten CO₂ Emissionen statt. Dabei ist zu erkennen, dass der Gesamtendenergieverbrauch nicht proportional zu den CO₂ Emissionszielen in 2030 rückläufig ist. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass die Anlagentechnik bereits neu und effizient ist und durch Anwendung von Maßnahmen, wie z. B. Nutzung des „Green Building Ansatzes“ oder eine Modernisierung der Anlagenstruktur nur sehr geringe energetische Einsparungen erzielt werden können.

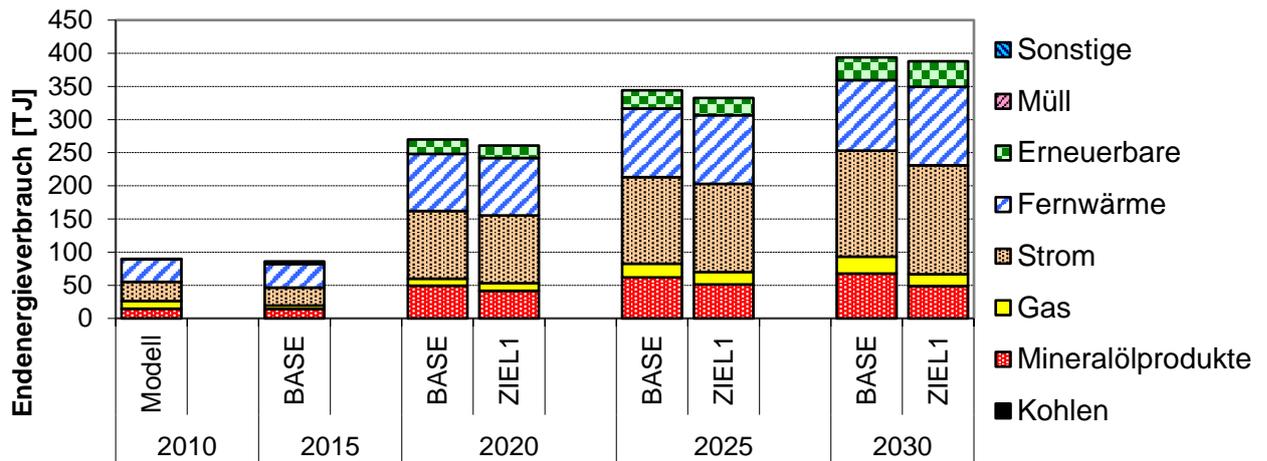


Abbildung 37: Entwicklung des gesamten Endenergieverbrauchs nach Energieträgern in Berlin TXL

Abbildung 38 zeigt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs des GHD Sektors. Da der GHD Sektor den Haupt-Energieverbraucher in Berlin TXL darstellt, unterscheidet sich die Struktur der Endenergieträger nur geringfügig vom Gesamtendenergieverbrauch des Bilanzraumes. Deutlich ist die starke Nutzung der Fern-/Nahwärme in diesem Bereich, die 35 % der Endenergie darstellt sowie die überwiegende Nutzung strombetriebener Technologien (z. B. für Kühlung oder Beleuchtung). Auch hier ist zu erkennen, dass keine energetischen Einsparungen bis 2030 im Zielszenario im Vergleich zur Basis erzielt werden können. Der Endenergiebedarf fällt in 2030 gar ein wenig höher als in der Referenz aus, da die gestiegene Nachfrage nach Nah-/Fernwärme zu marginal höheren Verteilverlusten führt.

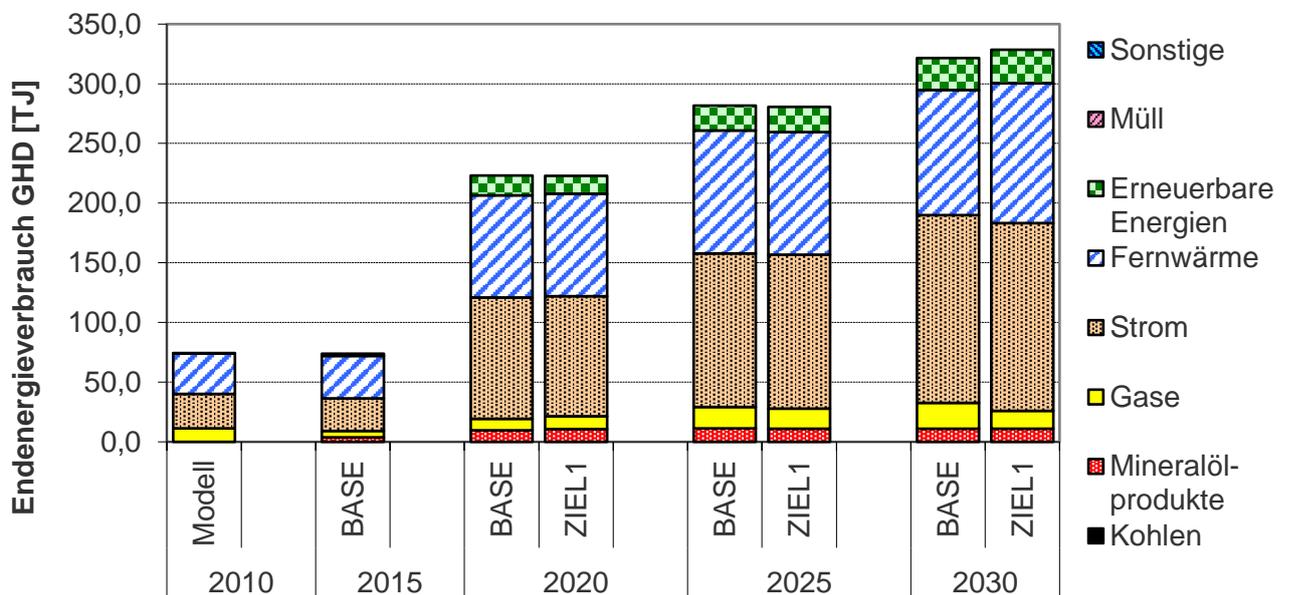


Abbildung 38: Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern für GHD in Berlin TXL

Den Einfluss der Maßnahme „Umweltverbund“ auf den Endenergieverbrauch im Verkehrssektor ist in Abbildung 39 zu sehen. Die Reduktion der Nachfrage nach Verkehrsleitung im Bereich des

motorisierten Individualverkehrs (MIV) und die damit einhergehende Verlagerung der Personenkilometer auf den ÖPNV führen zu einer insgesamt geringeren Anzahl von Fahrten im Vergleich zur Referenz (-14 %). Darüber hinaus ist ein Teil der Reduktion des fossilen Endenergieverbrauchs zum einen auf die erhöhte Elektromobilität (+230 %) und zum anderen auf den verstärkten Einsatz von Ethanol und Biodiesel als Treibstoff (+36 %) im Vergleich zur Referenz im Jahr 2030 zurückzuführen. Die Maßnahme Carpooling hat keine Auswirkungen auf den Endenergieverbrauch im Verkehr innerhalb des Bilanzraums Berlin TXL, da der Besetzungsgrad mit durchschnittlichen 1,54 Personen je Auto und Fahrt bereits auf einem Hohen Niveau liegt und in diesem Bereich kein verfügbares Potenzial zur Reduktion der Anzahl der Fahrten im MIV implementiert wird.

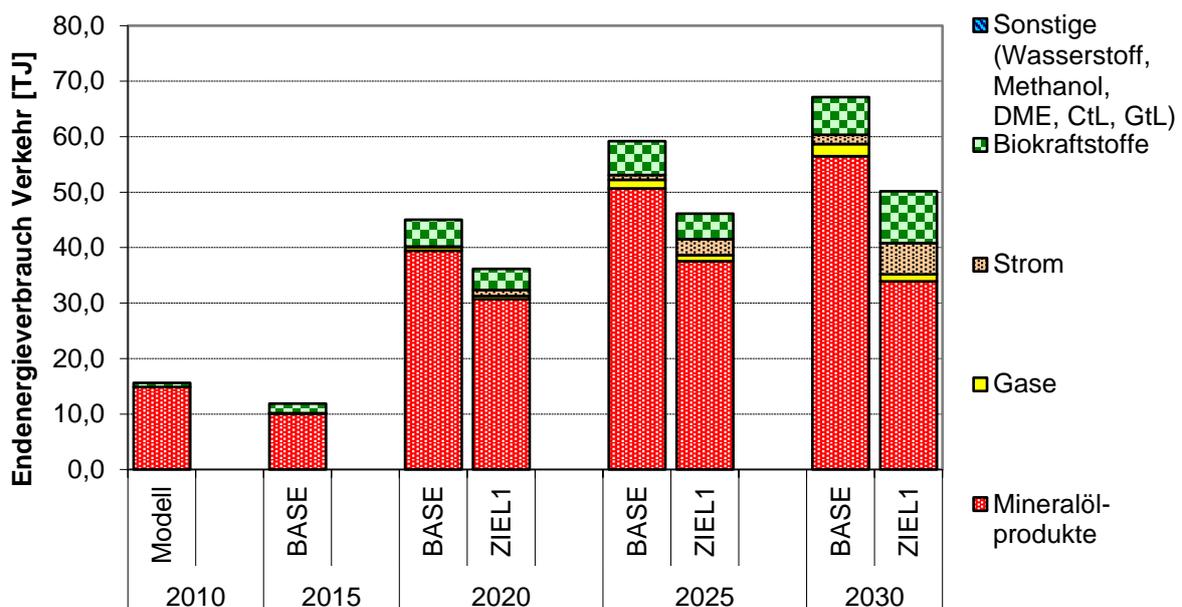


Abbildung 39: Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern im Verkehrssektor in Berlin TXL

3.2.6.2 CO₂-Emissionen

Ein Blick auf die CO₂-Emissionen in Abbildung 40 zeigt, die Reduktion des CO₂-Ausstoßes im Zielszenario, verglichen zur Referenz bis auf ein Niveau von 50 % im Jahr 2030. Dabei sind zwei gegenläufige Effekte sichtbar. Zum einen findet bedingt durch den kontinuierlichen Ausbau von Berlin TXL eine Zunahme der CO₂ Emissionen bis ca. 2020 im Zielszenario statt und zum anderen kann eine Reduktion der absoluten CO₂-Emissionen zwischen 2020 und 2030 erzielt werden. Treiber ist hierbei der Zubau von PV innerhalb des Bilanzraumes, wodurch eine Dekarbonisierung des Stromverbrauchs, vor allem im GHD Sektor erreicht werden kann. Darüber hinaus können durch Einspeisungen von Stromüberschüssen ins übergreifende Netz CO₂ Gutschriften erzielt werden.

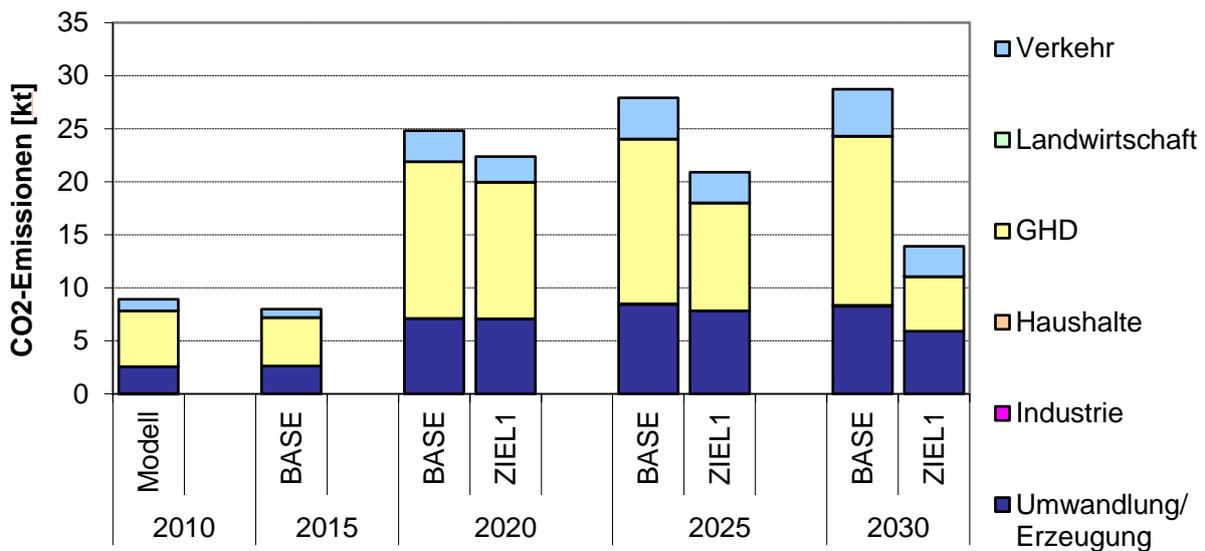


Abbildung 40: Entwicklung der sektorspezifischen CO₂ Emissionen in Berlin TXL

3.2.6.3 Strombereitstellung und Stromverbrauch

Die Veränderung des Stromimportaldos im Zielszenario wird in Abbildung 41 deutlich. Hier wandelt sich Berlin TXL bis zum Jahr 2030 zu einem bilanziellen Stromexporteur. Ausgehend von keiner PV im Bestand, nimmt der Zubau von PV zur Stromversorgung, vor allem im GHD Bereich, in beiden Szenarien deutlich zu. Allein durch den verstärkten Ausbau der PV können im Zielszenario 11 kt CO₂ im Jahr 2030 im Vergleich zur Basis in 2030 eingespart werden. Eine Grundversorgung von Strom durch eine gasbetriebene KWK ist auf die hohe Nachfrage der Nahwärme und den Bestand der Nahwärme Leitungen zurückzuführen.

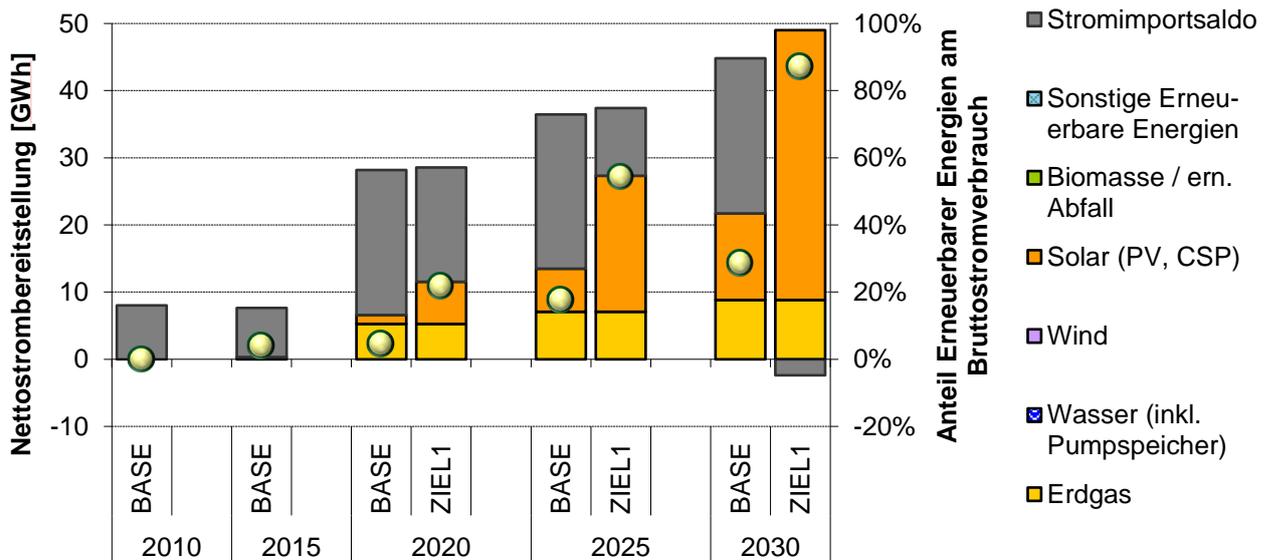


Abbildung 41: Entwicklung der Strombereitstellung in Berlin TXL

Die zunehmende Nachfrage nach Strom spiegelt sich in Abbildung 42 wider. Es ist zu sehen, dass der Stromverbrauch in Berlin TXL beinahe ausschließlich durch den GHD Sektor definiert wird. Die Elektromobilität, die selbst im Zielszenario bei 30% liegt und der Stromverbrauch im Wohngebäudebereich spielen nur eine untergeordnete Rolle.

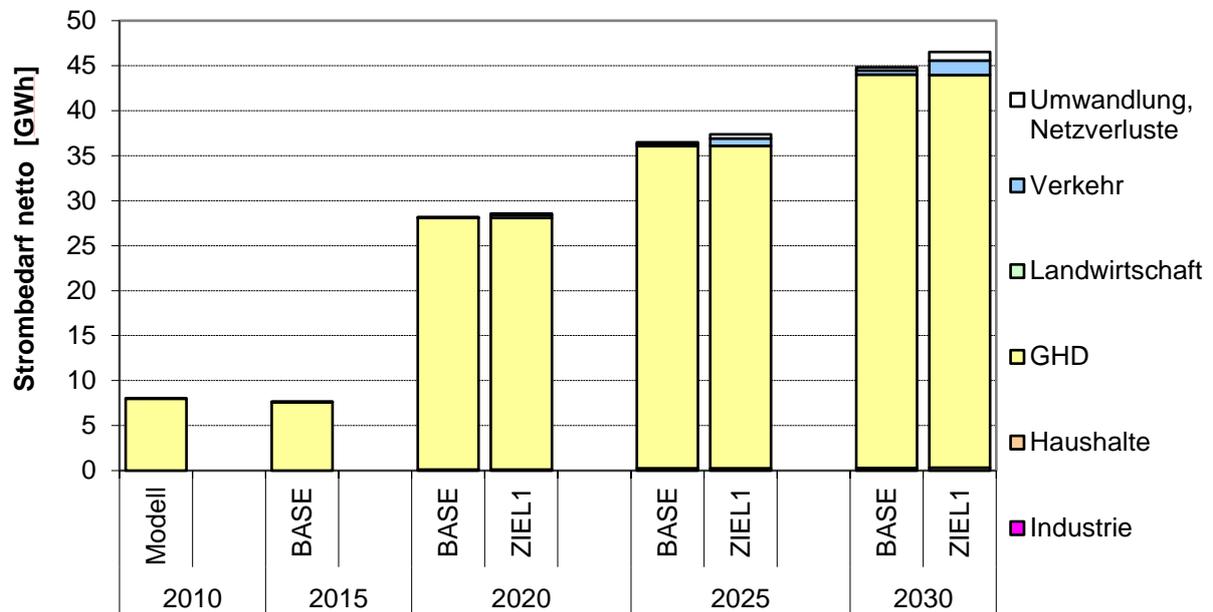


Abbildung 42: Entwicklung des Stromverbrauchs in Berlin TXL

3.2.6.4 Zentrale Wärmebereitstellung

Im Bereich der Wärmeversorgung wird die Rolle der Nahwärme mit einem Anteil im GHD Bereich von 38 % deutlich (Abbildung 43). Elektrische Wärmepumpen stellen mit 28 % die zweitgrößte Technologiegruppe im Wärmebereich innerhalb des GHD Sektors dar. Im Vergleich zum Basisszenario kann im Zielszenario eine Reduktion des Einsatzes fossiler Energieträger um ca. 5 TJ in der Wärmeversorgung erzielt werden.

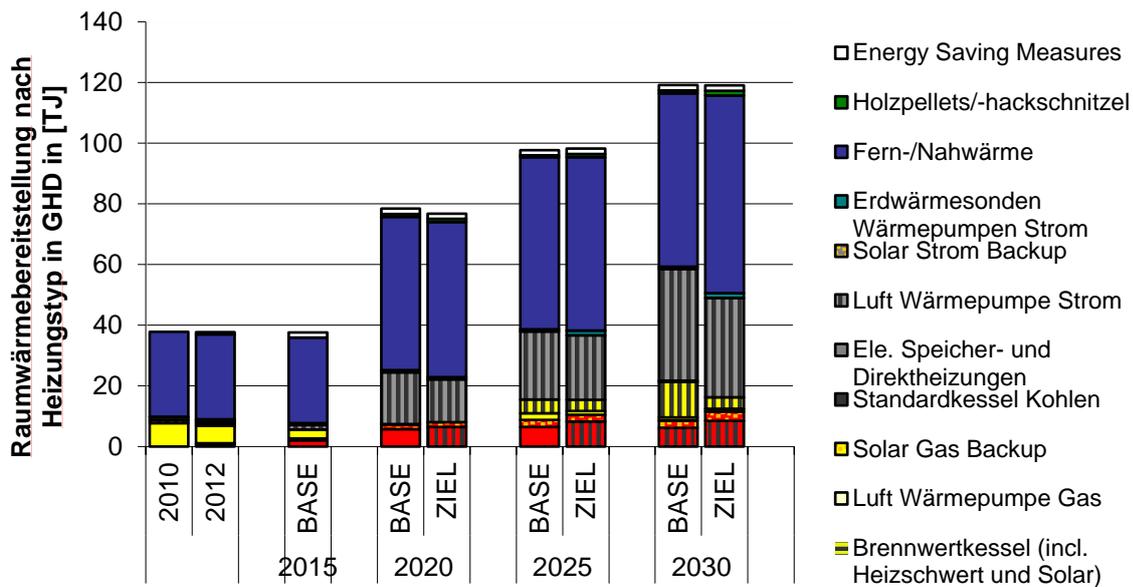


Abbildung 43: Nutzenergiebereitstellung von Raumwärme im GHD Sektor nach Technologietyp in Berlin TXL

Dass die bestehende Versorgungsstruktur der Nahwärme bereits im Bestand ausreichend dimensioniert ist und die bestehenden Leitungen sowie Versorgungskapazitäten auch nach der Flächenkonversion von Berlin TXL weiter genutzt werden, ist in Abbildung 44 erkennbar. Hier wird in beiden Szenarien deutlich, dass bis 2020 keine Notwendigkeit für einen weiteren Ausbau bestehender Nahwärmeversorgungskapazitäten besteht. Ab dem Jahr 2025 wird im Zielszenario nach Erreichen der technischen Lebensdauer ein kleiner Bestandteil der Gaskessel mit Nahwärmenetz zunächst durch einen Biomasse Spitzenlastkessel ersetzt und anschließend wird in 2030 die Nahwärmeversorgung durch den Einsatz von Solarthermie unterstützt.

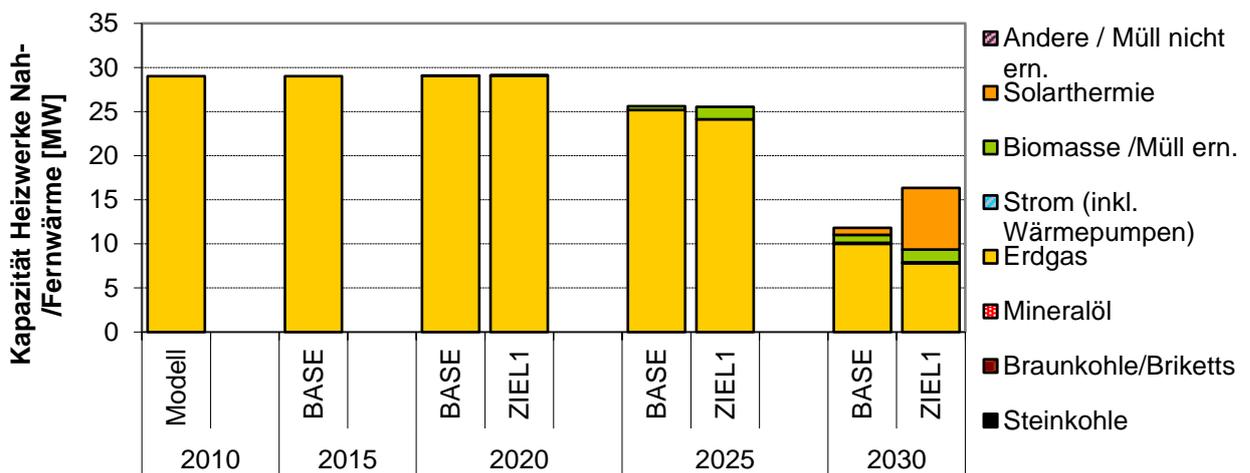


Abbildung 44: Nah-/Fernwärme Erzeugungskapazitäten in Berlin TXL

3.2.7 Auswirkungen der Klimaschutzmaßnahmen

Einen Vergleich der Systemkosten und die sich daraus ergebenden Kosten für die CO₂-Einsparungen sind in Tabelle 40 dargestellt. Die durchschnittlichen spezifischen CO₂ – Vermeidungskosten fallen mit ca. 900 €/t CO₂ höher aus im Vergleich zur Fallstudie Metzingen. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass die Struktur in Berlin TXL zu größten Teilen Neubau ist und zusätzliche CO₂ Vermeidungspfade hohe Investitionen nach sich ziehen. Die Mehrkosten je Person werden dabei inklusive der Beschäftigten berücksichtigt, da der untersuchte Bilanzraum zukünftig hauptsächlich ein Gewerbegebiet darstellen wird und die anfallenden Emissionen dem GHD Sektor zugeschrieben werden können.

Tabelle 40: Systemkosten und resultierende CO₂ Vermeidungskosten für Basis- und Zielszenario für Fallstudie Berlin TXL

	BASE	ZIEL1
CO₂ Emissionen pro Kopf pro Jahr in 2030 [t/ppa]	1,5	0,7
Kumulierte CO₂ – Emissionen bis zum Zieljahr 2030 [kt]	456,7	334,6
Kumulierte CO₂ Einsparungen gegenüber Basisszenario [kt]	-	122,1 (-27 %)
Jährliche CO₂ Einsparungen in 2030 gegenüber Basisszenario [kt]	-	14,8
Diskontierte Systemkosten [T€]	195.196	304.738
Mehrkosten pro Kopf pro Jahr [€₂₀₁₀/ppa]	-	297,9
Durchschnittliche spezifische CO₂ – Vermeidungskosten [€₂₀₁₀ /t CO₂]	-	897,2

3.2.8 Energiewirtschaftliche Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

In Neubaugebieten sollten starke Anreize zur Selbstnutzung von PV-Strom gesetzt werden, wenn die Reduktion der CO₂ Emissionen priorisiert behandelt werden sollen. Vor allem im GHD und Industrie Bereich, wo der Eigennutzungsgrad durch „relativ konstante“ Stromlasten (Beleuchtung und restliche Stromwendungen ganzjährig sowie Kühlung im Sommer) höher ausfällt, als im Wohngebäudebereich, kann eine Incentivierung zur Selbstnutzung von PV-Strom in hohen CO₂ Einsparungen resultieren. Zudem fällt auf, dass die Elektromobilität sich gut mit PV im Industrie und GHD-Bereich ergänzt, was eine weitere Steigerung des Eigennutzungsgrades fördert (z. B. Mitarbeiter oder Kunde, die am GHD Gebäude das Elektroauto zur Mittagsstunde laden). Bestehende Energie-

Infrastruktur sollte aus ökonomischer Sicht möglichst ins Quartierskonzept eingebunden werden (in diesem Fallbeispiel das Nahwärmenetz).

Aus stadtplanerischer Sicht ist es empfehlenswert vor allem ein ganzheitliches Verkehrskonzept zu entwickeln, das zum einen eine verstärkte Nutzung des ÖPNV fördert aber auch neuartige Konzepte, wie einem Mobilitätsmanagement für Betriebe berücksichtigt. Dabei sollen die von den Betrieben erzeugten Verkehre umwelt- und sozialorientiert gestaltet werden. Dazu gehören Pendler-, Liefer-, Mitarbeiter- und Besucherverkehr, sowie Dienstreisen. Ein wichtiges Ziel des Mobilitätsmanagements ist es, auf das individuelle Verkehrsverhalten der Mitarbeiter eines Betriebes einzuwirken. Auch durch die attraktivere Gestaltung von Rad- und Fußwegen kann der Anteil nichtmotorisierter Mobilität erhöht werden. Im Weiteren sollte die Stadtentwicklungsplanung den Fokus auf die Förderung des Umweltverbundes und E-Mobilität legen. Dies könnte z. B. Vergünstigungen bei Fahrten mit nachhaltigen Verkehrsmitteln oder auch die Förderung von Jobtickets betreffen. Auch eine verdichtete Taktung des ÖPNV sowie eine verbesserte Anbindung des Umlandes wären weitere Maßnahmen. Für Pkw ab einem definierten Besetzungsgrad (z. B. 2 und mehr Personen je Pkw) wäre eine Benutzungsfreigabe von Busspuren denkbar. Eine Kooperation mit Stadtwerken bzw. Energieversorgern hinsichtlich der Bereitstellung von Ladesäulen mit kostenlosem Ökostrom käme darüber hinaus in Frage.

Berlin TXL bietet aufgrund des geringen Anteils von Bestandsbauten die Anwendung eines sonst nicht möglichen Ansatzes einer beinahe „grünen Wiese“ und die Möglichkeiten zur Realisierung einer modernen „Planstadt“. Vor allem hinsichtlich der vielen Neubauten und der geplanten Größe sowie der Verbraucherdichte, wie sie in TXL vorgesehen wird, ermöglicht zahlreiche innovative und gleichzeitig wirtschaftlich konkurrenzfähige Versorgungslösungen im Energieversorgungsbereich.

Lokale Energieversorgungsunternehmen können innovative Versorgungslösungen des Quartiers mit Contracting-Modellen verknüpfen, beispielsweise dezentrale BHKWs zu Wärme- und Stromversorgung mit zusätzlicher Anbindung an das bestehende Nahwärmenetz zur Nutzung als Speicher. Zusätzlich ist es empfehlenswert die Gewerbestruktur in direkter Kooperation mit der Stadtentwicklung detailliert zu erfassen und ein die Erstellung eines Abwärme- und Wärmekatasters zu initiieren. Zusätzliche Einsparpotenziale können dadurch identifiziert werden und für den Ausbau des Wärmenetzes genutzt werden.

Verkehrsplaner sollten bereits im Planungsprozess die verkehrliche Infrastruktur für E-Mobilität einbeziehen, indem Stellflächen für E-Mobilität ausgewiesen und Ladesäulen aufgestellt werden. Fokus sollte auf der Attraktivitätssteigerung im Bereich Umweltverbund (ÖPNV) durch entsprechende Verkehrsflächenumgestaltung gelegt werden durch Einrichtung von Busspuren, ÖPNV-Haltestellen und Flächen für Rad- und Fußgängerverkehr.

Die Wohnungswirtschaft kann durch die Installation von Elektroladeanschlüssen an privaten Stellplätzen bzw. von Elektroladesäulen in Quartieren und Tiefgaragen einen Beitrag zur Förderung der E-Mobilität leisten. Der Radverkehr kann durch geschützte und abschließbare Radabstellbereiche in ausreichender Zahl unterstützt werden. Der Einfluss der Wohnungswirtschaft wird jedoch im Neubau zunehmend geringer (bereits hoher gesetzlicher Standard). Dies gilt beim Projekt TXL mit geringem Wohnnutzungsanteil umso mehr.

4 EN-easy

Die Zielsetzung dieses Projekts ist es, neben der Entwicklung des Sustainable City Information Model SCIM, dass die Bedarfsseiten Gebäude und Verkehr und den übergreifenden Bereich miteinander erfasst, verbindet und abbildet, ein Modell abzuleiten und daraus ein Tool zu entwickeln. Das EN-Easy-Tool soll einfach nutzbar sein und vor allem für Stadtplaner, Klimaschutzmanager, Entscheidungsträger und sonstige interessierte Nutzer konzipiert sein. Über eine einfache Eingabe eines zu analysierenden Stadtgebiets bzw. Stadtquartiers soll schnell der energetische IST-Zustand des Stadtquartiers darstellbar sein. Zudem sollen Energieeinspar- und Energieeffizienzsteigerungspotenziale sowie die daraus resultierenden CO₂-Einsparungen mit Hilfe von definierten Maßnahmen bezüglich der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit untersucht und bewertet werden. Mit Hilfe einer definierten Datenbank und einer im Hintergrund mit Grundlagen gespeisten Berechnung wird der Istzustand sowie der Zustand nach der Maßnahme berechnet und für den Benutzer dargestellt. Ziel ist es, mittels grafischer Gebietsauswahl, der Verwendung von Daten aus einem Geoinformationssystem (GIS) ergänzt durch statistische Daten aus dem Zensus und der Nutzerauswahl und -variation weniger Parameter, schnell eine Rangfolge und Empfehlung von Maßnahme zur Energieeinsparung abzuleiten.

Die Methodik und Anwendung des vereinfachten Tools EN-easy wird in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

4.1 Analyse bestehender Tools und Ableitung von Anforderungen

Vor der Entwicklung eines neuen, vereinfachten Tools (EN-easy) bedarf es einer Analyse bestehender Werkzeuge zur energetischen Betrachtung von Siedlungen. Aus der Analyse gehen die Anforderungen an das zu entwickelnde EN-easy Tool hervor. Im Folgenden werden fünf bestehende Tools kurz vorgestellt, bevor im Weiteren die Anforderungen an das EN-easy Tool abgeleitet werden.

4.1.1 District ECA

Im Rahmen von EnEff:Stadt wurde das Tool District ECA vom Fraunhofer IBP bis 2013 entwickelt mit dem Ziel Stadtquartiere hinsichtlich ihrer Energieeffizienz bewerten zu können [39]. Im Fokus stehen die Energieversorgung von Wohn- und Nicht-Wohngebäuden und ihre Bewertung im Hinblick auf den Primärenergieeinsatz und entstehenden CO₂-Emissionen. Betrachtet wird ein Jahr in monatlicher Auflösung. Zukünftige Entwicklungen werden nicht abgebildet. Nicht Bestandteil des Tools ist der Verkehrssektor. Zudem fehlt eine Kostenbetrachtung der unterschiedlichen Technologien und Energieträger.

4.1.2 ELAS (Energetische Langzeitanalysen für Siedlungsstrukturen)

Das in Österreich 2011 entwickelte Online-Tool ELAS dient zur „Energetischen Langzeitanalyse für Siedlungsstrukturen“ [49]. Neben Wohngebäuden (vom Einzelgebäude bis hin zum Quartier) werden die räumliche Struktur und der Verkehr berücksichtigt. Ergebnis sind u. a. der jährliche Energieverbrauch und die CO₂-Lebenszyklus-Emissionen. Darüberhinausgehend können Entwicklungen in zwei Szenarien abgebildet werden: Trend- und Green-Szenario. Im Rahmen einer regionalökonomischen Analyse werden Kosten für die Errichtung und den Betrieb von Gebäuden sowie externe Effekte der Mobilität abgebildet.

4.1.3 Energieausweis für Siedlungen

Das ebenfalls in Österreich entwickelte Excel-Tool „Energieausweis für Siedlungen“ ermöglicht die Betrachtung der Gesamtenergieeffizienz von Siedlungen mit dem Ziel einer ganzheitlichen Optimierung hinsichtlich Kompaktheit der Siedlung „mit möglichst kurzen Wegen und hoher Wohnqualität“ [50]. Eine Einzelgebäudebetrachtung findet nicht statt, da im Fokus die Siedlungsstruktur, ihre Lage und (Verkehrs-) Infrastruktur stehen. Als Ergebnis wird eine Gesamtbewertung analog zur Energieeffizienzbewertung in die Kategorien A – G erhalten. Berücksichtigt sind u. a. auch die Kosten zur Errichtung und Erhaltung der Siedlung.

4.1.4 EFES (Energieeffiziente Entwicklung von Siedlungen)

Ein weiteres in Österreich entwickeltes Excel-Tool ist EFES zur Bewertung der energieeffizienten Entwicklung von Siedlungen [51]. Sowohl der gebäude- als mobilitätsbezogene jährliche Energieverbrauch werden betrachtet. Mit der Energienutzung verbundene CO₂-Emissionen sowie Kosten werden nicht berücksichtigt⁹. Auch zukünftige Entwicklungen werden nicht abgebildet.

4.1.5 Spatial Energy Simulation Berlin TXL

Für den Standort Berlin-TXL wurde für die Energieplanung eine räumliche Energiesimulation durchgeführt [48]. Hervorzuheben sind die zur Vernetzung unterschiedlicher Energienutzungen (Strom, Wärme, Kälte) generierten Lastkurven in stündlicher Auflösung von Wohn- und Nicht-Wohngebäuden (erstellt von Projektpartner Dresö). Dies ermöglicht auch die Betrachtung von LowEx-Netzen, der Integration von Erneuerbaren Energien in solche und von Speicheroptionen. Verkehr, Kosten sowie Entwicklungsszenarien werden nicht untersucht.

4.1.6 EDA (Easy District Analysis)

Das EDA-Tool wurde im Rahmen des internationalen Forschungsprojektes zur Niedertemperatur-Fernwärmeversorgung *IEA DHC Annex TS I* vom IER und Mitgliedern des Subtask A entwickelt [52], [53]. Es ist ein vereinfachtes Werkzeug (Software: Excel-VBA) für die energetische, ökologische und ökonomische Analyse sowie Bewertung von unterschiedlichen Varianten der Nahwärmeversorgung von Quartieren. Ausgehend von der Generierung des Raumwärme- und Warmwasser-Lastgangs eines Versorgungsgebietes erfolgt die stündliche Einsatzoptimierung von Technologien der Nahwärmerversorgung (Kraft-Wärme-Kopplung, Spitzenkessel, solarthermische Großanlagen, thermische Speicher) unter der Prämisse von Grenzkosten oder CO₂-Emissionen. Berücksichtigt dabei sind ökonomische Rahmenbedingungen wie z.B. Börsenstrompreise und KWK-Zuschlag.

4.1.7 Anforderungen an EN-easy

Bisherige Tools zur Analyse des städtischen Energiesystems legen oftmals den Fokus auf den Gebäudesektor (wie z.B. District ECA). Ein integraler Ansatz wird in Tools wie ELAS und EFES verfolgt, in dem neben Gebäuden auch der Mobilitätssektor in die Betrachtung miteinbezogen wird. Der Nicht-Wohngebäude-Sektor wird z.T. jedoch vernachlässigt (ELAS) bzw. nur im Ansatz (EFES)

⁹ In EFES werden Maßnahmen im Bericht thematisiert und bewertet, jedoch nicht im Tool.

dargestellt. Hinsichtlich der zeitlichen Auflösung ist weder ELAS noch EFES geeignet, um die Integration von Erneuerbaren Energien in das städtische Energiesystem im Detail abzubilden. Von den untersuchten Tools wird lediglich im „Spatial Energy Simulation Berlin TXL“ sowie im EDA-Tool eine hohe zeitliche Auflösung (stündlich) der Lastprofile berücksichtigt, um zu untersuchen, inwiefern Erneuerbare Energien den Energiebedarf je Stunde im Jahr decken und LowEx-Systeme zum Einsatz kommen können. Was hier jedoch fehlt, ist eine Berücksichtigung des Verkehrssektors. Des Weiteren erlauben nur wenige Tools (z. B. ELAS), die Stadt-/Quartiersentwicklung in Szenarien zu untersuchen. Ein großes Manko aller Tools ist die fehlende Implikation aus den berechneten Ergebnissen hinsichtlich Handlungsansätze.

Das EN-easy-Tool wird daher im Wesentlichen durch zwei neue Aspekte charakterisiert:

- die integrale Betrachtung der Nachfrageseite (Gebäude, Verkehr) und der Erzeugerseite (Energiesystem) sowie Berücksichtigung von Kosten.
- Ableitung von Maßnahmen aus den Berechnungsergebnissen

Die Handlungsfelder werden eingeteilt in energiesystemspezifische (übergreifende), gebäudespezifische und verkehrsspezifische Maßnahmen. Das EN-easy-Tool greift dabei auf Daten zurück, die für die jeweiligen Anwendungsbereiche, z.B. im Bereich Gebäude durch Simulationen, im Rahmen dieses Projekts erzeugt wurden. Statistische Daten wurden zudem aufbereitet, um über möglichst lineare Zusammenhänge eine schnelle Berechnung und Ergebnisdarstellung zu ermöglichen. Darin setzt sich das EN-easy-Tool vom SCIM-Modell ab, da z. B. auf rechenaufwendige Optimierungsfunktionen verzichtet wird.

Eine Übersicht der Eigenschaften der verschiedenen bestehenden Tools und eine Einordnung des EN-easy im Vergleich dazu, wird in Abbildung 45 gegeben.

Klassifizierungskategorien			District-ECA	ELAS	Energieausweis für Siedlungen	EFES	Spatial Energy Simulation Berlin TXL	EDA	EN-easy
Entwickler			Fraunhofer IBP 2012	Uni Wien, TU Graz 2011	u.a. Uni Wien 2014	Öster. Inst. f. Raumplanung 2010	u.a. Drees & Sommer 2015	IER & Subtask A IEA DHC Annex TS I	IER, Dres.o., Karajan
Software			eigene Prog.	Online-Tool	Excel	Excel	eigene Prog.	Excel-VBA	Online-Tool
Nachfrage-seite	Gebäude	Wohngebäude							
		Nicht-Wohng. Solarpotenzial				keine weitere Differenzierung			
Versorgung	Energie-system	Verkehr							
		Nahwärme							
Detailierungsgrad	Zeitl. Auflösung	Stunde							
		Tage							
		Monat							
		Jahr							
		Zeithorizont	<= 1 Jahr						
	> 1 Jahr								
Modell	Simulationsmodell	Investitionen/ Auslegung	Input-Output	Input-Output	Input-Output	Input-Output			Input-Output
		Betrieb							
End-energie	Elektrischer Strom	Wärme							
		Verkehr							
		Kosten							
Variablen	Energie	Exergie			nur Infrastruktur				
		CO2 - Emissionen			nur Verkehr				
		Gebäude (G)							
		Verkehr (V)							
Maßnahmen	Übergreifend (Ü)								

Legende

- zutreffend
- teilweise zutreffend
- nicht zutreffend

Abbildung 45: Vergleich bestehender Tools sowie Anforderungen an bzw. neue Ansätze in EN-easy

4.2 Beschreibung des EN-easy Tools

Das EN-easy-Tool ist ein einfach nutzbares Online-Tool für Stadtplaner, Klimaschutzmanager, Entscheidungsträger und sonstige interessierte Nutzer, um Gemeinden und Quartiere in Bezug auf Energieverbrauch und CO₂-Emissionen zu bilanzieren als auch CO₂-Einsparpotentiale anhand eines Portfolios an Klimaschutzmaßnahmen aufzuzeigen. Ein Ranking der Maßnahmen nach CO₂-Vermeidungskosten zeigt bereits heute wirtschaftliche Maßnahmen auf. EN-easy wurde in Zusammenarbeit des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart, Drees & Sommer, Karajan Ingenieure sowie M.O.S.S. Computer Grafik Systeme GmbH entwickelt. Online aufrufbar ist das EN-easy-Tool über folgenden Link: <http://iereasy.ier.uni-stuttgart.de:8080/eneasy-gui/>

Das EN-easy-Tool ermöglicht die Bilanzierung von Gemeinden hinsichtlich Endenergieverbrauch und CO₂-Emissionen sowie eine Abschätzung des CO₂-Einsparpotentials bei Umsetzung von Maßnahmen für den Klimaschutz. Eine Empfehlung für die Umsetzungsreihenfolge von Klimaschutzmaßnahmen wird auf Basis einer CO₂-Vermeidungskostenkurve gegeben. Diese sortiert die Maßnahmen nach Wirtschaftlichkeit, d.h. nach Kosten in EUR je Tonne eingesparter CO₂-Emissionen. Dabei werden Maßnahmen mit negativen Einsparkosten als wirtschaftliches Potential ausgewiesen. Eine Umsetzung dieser Maßnahmen spart demzufolge nicht nur CO₂-Emissionen ein, sondern auch Kosten.

Neben der Bewertung von ganzen Gemeinden ermöglicht das EN-easy-Tool einzelne Untersuchungsgebiete von Gemeinden durch grafisches Einzeichnen zu erfassen. Der Benutzer kann somit Auswertungen zum Endenergieverbrauch und Treibhausgasemissionen auch auf Quartiersebene durchführen.

Während auf Gemeindeebene als Eingangsdaten Zensus & BBSR-Daten zum Einsatz kommen, werden bei der individuellen Gebietsauswahl zusätzlich Gebäudedaten aus dem Gebäude-Atlas-Server [54] von MOSS berücksichtigt. Diese beinhalten neben Daten zu Gebäudegrundriss und -höhe eine Klassifizierung der Gebäude in Kategoriegruppen (u.a. Wohngebäude, Gewerbegebäude) und Gebäudekategorien nach Anwendungszweck (u.a. gewerbliche, bildungsbezogene, kulturelle Zwecke) [54], [55]. Zur Unterscheidung der Wohngebäude in Ein-/Zweifamilienhäusern und Mehrfamilienhäuser wird das Gebäudevolumen als Kriterium herangezogen. Alle Wohngebäude, mit einer Höhe von bis zu 10 m und einer Grundfläche von bis zu 150 m² werden den Ein-/Zweifamilienhäusern zugeordnet. Gebäude mit größerem Volumen werden Mehrfamilienhäusern zugerechnet. In EN-easy werden folgende Anwendungszwecke bei Gewerbegebäuden berücksichtigt: administrative (a), gewerbebezogene (g), medizinische (m), bildungsbezogene (u), freizeitbezogene (f) und kulturelle (k) Zwecke. Der Anwendungsbereich des EN-easy-Tools umfasst die Gemeinden in Deutschland (siehe Abbildung 46), die über die Benutzeroberfläche ausgewählt werden können.

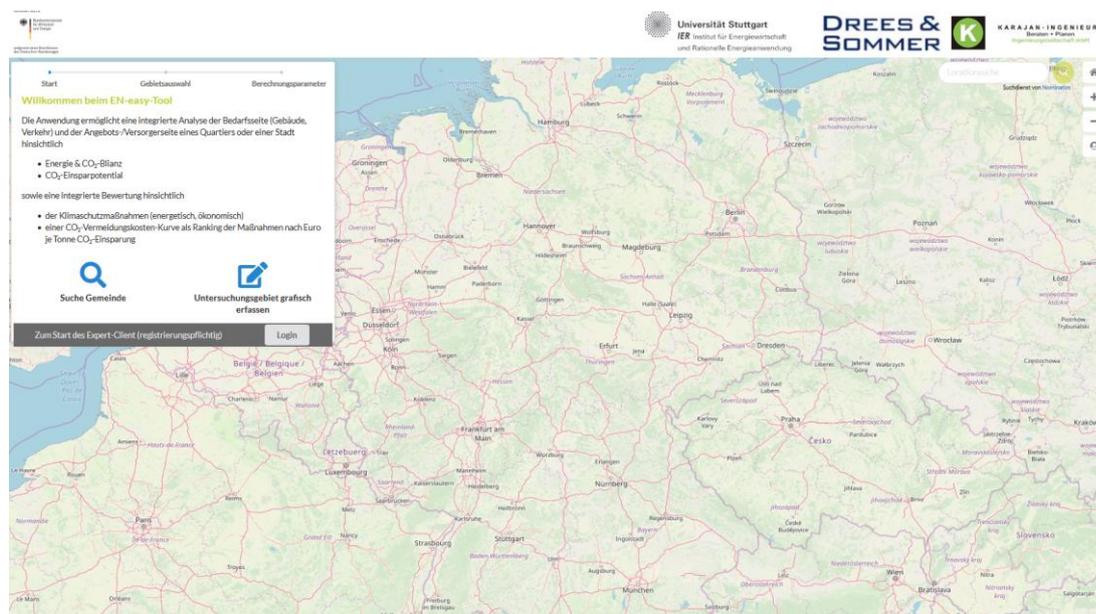


Abbildung 46: Benutzeroberfläche und Anwendungsbereich des EN-easy-Tools

Die energetischen und ökologischen Bilanzierungen unterteilen sich in die Bereiche Gebäude und Verkehr, wobei Gebäude nach Wohn- und Nichtwohngebäuden differenziert werden (vgl. Abbildung 47, links). Eine weitere Unterscheidung wird für die Kategorie des Endenergieverbrauchs vorgenommen: Strom, Wärme/Kälte und Mobilität. Für jede dieser Kategorien kommen spezifische CO₂-Emissionsfaktoren zum Einsatz, um den Treibhausgas-Ausstoß (vgl. Abbildung 47, rechts) aus der Endenergiebilanz herzuleiten.

Online-Ergebnisse EN-easy für den Bilanzraum Biberach an der Riß.
Für detailliertere Analysen siehe pdf-Bericht

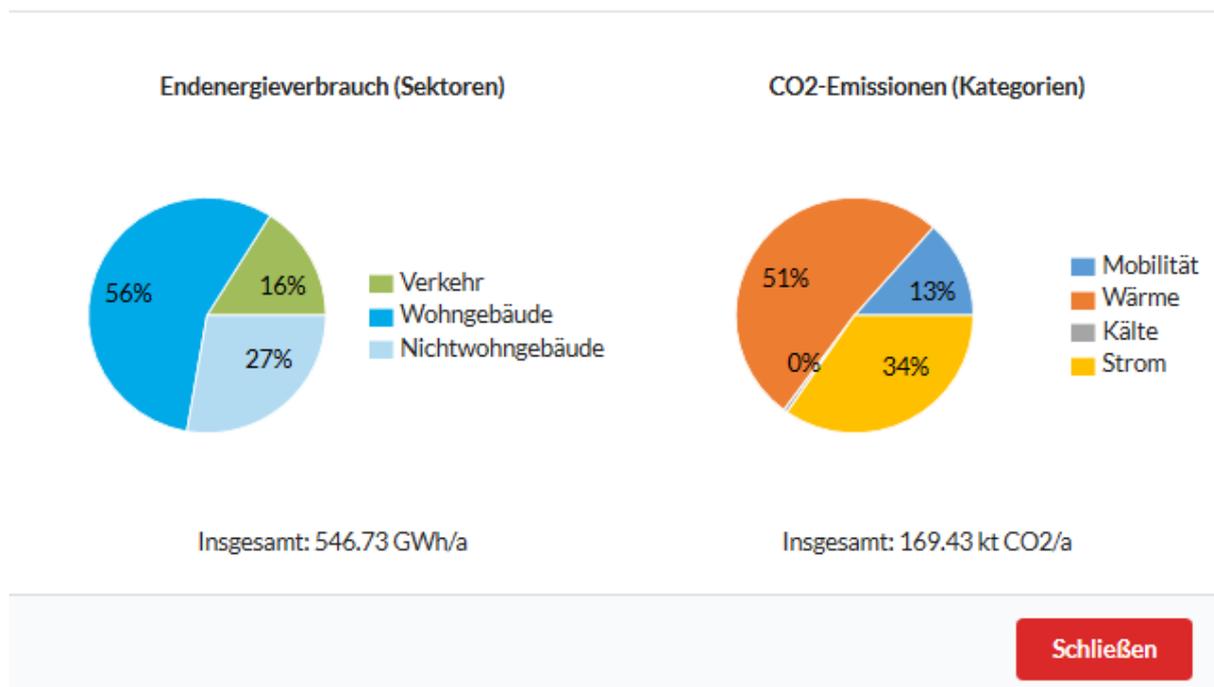
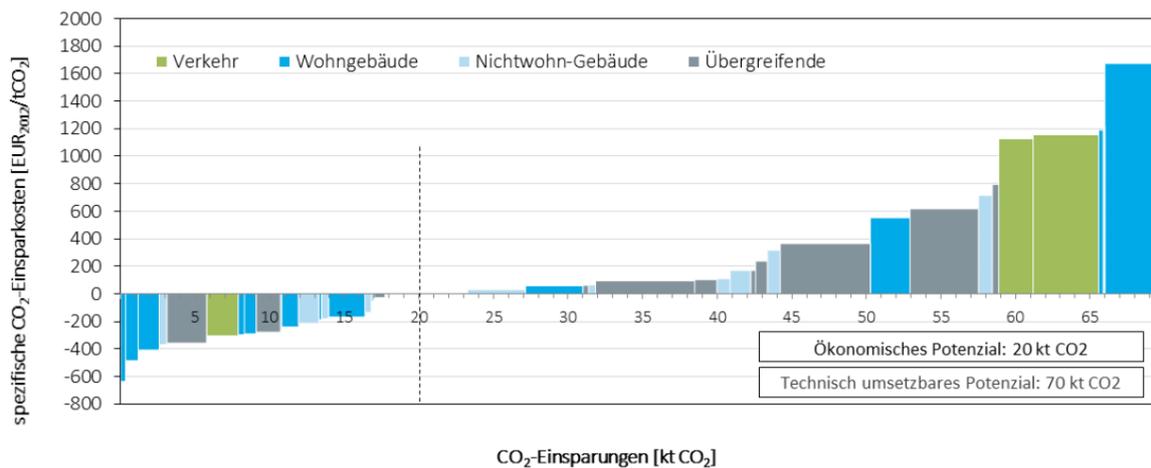


Abbildung 47: Beispielhafte Darstellung der Online-Grafiken zum Endenergieverbrauch und CO₂-Ausstoß einer Gemeinde

Neben der Darstellung einzelner Ergebnisse auf der Web-Oberfläche erfolgt eine detaillierte Auswertung der Ergebnisse in Form eines schematischen pdf-Berichts. Dieser gliedert sich in Energie - & CO₂-Bilanz, CO₂-Einsparpotential und Klimaschutzmaßnahmen nach Sektoren, Kosten und Einsparpotential sowie in einen Anhang mit weiteren Erläuterungen (Bilanzierungsmethode, Glossar). Im Abschnitt Energie - & CO₂-Bilanz werden u.a. in einer Tabelle neben allgemeinen Daten (Bilanzraum, Fläche, Einwohner, Beschäftigte, Raumtyp) die Anzahl der Gebäude sowie Wohn- bzw. Nettogeschossfläche nach Gebäudetyp angegeben. Darüber hinaus wird die Verteilung der Wohngebäude nach Baualtersklassen aufgeführt. Der CO₂-Ausstoß und Endenergieverbrauch des untersuchten Bilanzraumes wird angegeben und in spezifischen Kennzahlen eingeordnet (z.B. Endenergieverbrauch je Einwohner). Das technische und wirtschaftliche CO₂-Einsparpotential nach den Maßnahmenbereichen Wohngebäude, Nichtwohngebäude, Verkehr und übergreifend wird im Abschnitt CO₂-Einsparpotential vorgestellt. In Abschnitt Klimaschutzmaßnahmen erfolgt eine Bewertung der Maßnahmen nach CO₂-Vermeidungskosten und Einsparpotential (vgl. Abbildung 48, oben). In Form einer Treppenkurve werden die Klimaschutzmaßnahmen nach ihren spezifischen CO₂-

Vermeidungskosten (vertikale Achse) aufsteigend sortiert und gleichzeitig die CO₂-Einsparpotentiale der Klimaschutzmaßnahmen ausgewiesen (horizontale Achse). Die verschiedenen Bereiche der Maßnahmen (Wohngebäude, Nichtwohngebäude, Verkehr und übergreifende Maßnahmen) werden durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet. Die Zuordnung der Maßnahmen zu den „Treppenstufen“ erfolgt über eine Tabelle (vgl. Abbildung 48, unten), die die jeweilige Maßnahme benennt und aufsteigend in spezifische CO₂-Vermeidungskosten und CO₂-Einsparpotential quantifiziert.



Kategorie	Maßnahmen-Nr.	Bereich	Name der Maßnahme	[tEUR/kt CO ₂]	[t CO ₂]
2	G09	Wohngebäude	Tausch Umwälzpumpen	-637	333
2	G13	Wohngebäude	Energieberatung	-484	852
2	G10	Wohngebäude	Hydraulischer Abgleich	-407	1.404
3	G26	Nichtwohn-Gebäude	Hydraulischer Abgleich	-368	518

Abbildung 48: CO₂-Vermeidungskostenkurve für eine Gemeinde mit Ausweisung der wirtschaftlichen und technischen Potentiale (oben) und Ausschnitt der tabellarischen Darstellung (unten)

Weitere Erläuterungen zur Bilanzierungsmethode oder zur Beschreibung der Maßnahmen sind im Anhang des pdf-Berichts des EN-easy-Tools zu finden.

4.3 Ableitung der Energie- und CO₂-Bilanz von Quartieren /Städten

Für die Berechnung der Einsparpotenziale und die Ableitung von Handlungsempfehlungen ist die Bestimmung des Status Quo eines Bilanzraums notwendig. Daher ist ein wesentlicher Bestandteil des EN-easy Tools die Bilanzierung des gegenwärtigen Energieverbrauchs und CO₂-Ausstoßes des betrachteten Bilanzraumes. Zweck einer Energiebilanz ist es die verbrauchte Endenergie, die die Verbraucher und die eingesetzten Energieträger zu identifizieren. Die Endenergieverbräuche lassen sich mittels statistischer Kennzahlen wie z. B. spezifischer jährlicher Raumwärmebedarf je m² Wohnfläche in Abhängigkeit des Gebäudetyps (Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus) und der Baualtersklasse abschätzen (vgl. Tabelle 18). Aus dem Endenergieverbrauch lässt sich anhand spezifischer CO₂-

Emissionsfaktoren (siehe Tabelle 42) die CO₂-Freisetzung der Modellregion bestimmen. Dabei wird eine Aufteilung der Bilanz nach Wohngebäuden (private Haushalte), Nichtwohngebäuden (Gewerbe, Handel, Dienstleistung) und Verkehr vorgenommen, um zielgruppenspezifische Klimaschutzmaßnahmen ableiten zu können. Die CO₂-Bilanz dient als Referenzwert für die Berechnung des gesamten CO₂-Einsparpotenzials, das mittels CO₂-Minderungsmaßnahmen erschlossen werden kann. Zudem eignet sich die Energie- und CO₂-Bilanz bei Fortschreibung als langfristiges Controlling-Instrument im Klimaschutz [56].

Als Bilanzierungsmethode wird für die privaten Haushalten (Wohngebäude) als auch für den GHD-Sektor (Nichtwohngebäude) eine endenergiebasierte Territorialbilanz¹⁰ verwendet, während für den Verkehr eine Verursacherbilanz angewendet wird. Zudem werden in der Verursacherbilanz auch die CO₂-Emissionen, die auf die Arbeitnehmer, die nicht aus der Bevölkerung des Bilanzraumes stammen (Pendler) zurückzuführen sind, unabhängig ob die Treibhausgase innerhalb oder außerhalb des Bilanzraumes entstehen, berücksichtigt.

Neben der sektoralen Unterteilung wird zwischen den Anwendungskategorien Strom, Wärme, Kälte und Mobilität unterschieden. Der Industrie-Sektor wird in dieser Analyse nicht berücksichtigt, da der Energieverbrauch stark branchenabhängig ist und große regionale Unterschiede hinsichtlich der Industrieansiedlung aufweist. Eine durchschnittliche Betrachtung für ein Quartier birgt daher für diesen Bereich eine große Fehleranfälligkeit.

Im Folgenden wird am Beispiel der Fallstudie Metzingen das allgemeine Vorgehen zur Berechnung der Energie- und CO₂-Bilanz einer Modellregion vorgestellt, wobei für die Bereiche Wohngebäude, Nichtwohngebäude und Verkehr Einzelanalyse erstellt werden.

Wohngebäude

Die Energiebilanz basiert gebäudeseitig auf Angaben des Zensus und auf Studien des IWU [4, 57]. Aus den Zensus-Daten lassen sich die Anzahl der Gebäude nach Typ (Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus) und Baualtersklassen ableiten, womit der spezifische Wärmebedarf je m² Wohnfläche korreliert (vgl. Tabelle 41). Die spezifischen Wärmebedarfe wurden aus den IWU-Daten abgeleitet. Berücksichtigt wurden dabei bereits erfolgte Modernisierungen der Gebäudehülle, indem angenommen wird, dass je Baualtersklasse bis 1994 jeweils 12,5 % der Gebäude saniert waren. Zusätzlich wird der Warmwasserbedarf in Abhängigkeit des Gebäudetyps addiert (10 kWh/m²*a je EFH bzw. 15 kWh/m²*a je MFH).

¹⁰ Alle im Bilanzraum entstehenden Endenergieverbräuche und CO₂-Emissionen (auch durch Strombezug verursachte CO₂-Emissionen) werden berücksichtigt.

Tabelle 41: Spezifische Wärmebedarfe (Raumwärme + Warmwasser) je Gebäudetyp und Baualtersklasse unter Berücksichtigung bereits sanierter Gebäude (je Baualtersklasse 12,5% von A bis H)

Spezifischer Heizwärmebedarf [kWh/(m ² *a)]			Quelle: IWU [58]
Baualtersklasse	Zeitraum	EFH	MFH
A	bis 1859	168	178
B	1860 - 1918	165	140
C	1919 - 1948	153	156
D	1949 - 1957	170	150
E	1958 - 1968	171	126
F	1969 - 1978	146	132
G	1979 - 1983	117	118
H	1984 - 1994	129	122
I	1995 - 2001	110	98
J	2002 - 2009	80	68
K	2010 - 2015	50	63
L	ab 2016	36	61

Um vom Nutzenergiebedarfsniveau auf die benötigte Endenergie zu schließen, wird eine für Deutschland durchschnittliche Aufwandszahl für den Wärmeerzeuger von 1,25 angesetzt [46, 48]. Damit lässt sich der jährliche Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser berechnen (vgl. Tabelle 49).

Die jeweiligen Endenergiebedarfe werden mit einem spezifischen CO₂-Emissionsfaktor multipliziert (siehe Tabelle 42), um den CO₂-Ausstoß zu ermitteln. Während der Stromemissionsfaktor auf dem Bundesmix basiert, errechnet sich der Wärmemixfaktor als Durchschnittswert aus den länderspezifischen Anteilen von Erdgas, Öl, Fernwärme, etc. an der Wärmebereitstellung (z. B. Baden-Württemberg: 0,244 kg CO₂/kWh_{Wärme}).

Tabelle 42: Spezifische CO₂-Emissionsfaktoren der Wärmebereitstellung nach Bundesländern bezogen auf Endenergie [57, 31]

Bundesland	Erdgas	Öl	Fernwärme	Strom	sonstiges	Holzpellet	Flüssiggas	Kohle	CO ₂ -Umrechnung	CO ₂ -Fernwärme	
Baden-Württemberg	35.2%	38.9%	7.8%	7.3%	10.8%				0.244	0.210	
Bayern	33.7%	41.7%	8.4%	3.2%	13.0%				0.231	0.204	
Berlin	37.3%	19.6%	35.5%	2.1%	5.5%				0.229	0.235	
Brandenburg	47.2%	11.9%	26.7%	3.9%	10.3%				0.228	0.250	
Bremen	56.3%	16.8%	19.1%	3.7%	4.1%				0.246	0.329	
Hamburg	47.8%	15.7%	29.9%	2.4%	4.1%				0.220	0.213	
Hessen	43.4%	37.0%	6.7%	4.2%	8.7%				0.235	0.224	
Mecklenburg-Vorpommern	38.4%	12.3%	34.9%	3.5%	10.9%				0.161	0.049	
Niedersachsen	67.4%	19.2%	7.6%	2.9%	2.9%				0.237	0.407	
Nordrhein-Westfalen	62.1%	20.4%	9.2%	4.6%	3.7%				0.229	0.229	
Rheinland-Pfalz	53.2%	30.5%	4.1%	3.3%	8.9%				0.225	0.182	
Saarland	45.8%	32.1%	11.8%	2.4%	7.9%				0.219	0.153	
Sachsen	38.7%	19.3%	27.3%	4.5%	10.2%				0.230	0.231	
Sachsen-Anhalt	48.0%	16.4%	26.3%	3.9%	5.4%				0.222	0.205	
Schleswig-Holstein	52.7%	22.4%	18.3%	2.2%	4.4%				0.231	0.260	
Thüringen	40.6%	17.8%	23.0%	3.5%	15.1%				0.182	0.058	
			sonstiges: Pellets, Flüssiggas, Kohle, k.A.			55.6%	27.8%	16.7%		Aufteilung des Anteils	
Deutschland	47.8%	26.8%	13.5%	4.1%	2.4%	3.0%	1.5%	0.9%	0.131	0.215	

Zur Berechnung des Stromverbrauchs einer Modellregion werden die in Tabelle 43 verwendeten wohnflächenspezifischen Strombedarfe herangezogen. Der strombedingte CO₂-Ausstoß ergibt sich durch Multiplikation des Endenergieverbrauchs mit einem spezifischen CO₂-Emissionsfaktor.

Tabelle 43: Spezifische elektrische Strombedarfe je m² Wohnfläche in Abhängigkeit des Gebäudetyps und der Baualtersklasse [3, 58]

Spezifischer Strombedarf je Gebäudetyp und Altersklasse [kWh/(m ² *a)]			
Baualtersklasse	Zeitraum	EFH	MFH
A	bis 1859	36	25
B	1860 - 1918	35	25
C	1919 - 1948	35	25
D	1949 - 1957	35	25
E	1958 - 1968	35	25
F	1969 - 1978	35	25
G	1979 - 1983	35	25
H	1984 - 1994	35	25
I	1995 - 2001	35	25
J	2002 - 2009	35	25
K	2010 - 2015	33	25
L	ab 2016	33	27

Nichtwohngebäude

Das Vorgehen zur Berechnung des Endenergieverbrauchs und CO₂-Ausstoßes der Nichtwohngebäude erfolgt analog zu den Wohngebäuden. Über spezifische Kennwerte werden Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen berechnet. Da Nichtwohngebäude jedoch wesentlich heterogener sind als Wohngebäude, existiert hier keine Typologie anhand derer spezifische Flächen abgeleitet werden können. Es besteht jedoch ein Zusammenhang zwischen Anzahl der Beschäftigten und der Nettogeschossfläche (siehe Tabelle 44), so dass die dem Energieverbrauch zugeordnete Fläche über die Anzahl der Beschäftigten je nach Bereich (Gewerbe, Handel, Dienstleistung) ermittelt wird.

Tabelle 44: Nettogeschossfläche (NGF) je Beschäftigten nach den Bereichen Handel, Dienstleistung und Gewerbe [35]

	Handel	Dienstleistung	Gewerbe
Nettogeschossfläche [m ² /Beschäftigten]	65,56	29,73	61,70

Spezifische Bedarfe für Raumwärme, Raumkühlung, Strom und Raumluftechnik sind in Tabelle 45 zusammengefasst. Aus dem Produkt von Nettogeschossfläche und spezifischen Bedarfskennzahlen sind die Energiebedarfe zu ermitteln. Unter Berücksichtigung der mittleren Aufwandszahl für Wärmeerzeuger in Deutschland (1,25) kann der Endenergieverbrauch berechnet werden. Die CO₂-Emissionen ergeben sich analog zu den Wohngebäuden aus spezifischen CO₂-Emissionfaktoren [46, 48].

Tabelle 45: Spezifischer Bedarfe: Heizwärme, Kälte, Strom, Strombezug Raumluftechnik unterteilt nach Handel, Dienstleistung und Gewerbe und differenziert nach Bestand und Neubau [59, 35, 46]

Spezifische Bedarfe [kWh/m ² a]	Handel		Dienstleistung		Gewerbe	
	Bestand	Neubau	Bestand	Neubau	Bestand	Neubau
Heizwärme	78,9	29,6	126,7	28,2	94,8	43,8
Klimakälte	17,4	30,4	7,6	27,4	3,9	13,2
Strom	69,6		73,2		68,1	
Strombezug Raumluftechnik	34,8		36,6		34,0	

Verkehr

Auch die verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen ergeben sich aus spezifischen Kennzahlen und einer Absolutgröße. Der CO₂-Ausstoß je Kilometer wird für ein Referenzfahrzeug auf 129 g CO₂/km entsprechend der in Kapitel 2.2.1 dargestellten Berechnung angesetzt. Die Berechnung des Endenergieverbrauchs erfolgt aus den spezifischen CO₂ Emissionen je Kilometer Fahrleistung. Unterschieden werden die Anteile von Benzin (ca. 71 %) und Diesel (ca. 29 %), da diese unterschiedlichen Heizwerte aufweisen (Benzin: 32,5 MJ/l, Diesel: 35,9 MJ/l). Mit den Heizwerten ergeben sich schließlich spezifische Energieverbräuche (kWh/km) für Benzin und Diesel. Der gesamte Endenergieverbrauch berechnet sich durch Multiplikation der jährlichen Fahrleistungen mit den spezifischen Energieverbräuchen.

4.4 Methodischer Ansatz zur Erstellung von CO₂-Minderungskostenkurven hinsichtlich Klimaschutzmaßnahmen

Im Folgenden wird das methodische Vorgehen zur Erstellung CO₂-Minderungskostenkurven für Klimaschutzmaßnahmen geschildert. Zunächst wird die Quantifizierung der Einzelmaßnahmen hinsichtlich des CO₂-Einsparpotenzials und der Vollkosten erläutert (vgl. Abschnitte 4.4.1). Unter Betrachtung des gesamten Maßnahmenportfolios sind Kopplungen von Einzelmaßnahmen zu berücksichtigen, um das CO₂-Einsparpotenzial nicht zu überschätzen (bei negativen Kopplungen/Wechselwirkungen) bzw. zu unterschätzen (bei positiven Kopplungen/Wechselwirkungen) (vgl. Abschnitt 4.4.3). Im Weiteren wird berücksichtigt, dass für die Erschließung von CO₂-Minderungspotenzialen von Maßnahmen unterschiedliche Akzeptanz und Hemmnisse bestehen können. Diese werden über Durchdringungsraten von Maßnahmen abgebildet, um das „technisch umsetzbare“ CO₂-Minderungspotenzial abzuschätzen. Abschließend wird die Berechnung der CO₂-Vermeidungskostenkurve von Klimaschutzmaßnahmen vorgestellt (vgl. Abschnitt 4.4.4).

4.4.1 CO₂-Minderungskosten

Im Allgemeinen können der Energiebedarf einer Versorgungsaufgabe und die damit einhergehenden CO₂-Emissionen auf drei verschiedene Arten und Weisen beeinflusst werden. Durch die Nutzung effizienter Technologien kann auf der Ebene Endenergie der Energieträgereinsatz verringert werden, auf der Ebene der Nutzenergie kann beispielsweise durch energetische Gebäudesanierungsmaßnahmen die Nachfrage nach Raumwärme reduziert werden und ein Wandel im Verbraucherverhalten kann auf

der Ebene der Energiedienstleistung eine Änderung induzieren. Klimaschutzmaßnahmen können daher in Abhängigkeit ihres Wirkungspunktes bzw. des Adressaten auf die verschiedenen Bereiche abzielen [60].

Neben der möglichen Reduktion des Endenergieverbrauchs und den damit einhergehenden CO₂-Einsparungen, kann jede Maßnahme wirtschaftlich bewertet werden. Die Einbeziehung der wirtschaftlichen Bewertung ermöglicht die Bestimmung der Effizienz von Maßnahmen durch Ermittlung der CO₂-Vermeidungskosten (vgl. Gleichung 18). Dabei sind C_{Maß} die Vollkosten der betrachteten Maßnahme und C_{Ref} die Vollkosten für den Referenzfall. CO_{2,Ref} sind die CO₂ Emissionen des Referenzfalls und CO_{2,Maß} sind die CO₂ Emissionen des betrachteten Versorgungsfalls nach Durchführung einer Maßnahme. Jede Maßnahme kann daher zum einen durch ein absolutes CO₂ Einsparpotenzial (CO_{2,Ref} – CO_{2,Maß}) und durch verursachte Differenz der Vollkosten (C_{Ref} – C_{Maß}), d. h. den damit einhergehenden Mehr- oder Minderkosten beschrieben werden. Damit werden die Auswirkungen der Einzelmaßnahmen einer Referenz bzw. dem Zustand ohne Umsetzung der Maßnahme gegenübergestellt. So kann z. B. für die Maßnahme „Erneuerung der Wärmebereitstellung“ der durchschnittliche Wärmemix (kg CO₂/kWh), oder für die „Nutzung einer PV-Anlage“ der Strombezug aus dem öffentlichen Stromnetz als Referenz dienen (vgl. Abschnitt Referenz).

Das Verhältnis zwischen CO₂-Einsparung und der Vollkostendifferenz dient dabei der techno-ökonomischen Analyse von Klimaschutzmaßnahmen und der Einordnung von Einzelmaßnahmen in einem gesamtheitlichen Kontext. Hierbei deuten negative spezifische CO₂- Minderungskosten auf eine besonders effiziente Maßnahme hin, mit dessen Umsetzung neben einer Reduktion der CO₂-Emissionen, auch eine kostenseitige Ersparnis erzielt werden kann.

$$\frac{C_{Maß} - C_{Ref}}{CO_{2,Ref} - CO_{2,Maß}} = \text{spez. Vermeidungskosten in } \frac{\text{€}}{t CO_2} \quad \text{Gleichung 18}$$

Referenz

Für die Referenz der Wärmeseite wird zwischen zwei Fällen von Betrachtungszeiträumen unterschieden: dem Bestand und Neubau. Das Referenzsystem für Bestandsbauten stellt im Bereich Wärme der Wärme-CO₂-Mix der untersuchten Region dar. Es wird dabei ein für Deutschland mittlerer Faktor von Endenergie zu Nutzenergie von 1,25 angenommen. Neben dem Nutzungsgrad des Wärmeerzeugers sind darin auch die Wärmeverteilungsverluste berücksichtigt, sodass 80 % der Endenergie in Nutzenergie umgewandelt werden können. Für Neubauten hingegen wird als Referenzsystem der effiziente Gas-Brennwertkessel gewählt. Neben einem verbesserten CO₂-Emissionswert (202 g CO₂/kWh gegenüber 239 g CO₂/kWh Wärmemix in Baden-Württemberg), fällt auch das Verhältnis aus Endenergie zu Nutzenergie mit 1,075 erheblich besser aus (ca. 93 % der eingesetzten Endenergie fallen als Nutzenergie an). Für die Stromseite wird sowohl für den Bestand als auch für den Neubau als Referenz der Bundesstrommix im Basisjahr 2012 (584 g CO₂/kWh) angesetzt und im Falle der Mobilität gilt als Vergleichswert ein Ausstoß von 129 g CO₂ je gefahrenen Kilometer [43].

Vollkostenberechnung

Die Berechnung der Vollkostenbetrachtung für die ökonomische Bewertung der Maßnahmen sowie der einzelnen Referenzen erfolgt in Anlehnung an die VDI 2067, d.h. es werden sowohl die Kostengruppen

der kapital-, bedarfs- und betriebsgebundene Kosten (ebenfalls sonstige Kosten) als auch die Erlöse in die Berechnung mit einbezogen. Übersteigt die technische Nutzungsdauer einer Maßnahme den Betrachtungszeitraum, so sind Restwerte bei der Vollkostenrechnung zu berücksichtigen. Umgekehrt sind Ersatzinvestitionen zu berechnen, wenn der Betrachtungszeitraum größer ist als die Nutzungsdauer einer Technologie einer Maßnahme. Entsprechend der Versorgungsaufgaben/-fälle wird in Abhängigkeit des Leistungsbedarfs bzw. der Jahresenergiemenge eine differenzierte Betrachtung der Energiepreise vorgenommen. Für andere Anwendungsfälle wurde das Verfahren analog übertragen.

Der Rahmen der Vollkostenbetrachtung stellt sich wie folgt dar. Der Zeithorizont umfasst 18 Jahre, wobei das Basisjahr 2012 und das Zieljahr 2030 vergleichend betrachtet werden. Die Berechnung des Kapitalwertes von Ein- und Auszahlungen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallen, setzt die Wahl eines internen Kalkulationszinssatzes voraus. Dabei wurden die internen Zinssätze in Abhängigkeit der durchführenden Akteure variiert. Für Haushalte wurde eine Abzinsung mit einer Quote von 3 % gewählt, während für den GHD-Sektor 8 % angenommen wurden. Die im Vergleich zum Haushaltssektor höher angesetzten Zinssätze für den GHD-Sektor sollen die unterschiedlichen Zeit- und Risikopräferenzen der Sektoren zum Ausdruck bringen. Dabei impliziert ein hoher Zinssatz eine hohe Zeitpräferenz und einen hohen Risikozuschlag für Investitionen. Beides ist für den wirtschaftlichen Sektor GHD im Vergleich zum Haushaltssektor als ausgeprägter anzunehmen. Investitionen, die die öffentliche Stadtverwaltung betreffen, werden mit 5 % abgezinst.

Im Weiteren werden für den Betrachtungszeitraum Preisänderungsfaktoren für die einzelnen Kostengruppen angenommen:

- Kapitalgebundene Kosten (z.B. Investitionsaufwendung): 1 %
- Bedarfsgebundene Kosten (z.B. Brennstoffkosten): 2 %
- Betriebsgebundene Kosten (z.B. Wartung): 1 %
- Erlöse: 1 %

Die angenommenen Energiepreise sind in Tabelle 46 zusammengefasst.

Tabelle 46: Energieträgerpreise

Basisjahr 2012	Private Haushalte Preis [EUR-ct/kWh]	GHD Preis [EUR-ct/kWh]	Quelle
Strom	26,36	13,77	[61]
Heizöl	8,89	8,89	[61]
Erdgas	7,13	4,58 / 7,13 ¹¹	[61]
Holz-Pellets	5,50	5,50	[62]
Flüssiggas	4,43	4,43	[63]
Kohle	5,88 ¹²	5,88 ¹²	[64]

¹¹ unterer Wert für zentrale Heizkraftwerke (z.B. Erdgas-BHKW), oberer Wert für dezentrale kleine Anlagen im GHD-Bereich

¹² bezieht sich auf Brikett-Preise im Jahr 2009, da danach keine Angaben mehr vorliegen

4.4.2 Durchdringungsraten zur Abbildung von Akzeptanz und Hemmnissen

Das vollständige Potenzial einer Klimaschutzmaßnahme spiegelt in dieser Studie das technische Potenzial wider. Hierbei werden soziale Rahmenbedingungen, Eigentümerstrukturen, Akteurspräferenzen, Risikoeinstellungen, Restnutzungsdauern¹³ nicht berücksichtigt, die die individuelle Investitionsentscheidung beeinflussen und damit das technische Potenzial verringern. Zudem bestehen Nutzungskonkurrenzen von Flächen und Technologien (z. B. die verfügbare Freifläche), die eine Ausschöpfung aller Potenziale gleichzeitig erschweren.

Um das Verhalten bzw. die Einstellung der Akteure des betrachteten Bilanzraums zu erfassen, wird eine Durchdringungsrate je Maßnahme implementiert. Durch Annahmen bzw. Vorgabe von jährlichen Durchdringungsquoten für einzelne Maßnahmen (beispielsweise eine Sanierungsrate 1 %/a mit entsprechender Sanierungstiefe) wird das CO₂ Einsparpotenzial deutlich reduziert. Diese impliziten Annahmen spiegeln wider, dass keine vollständige sofortige und vollständige Umsetzung der Maßnahmen stattfindet, obwohl dies aus volkswirtschaftlicher Sicht sinnvoll erscheint. Das Einsparpotenzial einer Maßnahme wird daher proportional auf den Wert der Durchdringungsrate reduziert. Die Durchdringungsrate stellt eine Obergrenze der Umsetzung des CO₂-Einsparpotenzials dar, die sich durch Berücksichtigung sogenannter weicher Faktoren ergibt. Im Allgemeinen kann die Durchdringungsrate einen Wert zwischen 1 und 0 annehmen, wobei 1 einer vollständigen Umsetzung des Maßnahmenpotenzials entspricht, sodass von keinen Akteurshemmnissen ausgegangen wird. Ein niedriger Wert hingegen deutet auf Akzeptanzschwierigkeiten bzw. Nutzungskonkurrenzen bei der Umsetzung der Maßnahme. Die Berücksichtigung der Ausprägung der Akteurshemmnisse bzw. Akzeptanzschwierigkeiten erfolgt auf Basis von Literaturwerten und Annahmen (vgl. Fallstudien in den Abschnitten 4.6.1.2 und 4.6.2.2).

Abbildung 49 stellt die Vorgehensweise der Potenzialminderung mithilfe der Durchdringungsraten dar.

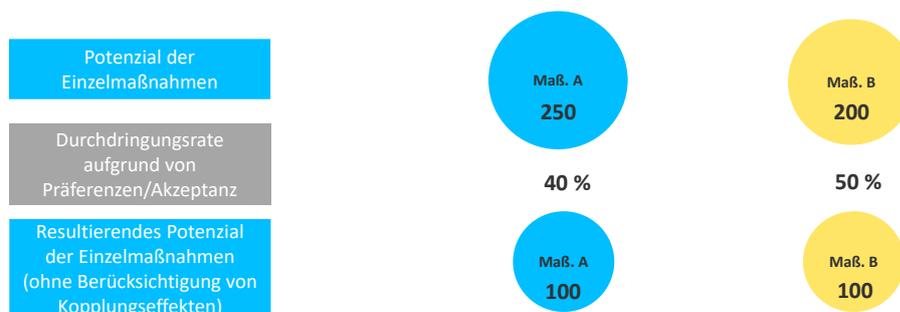


Abbildung 49: Potenzialkorrektur der Maßnahmen anhand der Durchdringungsraten

Maßnahme A (z. B. eine Maßnahme zur Gebäudesanierung) hat beispielhaft ein technisches Potenzial zur Einsparung von 250 t CO₂ und es wird erwartet, dass aufgrund von Hemmnissen nur 40 % dieses Potenzials gehoben werden können. Dieses Potenzial spiegelt die unter Berücksichtigung der Präferenzen und Risikoeinstellungen der Akteure erreichbare CO₂-Einsparung einer Einzelmaßnahme wider. Die absolute Höhe der Durchdringungsrate orientiert sich dabei an Literaturwerten, z. B. in

¹³ zur Disposition stehende Technologien haben ihre technische Lebensdauer noch nicht überschritten

diesem Falle anhand einer jährlichen Sanierungsrate von 1 % der Bestandsbauten. Damit können alle Maßnahmen entsprechend des Betrachtungszeitraums bewertet werden.

4.4.3 Berücksichtigung der Maßnahmenkopplung

Neben den Durchdringungsraten, die die Akteurspräferenzen und Risikoeinstellungen der Betrachter widerspiegeln, fließt zusätzlich der Zusammenhang der Wechselwirkungen zwischen den Einzelmaßnahmen in die Korrektur der Potenziale der Maßnahmen ein.

Die Effektivität einer Klimaschutzmaßnahme beschreibt das absolute Potenzial, der erzielbaren CO₂-Minderung. Unterschiedliche Maßnahmen können sich auf den verschiedenen Ebenen (z. B. auf der End- oder Nutzenergieebene) gegenseitig beeinflussen, sodass Überschneidungen bzw. gegenseitige Wechselwirkungen auftreten können. Dieser Fall kann eintreten, wenn mehrere Maßnahmen am gleichen Wirkungspunkt angreifen. Die Vernachlässigung dieser Wechselwirkungen zwischen Maßnahmen kann zu einer Fehleinschätzung des technischen Potenzials führen. Mögliche Wechselwirkungen können negativ ausfallen, was einer gegenseitigen Einschränkung bzw. Verringerung des Gesamteinsparpotenzials führt (z. B. eine Gebäudesanierung bei gleichzeitiger Heizungserneuerung), sie können jedoch auch positiv sein, was einer gegenseitigen Verstärkung der Einzelmaßnahmen entspricht (z. B. bei einer PV Nutzung und gleichzeitigem Speicherausbau). Zudem kann die Ausprägung der Wechselwirkungen vom Betrachtungsfall abhängig sein, wodurch Maßnahmenkombinationen auftreten können, die pauschal zunächst unbestimmt sind und sowohl positiv als auch negativ aufeinander Einfluss nehmen. Maßnahmen, die keiner Wechselwirkung unterliegen beeinflussen sich nicht gegenseitig, sodass das summierte Einsparpotenzial der Summe der Einzelpotenziale entspricht.

Um die gegenseitigen Wechselwirkungen der Einzelmaßnahmen, die in Kombination durchgeführt werden, zu erfassen, kann eine **Maßnahmenkopplungsmatrix** verwendet werden. In ihr wurden die Wechselwirkungen der Maßnahmen zum einen innerhalb einer Maßnahmenkategorie (z. B. im Bereich Gebäude) untereinander bewertet und zum anderen die Maßnahmenkategorien verschiedener Bereiche (Verkehr und Gebäude den übergreifenden Maßnahmen) gegenübergestellt werden. In einem ersten Schritt werden die qualitativen Zusammenhänge zwischen den Einzelmaßnahmen erarbeitet. In die Zellen der Kopplungsmatrix werden daraufhin an den Schnittstellen der jeweiligen Maßnahmen die positiven, negativen oder nicht vorhandenen Korrelationen untereinander markiert. Falls keine eindeutige Tendenz einer Wechselwirkung zwischen Maßnahmen erkennbar ist, wird dies ebenfalls in der Matrix gekennzeichnet. Abbildung 51 stellt durch die farbliche Kennzeichnung die qualitative Maßnahmenkopplung für die Einzelmaßnahmen untereinander dar. Um die Einschätzung der Wechselwirkungen unter den Maßnahmen zu vereinfachen werden, die Maßnahmen zu Gruppen zusammengefügt. Jeweils ähnliche Maßnahmen aber unterschiedlicher Ausprägungen (z. B. Energieberatung mit niedriger und hoher Umsetzung) werden zu jeweils einer Maßnahmengruppe zusammengefasst. Maßnahmen innerhalb der gleichen Gruppe verhalten sich identisch in Bezug auf den Einfluss auf Maßnahmen aus anderen Gruppen. Die Matrix stellt den Einfluss der Maßnahme in den Spalten auf die Maßnahme in den jeweiligen Zeilen dar.

Im Folgenden wird die Wirkweise der Maßnahmen untereinander in der Kopplungsmatrix anhand eines Ausschnittes aus dem Verkehrsbereich erläutert. Die beschriebenen quantifizierbaren Maßnahmen (V1 – V3) und die nicht quantifizierbaren Maßnahmen (V4 – V7) können einzeln wirken, oder in

Kombination auftreten. Hier muss beachtet werden, dass nicht alle Maßnahmen sich gegenseitig beeinflussen bzw. miteinander koppelbar sind. In der folgenden Abbildung 50 wird in grün qualitativ aufgezeigt, wo ein Kopplungspotenzial vorhanden ist.

Name		V-01	V-02	V-03	V-04	V-05	V-06	V-07
Stärkung Umweltverbund	V-01				∞	∞	∞	∞
Wechsel auf E-Fahrzeuge	V-02				∞		∞	
Carpooling im Pendlerverkehr	V-03				∞	∞		
Verkehrsaufklärung (Mobilitäts-Audit)	V-04	∞	∞	∞		∞	∞	
Verkehrserziehung	V-05	∞		∞	∞		∞	∞
Initiative Saubere Stadt/Kommune	V-06	∞	∞		∞	∞		∞
Bike-Sharing	V-07	∞				∞	∞	

Abbildung 50: Kopplung von Maßnahmen innerhalb des Verkehrsbereiches

In der Koppelmatrix im Verkehrsbereich sind folgende Beeinflussungseffekte berücksichtigt:

V-01 + V-04: Stärkung Umweltverbund + Verkehrsaufklärung (Mobilitäts-Audit): Als passive Maßnahme können mit Hilfe von Veranstaltungen und sonstiger Aufklärungsarbeit Tipps und Hilfen zum umweltschonenden Mobilitätsverhalten vermittelt werden um somit eine Reduktion der Fahrleistung im motorisierten Individualverkehr (MIV) zu erzielen. Eine Möglichkeit hierbei ist durch die Förderung der Bereiche ÖPNV, des Radverkehrs und des Fußgängerverkehrs eine Verlagerung des MIV auf den Umweltverbund zu schaffen.

V-01 + V-05: Stärkung Umweltverbund + Verkehrserziehung: Durch aktive Maßnahmen im Straßenverkehr, wie z.B. Umweltzonen, Feinstaubalarm, Fahrverbote oder Geschwindigkeitsdrosselungen kann das Mobilitätsverhalten in der Bevölkerung beeinflusst werden. Dies kann sich durch die Verlagerung der Fahrleistung im MIV auf die Bereiche ÖPNV, Radverkehr und Fußgängerverkehr (Umweltverbund) widerspiegeln.

V-01 + V-06: Stärkung Umweltverbund + Initiative Saubere Stadt/Kommune: Durch Kampagnen und Initiativen kann eine Förderung der Bereiche ÖPNV, Radfahrer und Fußgänger angestrebt werden und daraus resultierend eine Reduzierung des MIV-Anteils am Gesamtverkehrsaufkommen und somit eine Senkung der durch den Verkehr verursachte Emissionen erreicht werden.

V-01 + V-07: Stärkung Umweltverbund + Bike-Sharing: Durch die Förderung von Bike Sharing Angebote, insbesondere an Anknüpfungspunkten zum ÖPNV (Bahnhöfe, sonstige Umsteigepunkte), kann eine Verlagerung des MIV auf die kombinierenden Verkehrsmittel des ÖPNV und Radverkehr erfolgen.

V-02 + V-04: Wechsel auf E-Fahrzeuge + Verkehrsaufklärung (Mobilitäts-Audit): Als passive Maßnahme können mit Hilfe von Veranstaltungen und sonstiger Aufklärungsarbeit Tipps und Hilfen zum umweltschonenden Mobilitätsverhalten vermittelt werden um somit eine Reduktion der Fahrleistung im motorisierten Individualverkehr (MIV) zu erzielen. Eine Möglichkeit hierbei ist der Umstieg auf die CO₂ neutralere E-Mobilität.

V-02 + V-06: Wechsel auf E-Fahrzeuge + Initiative Saubere Stadt/Kommune: Informationskampagnen und Initiativen sollen auf die durch den konventionellen MIV verursachten Emissionsausstoß hinweisen und somit den Umstieg auf die CO₂ neutralere E-Mobilität anregen.

V-03 + V-04: Carpooling im Pendlerverkehr + Verkehrsaufklärung (Mobilitäts-Audit): Als passive Maßnahme können mit Hilfe von Veranstaltungen und sonstiger Aufklärungsarbeit Tipps und Hilfen zum umweltschonenden Mobilitätsverhalten vermittelt werden, um somit eine Reduktion der Fahrleistung im motorisierten Individualverkehr (MIV) zu erzielen. Eine Möglichkeit hierbei ist, durch die Erhöhung des Besetzungsgrades je Pkw, eine Einsparung der CO₂ Emissionen im Pendlerverkehr zu erzielen.

V-03 + V-05: Carpooling im Pendlerverkehr + Verkehrserziehung: Durch aktive Maßnahmen im Straßenverkehr, wie z.B. Umweltzonen, Feinstaubalarm, Fahrverbote oder Geschwindigkeitsdrosselungen kann ein verändertes Mobilitätsverhalten in der Bevölkerung stattfinden. Durch die Erhöhung des Besetzungsgrades je PKW wird die Gesamtanzahl der PKW reduziert und somit eine Einsparung der CO₂ Emissionen im Pendlerverkehr erreicht.

V-04 + V-05: Verkehrsaufklärung (Mobilitäts-Audit) + Verkehrserziehung: Als passive Maßnahme können mit Hilfe von Veranstaltungen und sonstiger Aufklärungsarbeit Tipps und Hilfen zum umweltschonenden Mobilitätsverhalten vermittelt werden um somit eine Reduktion der Fahrleistung im motorisierten Individualverkehr (MIV) zu erzielen. Eine Möglichkeit hierbei ist durch aktive Maßnahmen im Straßenverkehr, wie z.B. Umweltzonen, Feinstaubalarm, Fahrverbote oder Geschwindigkeitsdrosselungen, ein verändertes Mobilitätsverhalten in der Bevölkerung anzuregen.

V-04 + V-06: Verkehrsaufklärung (Mobilitäts-Audit) + Initiative Saubere Stadt/Kommune: Als passive Maßnahme können mit Hilfe von Veranstaltungen und sonstiger Aufklärungsarbeit Tipps und Hilfen zum umweltschonenden Mobilitätsverhalten vermittelt werden um somit eine Reduktion der Fahrleistung im motorisierten Individualverkehr (MIV) zu erzielen. Eine Möglichkeit hierbei ist eine Senkung der Emissionen durch verschiedene Kampagnen zu erzielen.

V-05 + V-06: Verkehrserziehung + Initiative Saubere Stadt/Kommune: Durch aktive Maßnahmen im Straßenverkehr, wie z.B. Umweltzonen, Feinstaubalarm, Fahrverbote oder Geschwindigkeitsdrosselungen, in Form von Informationskampagnen und Initiativen, findet ein verändertes Mobilitätsverhalten in der Bevölkerung und dadurch eine Senkung der Emissionen statt.

V-05 + V-07: Verkehrserziehung + Bike-Sharing: Durch aktive Maßnahmen im Straßenverkehr, wie z.B. Umweltzonen, Feinstaubalarm, Fahrverbote oder Geschwindigkeitsdrosselungen, in Form von Informationskampagnen und Initiativen, findet ein verändertes Mobilitätsverhalten in der Bevölkerung und dadurch eine Senkung der Emissionen statt. Im öffentlichen Raum oder an öffentlich zugänglichen Stationen kann dadurch das Angebot von Fahrrädern und Pedelecs häufiger genutzt werden.

V-06 + V-07: Initiative Saubere Stadt/Kommune + Bike-Sharing: Als passive Maßnahme können mit Hilfe von Veranstaltungen und sonstiger Aufklärungsarbeit Tipps und Hilfen zum umweltschonenden Mobilitätsverhalten vermittelt werden um somit eine Reduktion der Fahrleistung im motorisierten Individualverkehr (MIV) zu erzielen.

Nach qualitativer Abschätzung der Wechselwirkungszusammenhänge werden im zweiten Schritt die Wechselwirkungen der Einzelmaßnahmen quantifiziert. Die Wechselwirkungen betreffen i.d.R.¹⁴ die Energieeinsparpotenziale einer Maßnahme, die über einen CO₂-Emissionsfaktor mit den CO₂-Emissionen in Zusammenhang stehen. Die Kopplungen reduzieren oder erhöhen die mögliche Umsetzung des technischen Potenzials einer Maßnahme (vgl. Abschnitt 4.4.2). Die Qualität der Wechselwirkungen von Maßnahmen wird in einen Zahlenwert übersetzt. Die quantitative Ausprägung einer Wechselwirkung nimmt dabei für eine negative Kopplung Werte zwischen 0 und 1 an, beispielsweise entspricht ein Wert von 0,9 einer Reduktion des gekoppelten Potenzials von zwei Maßnahmen um 10 %. Positive Wechselwirkungen zwischen Maßnahmen werden mit einem Zahlenwert zwischen 1 und 2 gekennzeichnet, sodass ein Wert von 1,25 eine Verstärkung der umsetzbaren CO₂-Einsparungen einer Maßnahme um 25 % darstellt. Mit dem gewählten Ansatz kann auch eine Verknüpfung mehrerer gekoppelter Maßnahmen berücksichtigt werden (z. B. eine Erneuerung der Heizung bei gleichzeitiger Gebäudesanierung und einer Energieberatung). Das Schema der Funktionsweise wird anhand des Beispiels in Abbildung 51 erläutert.

Hier reduziert der Einsatz der Maßnahme 4 das Potenzial der Maßnahme 6 um 10 % und durch die Implementierung von Maßnahme 4 kann das umsetzbare Potenzial von Maßnahme 1 um 25 % gesteigert werden. Durch die Vorgabe eines maximalen Kopplungswertes in Höhe von 1,5 wird eine Obergrenze des möglichen verstärkenden Effektes implementiert. Ein Wert von 1 spiegelt wider, dass keine Kopplung und damit auch keine Korrektur der Potenziale der Maßnahmen stattfinden. Kopplungseffekte zwischen Maßnahmen, bei denen die eindeutige Tendenz des Einflusses nicht gegeben ist und fallspezifisch unterschiedlich ausfällt, werden nicht berücksichtigt und daher mit einem Wert von 1 implementiert. Die Quantifizierung erfolgt basierend auf einer Expertenschätzung jeweils in drei Abstufungen in die positive (1,1; 1,25; 1,5) und drei Stufen in negative Richtung (0,9; 0,75; 0,5). Zwei Maßnahmen müssen zudem nicht zwangsläufig durch symmetrische Wechselwirkungen miteinander gekoppelt sein. Am Beispiel in Abbildung 51 beeinflusst Maßnahme 6 das Potenzial von Maßnahme 4 negativ (-25 %), umgekehrt wird der negative Effekt auf Maßnahme 6 auf -10 % quantifiziert. Wirken auf eine Maßnahme mehrere Einflüsse aus unterschiedlichen Gruppen, so wird das Potenzial der entsprechenden Maßnahme nur um den maximalen Kopplungswert korrigiert. Beispielsweise wird in Abbildung 51 das Potenzial der Maßnahme 4 von Maßnahme 1 und 6 negativ beeinflusst (-10 % bzw. -25 %). Das Potenzial der Maßnahme 4 wird durch Berücksichtigung der negativen Wechselwirkungen um 25 % reduziert, da der Einfluss von Maßnahme 6 gegenüber Maßnahme 1 überwiegt. Gleiches gilt umgekehrt im Falle mehrerer positiver Kopplungseffekte von Maßnahmen, wobei in diesem Falle das Potenzial hier um den maximalen Wert nach oben korrigiert wird. Eine Summation der Wechselwirkungen findet somit nicht statt. Bei gleichzeitigem Auftreten einer positiven und negativen

¹⁴ Eine Ausnahme bildet G-38 Nutzung regeneratives Heizöl, wo die Einsparung nur auf Ebene der CO₂-Emissionen gegeben ist.

Wechselwirkung werden beide Kopplungen multiplikativ behandelt, sodass sich im Fall z. B. der Maßnahme 6 eine Reduktion um 1 % ($1 - 0.9 \cdot 1.1$) ergibt, im Falle einer Umsetzung aller Maßnahmen.

		Maßnahme 1	Maßnahme 2	Maßnahme 3	Maßnahme 4	Maßnahme 5	Maßnahme 6	Maßnahme 7
		Gruppe 1			Gruppe 2		Gruppe 3	
Maßnahme 1	Gruppe 1		1	1	1.25	1.25	1	1
Maßnahme 2		1		1	1.25	1.25	1	1
Maßnahme 3		1	1		1.25	1.25	1	1
Maßnahme 4	Gruppe 2	0.9	0.9	0.9		1	0.75	0.75
Maßnahme 5		0.9	0.9	0.9	1		0.75	0.75
Maßnahme 6	Gruppe 3	1.1	1.1	1.1	0.9	0.9		1
Maßnahme 7		1.1	1.1	1.1	0.9	0.9	1	

Legende

	keine Kopplung / keine eindeutige Tendenz
	negative Kopplung
	positive Kopplung

Abbildung 51: Kopplungsmatrix von Einzelmaßnahmen und Gruppen

Werden Maßnahmen in Kombination mit anderen Maßnahmen durchgeführt so ist diese Wechselwirkung mit der Durchdringungsrate (siehe Kapitel 4.4.2) zu berücksichtigen. Die Kopplungsfaktoren stellen daher einen Bestandteil der Potenzialkorrektur von Maßnahmen dar. Dabei erfolgt die Anpassung des technischen Potenzials der Maßnahmen in Summe zweistufig und wird über die sogenannte **kumulierte Durchdringungsrate** beschrieben. Die oben beschriebene Vorgehensweise zur Reduktion des technischen Potenzials einer Maßnahme über Implementierung von Durchdringungsrate bildet dabei die erste Stufe. Dieses resultierende Potenzial wird in einem zweiten Schritt um die negativen oder positiven Kopplungseffekte, verursacht durch die Wechselwirkungen unter den Einzelmaßnahmen, korrigiert. Dabei wird neben der Durchdringungsrate der maximale positive sowie der maximale negative auftretende Effekt auf eine Maßnahme berücksichtigt und mit der Durchdringungsrate (erste Stufe) multiplikativ verrechnet.

In Abbildung 52 wird das Beispiel der Durchdringungsrate von Kapitel 4.4.2 aufgegriffen, um die Integration der Kopplungseffekte in die Durchdringungsrate zu erläutern. Die schematische Darstellung der Einbindung der Durchdringungsrate sowie die hemmenden und synergetischen Effekte zwischen den Einzelmaßnahmen ist hier dargestellt. Dabei hat die Umsetzung der Maßnahme B in diesem Beispiel einen negativen Einfluss auf das Potenzial der Maßnahme A, sodass ein umsetzbares Einsparpotenzial von 50 t CO₂ übrigbleibt. Maßnahme B hingegen wird nicht direkt von A beeinflusst und kann zu 100 t CO₂-Einsparungen führen. Die kumulierte Durchdringungsrate beträgt daher für Maßnahme A 20 % ($0,4 \cdot 0,5$) und für Maßnahme B 50 % ($0,5 \cdot 1$) für den Fall, dass beide Maßnahmen parallel durchgeführt werden. Entschließt sich der Akteur hingegen auf Maßnahme B zu verzichten, so entfällt die negative Kopplung, die das umsetzbare Potenzial der Maßnahme A reduziert und durch Umsetzung dieser können 40 % ($0,4 \cdot 1$) des gesamten technischen Potenzials in diesem Bereich, was in Einsparungen in Höhe von 100 t CO₂ resultiert, erreicht werden.

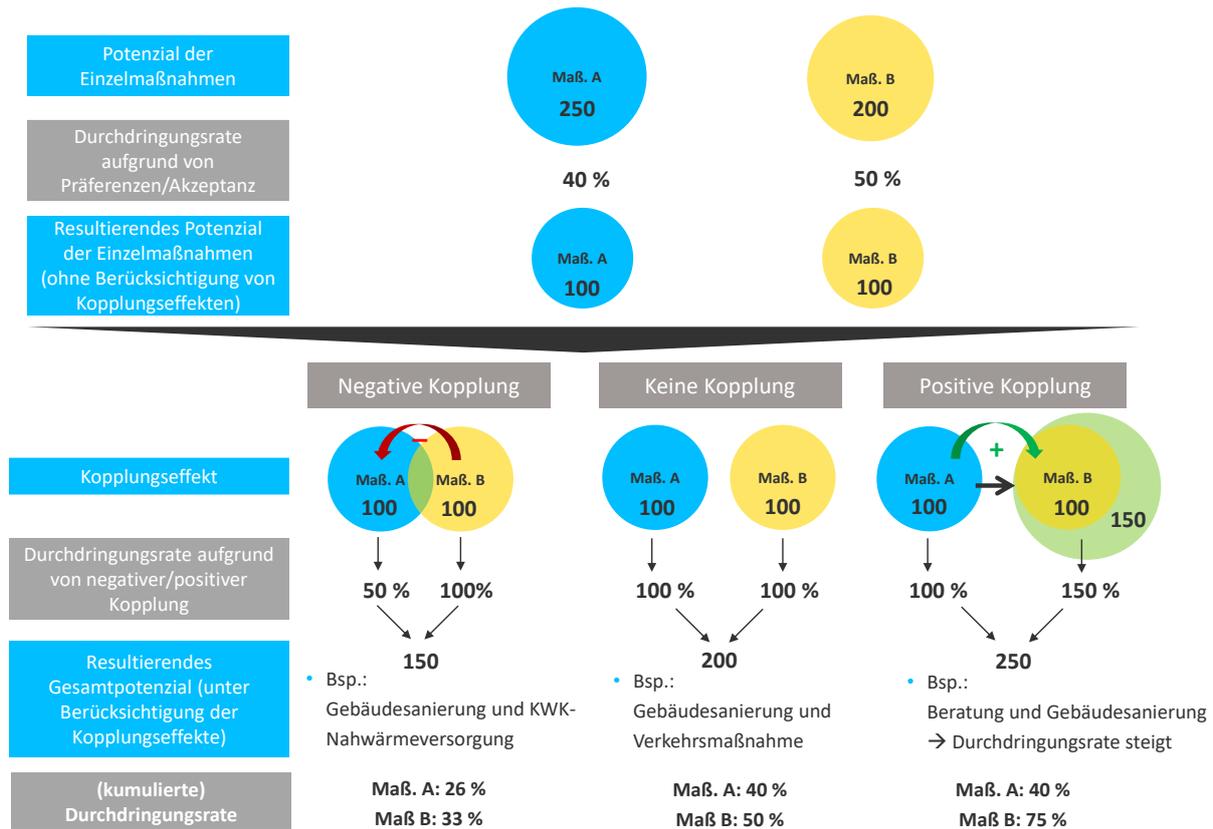


Abbildung 52: Potenzialkorrektur der Maßnahmen anhand der Durchdringungsraten und unter Berücksichtigung der gegenseitigen Wechselwirkungen

Somit wird für jede der entwickelten Maßnahmen eine kumulierte Durchdringungsrate bestimmt. Tabelle 67 bis Tabelle 70 im Anhang stellen eine Übersicht der Durchdringungsraten der einzelnen Maßnahmen für Gebäude unter Berücksichtigung der Akteurspräferenzen und Akzeptanz sowie der Kopplungseffekte für die beiden Fallstudien Metzgingen und Berlin TXL dar. Basierend auf der oben beschriebenen Methodik findet im letzten Schritt eine Korrektur der Maßnahmendurchdringung statt, falls inklusive Kopplung eine Durchdringungsrate über 100 % erreicht wird, um eine Überschätzung der absoluten technischen Potenziale der Maßnahmen zu vermeiden.

4.4.4 CO₂-Minderungskostenkurven für Klimaschutzmaßnahmen

CO₂-Minderungskostenkurven werden immer dann eingesetzt, wenn ein technisch ökonomisches Ranking verschiedenen Maßnahmen dargestellt werden soll. In Bezug auf die Bewertung der Klimaschutzmaßnahmen für Quartiere bedeutet dies, dass für die Umsetzung von CO₂-Vermeidungskostenkurven das Verhältnis der technischen Potenziale und der wirtschaftlichen Charakterisierung der Maßnahme gebildet wird. Hierfür werden die CO₂-Einsparpotenzial in Tonnen auf der horizontalen Achse über den CO₂-Minderungskosten auf der vertikalen Achse (vgl. Abbildung 53) aufgetragen. Zusätzlich werden die Maßnahmen aufsteigend nach den spezifischen CO₂-Minderungskosten je Tonne CO₂-Minderung, unabhängig vom gesamten CO₂-Einsparpotenzial einer Maßnahme, angeordnet.

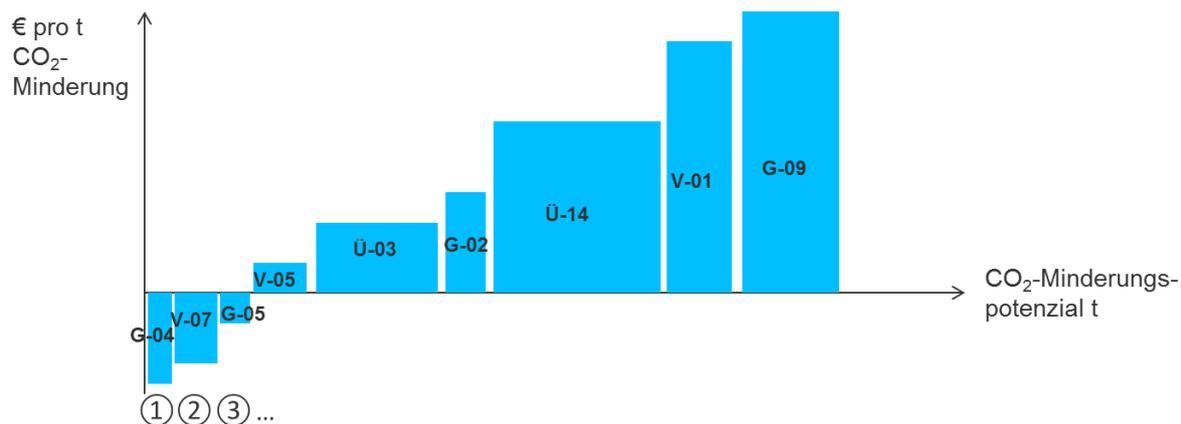


Abbildung 53: Schematisches Beispiel für eine CO₂-Minderungskostenkurve für Klimaschutzmaßnahmen mit ihren spezifischen CO₂-Minderungskosten [€/t] und ihrem CO₂-Minderungspotenzial [t]

4.5 Quantifizierung der CO₂-Minderungsmaßnahmen (Gebäude, Verkehr, übergreifend)

Im Folgenden wird die Berechnungsgrundlage der einzelnen Maßnahmen nach den Kategorien Gebäude, Verkehr und übergreifend vorgestellt.

4.5.1 Maßnahmen in Wohngebäude und Nichtwohngebäude

Die gebäudeseitigen CO₂-Minderungsmaßnahmen unterteilen sich in Maßnahmen für Wohngebäude und Nichtwohngebäude. Nicht-Wohngebäude werden zusätzlich in die drei Kategorien Gewerbe, Handel und Dienstleistung (GHD) eingeteilt. Auf die Betrachtung der Nichtwohngebäude in der Industrie wird verzichtet, da eine allgemeine Methodik zur möglichst genauen Energiebedarfsermittlung für diesen sehr heterogenen Sektor nicht durchführbar ist. Des Weiteren erfolgt für jedes der Wohn- und Nichtwohngebäude eine Unterscheidung in Bestands- und Neubauten. Sowohl für Wohn- als auch für Nichtwohngebäude ergeben sich Maßnahmenpakete an der Gebäudehülle (z.B. Sanierung der Gebäudehülle) als auch für die Bereitstellung von Nutzwärme, d.h. Maßnahmen an den Heizungssystemen (z. B. Erneuerung der Heizungsanlage). Neben wärmebezogenen Maßnahmen sind auch stromseitige Maßnahmen Bestandteil des Maßnahmenportfolios (z. B. Austausch Elektrogeräte). Flankierend zu den harten, quantifizierbaren Maßnahmen werden zudem weiche Maßnahmen wie z. B. Energieberatung berücksichtigt. Zusätzlich bestehen bei den Nichtwohngebäuden CO₂-Minderungsmaßnahmen hinsichtlich der Gebäudekühlung und Raumluftechnik, die jedoch Großteils auf Neubauten abzielen.

Die umfangreichen stündlichen Profile aller IWU-Baualtersklassen und Gebäudetypologie haben sich als zu komplex herausgestellt, um für das EN-Easy-Tool als Input genutzt werden zu werden. Daher werden Wohngebäude nur noch in die Kategorien Einfamilienhaus und Mehrfamilienhaus eingeteilt. Da die weitere Betrachtung auf Basis einer Jahresbilanz erfolgt, werden in den Maßnahmen und den dazugehörigen Templates die flächenbezogenen jährlichen Bedarfswerte verwendet. Es wird jedoch weiterhin in die unterschiedlichen Baualtersklassen des IWU unterschieden, siehe Abbildung 3.

Alle Maßnahme sind so aufbereitet, dass die wenige Inputs ausreichen, um zum einen den Energiebedarf eines betrachteten Gebiets hochzurechnen und zum anderen die Energieeinspar- und

Effizienzsteigerungsmaßnahmen sowie deren Kosten quantitativ zu berechnen. Folgende allgemeine Übersicht und die dazugehörigen Beschreibungen zeigen, welche Inputs benötigt werden und wie die einzelnen Gebäudemaßnahmen strukturiert sind:

- Anzahl der Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser je Altersklasse
- Fläche oder Anzahl des Neubaus Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser
- Anzahl Beschäftigter GHD oder m^2 GHD im betrachteten Gebiet (teilweise optional bekannter Verbrauch Strom / Wärme)
- Bundesland, in dem das betrachtete Gebiet liegt

Wohngebäude

Maßnahmen G-01 – 06: Sanierung der Gebäudehülle

Der Raumwärmebedarf von Wohngebäuden kann reduziert werden, indem die Transmissionsverluste durch die Gebäudehülle (Fenster, Dach, etc.) bzw. die Lüftungswärmeverluste gesenkt werden. Die Reduktion der Transmissionsverluste wird durch Maßnahmen der energetischen Modernisierung der Gebäudehülle erreicht, in dem die neuen Bauteile einen niedrigeren Wärmedurchgangskoeffizienten U [$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$] aufweisen. Es werden Teilsanierungen und Vollsanierungen unterschieden. Teilsanierungen umfassen die Maßnahmen G-01 Fenstersanierung, G-02 Dachsanierung, G-03 Außenwandsanierung, G-04 Sanierung unterste Geschossdecke / Decke unten. Bei den Vollsanierungen werden unterschiedliche Ausprägungen unterschieden: G-05 Gebäudesanierung komplett (Fenster, Dach Außenwand) und G-06 Gebäudesanierung erweitert (Fenster, Dach, Außenwand, unterste Geschossdecke, Wohnraumlüftungsgerät und Verbesserung der Infiltration). Zur Abschätzung der Energieeinsparung durch Sanierungsmaßnahmen in einer Modellregion werden neben der Anzahl der Wohngebäude, die nach Ein- und Mehrfamilienhäuser (EFH, MFH) differenziert werden, und der Wohnflächen, die Baualtersklassen benötigt, die aus Zensus-Daten hergeleitet werden [31]. Mit den Baualtersklassen hängen unterschiedliche energetische Gebäudestandards zusammen, so dass Kennwerte über die spezifischen Raumwärmebedarfe ($\text{kWh}/\text{m}^2 \text{a}$) vorliegen [3]. Im Weiteren unterscheiden sich die Bedarfe der Gebäudetypen EFH und MFH aufgrund des unterschiedlichen Verhältnisses von Oberfläche zu Volumen, so dass letztere geringere Wärmeverluste aufweisen. Jedoch sind EFH tendenziell mit einem besseren Dämmstandard ausgestattet, so dass die spezifischen Raumwärmebedarfe von MFH nicht zwingend geringer ausfallen müssen als die von EFH. Bereits erfolgte Gebäudesanierungen werden in den spezifischen Raumwärmebedarfen in Abhängigkeit der Baualtersklasse auf Basis von eigenen Annahmen und [21] berücksichtigt. Das Einsparpotenzial ergibt sich aus dem Delta zwischen dem Ist-Zustand (und bereits durchgeführter Sanierungen) und dem Maßnahmen-Zustand, wenn die Gebäudehülle aller Wohngebäude saniert werden würde. Um das Einsparpotenzial von Raumwärmebedarf (Nutzenergie) in Endenergie umzurechnen, wird eine für Deutschland durchschnittliche Aufwandszahl des Wärmeerzeugers von 1,25 angesetzt, womit 80 % der Endenergie als Nutzenergie zur Verfügung stehen (unter Berücksichtigung von Nutzungsgrad, Verteil- und Übergabeverlusten). Dies entspricht in etwa dem allgemeinen durchschnittlichen Wert der heute im Einsatz sich befindlichen Wärmeerzeugungstechnologien. Das CO_2 -Einsparpotenzial resultiert aus dem Wärme- CO_2 -Mix der Wärmebereitstellung eines Bundeslandes (z. B. Baden-Württemberg $0,246 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$). Die Kosten der einzelnen Sanierungsmaßnahmen werden als spezifische Mehrkosten

angesetzt [65], da davon ausgegangen wird, dass die übrigen Kosten als Sowiesokosten im Rahmen einer ohnehin fälligen Sanierung auch ohne diese Maßnahme angefallen wären.

Maßnahmen G-07 – 08: Erneuerung der Heizungsanlage

Der Endenergieverbrauch und damit verbundene CO₂-Emissionen können gesenkt werden, indem alte Heizungsanlagen durch neue, effiziente ausgetauscht werden. Es werden zwei Maßnahmen der Erneuerung einer Heizungsanlage unterschieden. In G-07 wird die bestehende Anlage gegen eine neue, dem derzeitigen Stand der Technik entsprechende, ausgetauscht. In G-08 wird zusätzlich ein Teil der benötigten Wärme durch Solarthermie bereitgestellt. Die Kosten für eine neue Heizungsanlage wurden für EFH auf 15.000 € und für MFH auf 20.000 € angesetzt. Da ein allgemeiner Austausch aus statistisch gesehen bei der Hälfte aller Anlagen vor dem Ende des technischen Lebenszyklus (kalkulatorische Lebensdauer: 25 Jahre) erfolgt, sind 50% der Kosten als Sowieso-Kosten und 50 % als "Investition in energetische Maßnahmen" angesetzt. Als Input sind die Anzahl der Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser je Altersklasse anzugeben. In Maßnahme G-07 wird die Einsparung durch eine Effizienzverbesserung bei Austausch der Heizungsanlage, bei Maßnahme G-08 zusätzlich durch den Einsatz einer Solarthermieanlage berechnet. Die Kosten werden anhand der Anzahl der zu sanierenden Gebäude aus entsprechenden Projekterfahrungen von Dress & Sommer je Ein- und Mehrfamilienhaus berechnet.

Maßnahme G-09: Erneuerung der Umwälzpumpe

Umwälzpumpen in Heizungsanlagen weisen das größte Stromeinsparpotenzial aller Elektrogeräte im Haushalt auf. So können durch eine Erneuerung der Heizungsumwälzpumpe bis zu 80 % des mit der Heizung verbundenen Verbrauchs eingespart werden. Während die meisten Pumpen in bestehenden Heizungssystemen dauerhaft mit voller Leistung arbeiten (unabhängig vom Heizenergieverbrauch), sind moderne Umwälzpumpen drehzahl geregelt und können ihre Leistung daher dem Heizwärmebedarf anpassen [56]. Als Input sind die Anzahl der Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser je Altersklasse anzugeben. Auf Grundlage eines Jahresstromverbrauchs für eine alte ungeregelte Umwälzpumpe und unter Annahme eines Jahresstromverbrauchs für eine neue geregelte Hocheffizienzpumpe wird die jährliche Energieeinsparung berechnet. Als Grundlage für die Kosten der Annahme werden repräsentativ die Investitions- und Installationskosten für eine Pumpe in einem Ein- und einem Mehrfamilienhaus angesetzt und auf dem Bilanzraum skaliert.

Maßnahme G-10: Hydraulischer Abgleich

Der hydraulische Abgleich des Heizsystems bewirkt eine gleichmäßige und effiziente Verteilung der Wärme in einem Gebäude, so dass der Wärmeerzeuger weniger Wärmeenergie bereitstellen muss. Die damit einhergehende Endenergieeinsparung führt zu einer Reduktion des CO₂-Ausstoßes der Heizung. Als Input sind die Anzahl der Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser je Altersklasse anzugeben. Es wird davon ausgegangen, dass durch einen hydraulischen Abgleich 7 % an Endenergie für die Heizwärme eingespart werden kann [66]. Die Kostenfunktion für einen hydraulischen Abgleich ist abgeleitet aus einer Exponentialfunktion aus [67] und basiert auf der beheizbaren Wohnfläche des Gebäudes.

Maßnahme G-11 – 12: Austausch der Elektrogeräte

Der Austausch alter Elektrogeräte durch moderne Elektrogeräte mit hoher Effizienzklasse (z. B. A+ oder höher) kann den Stromverbrauch in privaten Haushalten reduzieren. So kann der Anteil der Elektrohaushaltsgeräte etwa 70 % des Stromverbrauchs privater Haushalte betragen [56]. Als Input sind die Anzahl der Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser je Altersklasse anzugeben. Es wird angenommen, dass die Verwendung von effizienten Elektrogeräten 22 % an elektrischem Strom und bei ausschließlicher Verwendung von Elektrogeräten der Effizienzklasse A++ 47 % des elektrischen Stroms eingespart werden kann. Als Kosten sind durchschnittliche Kosten pro m² NGF hinterlegt, die von einer entsprechenden Neuausstattung mit effizienten Elektrogeräten abgeleitet sind.

Maßnahme G-13: Energieberatung

Die Energieberatung beeinflusst das Energieverbrauchsverhalten von privaten Haushalten positiv, so dass jeweils eine Einsparung von 5 % an Strom und Wärme durch Verhaltensänderung der Verbraucher unterstellt wird. Im Weiteren wirkt sich die Energieberatung positiv auf die Durchdringung von anderen Maßnahmen aus (z. B. Gebäudesanierung). Als Input sind die Anzahl der Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser je Altersklasse anzugeben. Pro Haushalt werden durchschnittlich 70 Euro für eine Energieberatung an Kosten angesetzt. Diese beziehen sich jedoch nur auf die Beratung, nicht auf Kosten für eine eventuelle Umsetzung von weiteren Maßnahmen durch die Beratung [68].

Maßnahme G-14: PV-Anlage

Erneuerbare, CO₂-neutrale Stromerzeugung auf den Dachflächen von Wohngebäuden leistet einen Beitrag zum Klimaschutz. Als Input sind die Anzahl der Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser je Altersklasse anzugeben. Über die Annahme einer für eine PV-Anlage nutzbaren Dachfläche wird der PV-Ertrag errechnet, der als jährliche Einsparung gegenüber der Referenz definiert wird. Die Kosten werden je kWp installierter PV-Anlage berechnet.

Maßnahme G-37: KfW 40 Effizienzhaus

Um den Heizenergiebedarf zu senken, wird bei Neubauten ein verbesserter Baustandard von KfW 40 statt KfW 70 angenommen. Hierbei ändert sich die spezifische Heizlast im Gebäude. Es wird zunächst der Heizenergiebedarf des KfW 70-Standardhauses berechnet um dieses anschließend mit dem des KfW 40-Standards zu vergleichen. In der Kostenberechnung werden die Mehrkosten für den Bau nach KfW 40-Standard betrachtet. Als Input sind die Anzahl der Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser je Altersklasse im Neubau oder die neu zu bauenden Flächen im Ein- und Mehrfamilienhaus anzugeben. Berechnet wird die Energieeinsparung bei Umsetzung der KfW 40 Anforderungen im Vergleich zu den KfW 70 Anforderungen im Neubau. Für die Kosten wird ein pauschaler Aufschlag von 75 € je m² angesetzt [4].

Maßnahme G-38: Regeneratives Heizöl

Die Nutzung von regenerativem Heizöl anstelle von herkömmlichem Heizöl dient dazu, die lokalen Netto-CO₂-Emissionen zu senken. Durch die Maßnahme kommt es zu keiner Energieeinsparung, sondern nur zu einer Verbesserung der CO₂-Bilanz. Als Input sind die Anzahl der Einfamilien- und

Mehrfamilienhäuser je Altersklasse anzugeben. Auf Grundlage der mittleren Durchdringung von Öl-Heizungen in Deutschland werden unter Annahme eines reduzierten CO₂-Ausstoßes je kWh Heizöl mit Bioanteil direkt die reduzierten CO₂-Emissionen ausgerechnet. Für den Einsatz von Heizöl mit Bioanteil wird ein Kostenaufschlag von 15 % gegenüber konventionellem Heizöl angenommen.

Nichtwohngebäude

Maßnahme G-15 – 16: Gebäudesanierung

Analog zur energetischen Modernisierung von Wohngebäuden ergibt sich auch bei Sanierungsmaßnahmen von Nichtwohngebäuden eine Reduktion des Raumwärmebedarfs. Ein Unterschied besteht in der Ermittlung des Raumwärmebedarfs. Aufgrund der heterogenen Nutzungsstruktur von Nichtwohngebäuden wird der Wärmebedarf nicht basierend auf Typologien, gebäudebezogenen Kennzahlen und der daraus hergeleiteten Nettogeschossfläche ermittelt. Stattdessen wird die Nettogeschossfläche aus den Beschäftigtenzahlen berechnet [35]. Eingabe der Anzahl der jeweiligen Beschäftigten der Bereiche Gewerbe, Handel, Dienstleistung oder der jeweiligen Fläche im Gewerbe, Handel, Dienstleistung. In der Maßnahme werden zwei Sanierungsstufen für Nicht-Wohngebäude im Bestand abgebildet, eine einfache Sanierung (Fenster, Dach, Außenwand) und eine komplette Sanierung (zuzüglich RLT-Anlage mit Wärmerückgewinnung). Die Kosten werden aus bestehender Literatur abgeleitet [65].

Maßnahme G-17 + 18 + 21: Energieberatung

Durch eine energetische Optimierung im Gebäude kann der Energieverbrauch reduziert werden. Dies kann im Rahmen einer Energiedienstleistung, einer Betriebsoptimierung oder einer Energieberatung, jeweils in verschiedenen Ausprägungen, stattfinden. Ausgehend vom IST-Zustand werden das Einsparpotenzial und die Kosten abgeschätzt. Eingabe der Anzahl der jeweiligen Beschäftigten der Bereiche Gewerbe, Handel, Dienstleistung oder der jeweiligen Fläche im Gewerbe, Handel, Dienstleistung. Für unterschiedliche Beratungsmaßnahmen, die sich in der Beratungstiefe und den Kosten unterscheiden, werden hier die Einsparpotenziale berechnet. Die prozentualen Einsparungen (Energieaudit ca. 11 %, Energieberatung ca. 25 %, Betriebsoptimierung ca. 22 %) und die Kosten dafür (Energieaudit ca. 5.000 €/Betrieb, Energieberatung ca. 10.000 €/Betrieb, Betriebsoptimierung ca. 10.000 €/Betrieb) sind aus entsprechenden Projekterfahrungen von Dress & Sommer abgeleitet.

Maßnahme G-23 + 27 + 28: Erneuerung der Wärme- und Kältebereitstellung

Durch die Erneuerung der Anlagentechnik ergeben sich neue Aufwandszahlen für das wärmeseitige Energieversorgungssystem. Dies hat zur Folge, dass die Umwandlungsverluste von Nutz- zu Endenergie sinken. Somit wird im System ein besserer Gesamtwirkungsgrad erreicht. Das Einsparpotenzial wird hierbei mit Hilfe einer prozentualen Abnahme (statistischer Mittelwert) des Energieverbrauchs abgeschätzt (Erneuerung Wärmeerzeuger: ca. -15 %, Erneuerung Wärme- bzw. Kälteverteilung ca. -10%, Erneuerung der Wärme- bzw. Kälteübergabe ca. -20 %). Neben der Wärmeerzeugung können durch Modernisierung der Wärmeverteilung und -übergabe Einsparpotenziale auf der Wärmeseite gehoben werden. Im Weiteren führt die Modernisierung der Kälteverteilung und -übergabe zur Reduktion des für die Kältebereitstellung erforderlichen Strombedarfs. Als Input wird die Anzahl der jeweiligen Beschäftigten der Bereiche Gewerbe, Handel, Dienstleistung oder die jeweiligen Flächen im

Gewerbe, Handel, Dienstleistungssektor verwendet. In den Maßnahmen wird die Auswirkung einer Modernisierung jeweils des Wärmeerzeugers, der Wärme- bzw. Kälteverteilung sowie der Wärme- und Kälteübergabe berechnet.

Maßnahme G-24: PV-Anlage

Die Anwendung einer PV-Anlage zur gebäudeinternen Stromproduktion dient zur Senkung des Strombezugs und zur Erzeugung von erneuerbarem, CO₂-neutralen Strom. Ausgehend von der Nettogeschossfläche und Dachflächenfaktoren werden das Dachflächenpotenzial und der Ertrag der PV-Anlage abgeschätzt. Die Anzahl der Beschäftigten in den Bereichen Gewerbe, Handel, Dienstleistung oder die jeweils genutzten Flächen im Gewerbe, Handel, Dienstleistungssektor dienen als Grundlage für die Berechnung der nutzbaren Dachflächen. Auf dieser Grundlage werden für die PV-Nutzung elektrische Erträge errechnet, die als Einsparung betrachtet werden. Die Kosten werden je kWp installierter PV-Anlage berücksichtigt [69].

Maßnahme G-25: Erneuerung der Umwälzpumpe

Der Austausch der Umwälzpumpen von Heizungsanlagen führt zu einer Reduktion des Strombedarfs (vgl. G-09). Als Input wird die Anzahl der jeweiligen Beschäftigten der Bereiche Gewerbe, Handel, Dienstleistung oder die jeweiligen Flächen im Gewerbe, Handel, Dienstleistungssektor verwendet. Nach DIN V 4701-10 wird ein Energiebedarf für Strom in Abhängigkeit der Nutzfläche berechnet. Es wird dann von einer Einsparung für den Pumpenstrom von 80 % bei Einsatz einer geregelten Hocheffizienzpumpe angenommen. Für die Kosten wird ein auf Kostenfunktionen basierender Wert aus der Literatur von 5.000 EUR je 11.500 m²NGF angenommen [67].

Maßnahme G-26: Hydraulischer Abgleich

Durch die Optimierung des Heizungssystems mit Hilfe des hydraulischen Abgleichs können die Verluste in Wärmeversorgungsleitungen reduziert werden, wodurch wiederum die Effizienz der Anlage steigt (vgl. G-10). Die Anzahl der Beschäftigten in den Bereichen Gewerbe, Handel, Dienstleistung oder die jeweils genutzten Flächen im Gewerbe, Handel, Dienstleistungssektor dienen als Grundlage für die Berechnung. Als Einsparpotenzial für Wärme wird wie bei Wohngebäuden 7 % angenommen [66]. Die Kosten für einen hydraulischen Abgleich sind aus Preiskurven abgeleitet und betragen im Mittel etwa 1,25 EUR/m².

Maßnahme G-29: Regeneratives Heizöl

Die Nutzung von Regenerativem Heizöl anstelle von reinem Heizöl dient dazu, die Netto-CO₂-Emissionen zu senken. In dem Template wird jeweils der Endenergiebezug ermittelt, und in den Kosten verglichen. Durch die Maßnahme kann von keiner direkten Energieeinsparung ausgegangen werden, sondern lediglich davon ausgegangen werden, dass sich die CO₂-Bilanz verbessert. Auf Grundlage der mittleren Eingabe der Anzahl der jeweiligen Beschäftigten der Bereiche Gewerbe, Handel, Dienstleistung oder der jeweiligen Fläche im Gewerbe, Handel, Dienstleistung. Durchdringung von Öl-Heizungen in Deutschland werden unter Annahme eines reduzierten CO₂-Ausstoßes je kWh Heizöl mit Bioanteil direkt die reduzierten CO₂-Emissionen ausgerechnet. Für den Einsatz von Heizöl mit Bioanteil wird ein Kostenaufschlag von 15 % gegenüber konventionellem Heizöl angenommen.

Maßnahme G-30 – G33: Optimierung im Neubau

Im Folgenden werden einige Maßnahmen, welche ausschließlich im Neubau möglich sind, aufgegriffen:

- Nutzung regenerativer Wärmesenken zur Reduzierung des Kältebedarfs (z. B. Erdsonden)
- Bau nach Green-Building-Gesichtspunkten
- Einsatz von Niedertemperatur-Flächenheizungen
- Einsatz von geregelter natürlicher Lüftung statt RLT

Durch regenerative Wärmesenken (z. B. Erdsonden) kann der Kältebedarf CO₂-neutral gedeckt werden. Der Bau nach Green-Building-Gesichtspunkten, also im Sinne der Nachhaltigkeit, bewirkt aufgrund eines verbesserten Neubaustandards eine Reduzierung des Endenergieverbrauchs von Strom, Wärme und Kälte um 35 %. Durch den Einsatz von Niedertemperatur-Flächenheizungen werden durch geringere Verluste bei der Wärmeübertragung ca. 10 % eingespart. Durch die Nutzung von geregelter natürlicher Lüftung kann der Stromverbrauch der Raumluftechnik um ca. 50 % reduziert werden. Durch Eingabe der Anzahl der jeweiligen Beschäftigten der Bereiche Gewerbe, Handel, Dienstleistung oder der jeweiligen Fläche im Gewerbe, Handel, Dienstleistung für den Neubau wird die Maßnahme quantifiziert. Es werden unterschiedliche Optimierungen des Neubaus gegenüber einem konventionellen Neubau betrachtet. Dazu gehören die Deckung des Kältebedarfs über regenerative Wärmesenken, eine optimierte Planung mit besonderer Berücksichtigung von Green-Building-Merkmalen, der Einsatz von effizienten Niedertemperatur-Flächenheizungen sowie die Nutzung von natürlicher Lüftung anstelle einer maschinellen Belüftung. Zu den einzelnen Maßnahmen sind jeweils Annahmen zur Energieeinsparung und den Kosten aus Projekten abgeleitet.

Maßnahme G-34: Energiemonitoring- und Energieregelkonzept

Der Aufbau eines Monitoringkonzeptes dient zur Überwachung der Verbräuche (Strom, Wärme, Kälte) und zur anschließenden Optimierung des Betriebs. Es wird dabei ein Optimierungsfaktor von 0,9 angesetzt. Als Input wird die Anzahl der jeweiligen Beschäftigten der Bereiche Gewerbe, Handel, Dienstleistung oder die jeweiligen Flächen im Gewerbe, Handel, Dienstleistungssektor verwendet. In der Maßnahme wird davon ausgegangen, dass für Gebäude im Bereiche GHD ein Energiemonitoring- und Energieregelkonzept aufgesetzt wird, wodurch die Energieeffizienz erhöht sowie Energie eingespart werden kann. Annahmen zur Einsparpotenzialen und Kosten sind aus Projekterfahrungen abgeleitet.

Maßnahme G-35 – 36: Optimierung des Kühlbedarfs

Es werden verschiedene Maßnahmen zusammengefasst, die zur Senkung des Kühlbedarfs im Bestand und in Neubauten dienen. Zum einen wird die Energieeinsparung bei der Kühlung durch die Optimierung des außenliegenden Sonnenschutzes abgebildet und zum anderen durch eine aktive Nachtlüftung. Die Kosten wurden aus Angaben vom IWU und aus eigenen Projekterfahrungen abgeleitet [58]. Die Anzahl der Beschäftigten der Bereiche Gewerbe, Handel, Dienstleistung oder der jeweiligen Fläche im Gewerbe, Handel, Dienstleistung bilden die Grundlage für die Quantifizierung der Maßnahme.

In den folgenden Tabellen sind die Kostenansätze zusammenfassend aufgeführt. Es wird darauf hingewiesen, dass alle Kostenansätze inkl. 19 % Mehrwertsteuer, also **brutto** zu betrachten sind.

Tabelle 47: Übersicht der Kosten der betrachteten Maßnahmen

Maßnahme	Name	Bezug Kosten	Gesamtkosten	Mehrkosten nur energetische Verbesserung	Bemerkung
G01	Sanierung Fenster	m ² Bauteil	400 EUR/m ²	50 EUR/m ²	
G02	Sanierung Dach	m ² Bauteil	225 EUR/m ²	60 EUR/m ²	
G03	Sanierung unterste Geschossdecke	m ² Bauteil	30 EUR/m ²	30 EUR/m ²	
G04	Sanierung Außenwand	m ² Bauteil	123 EUR/m ²	50 EUR/m ²	
G05	Sanierung Standard	m ² Bauteil	748 EUR/m ²	160 EUR/m ²	
G06	Sanierung Erweitert	m ² Bauteil	748 EUR/m ²	160 EUR/m ²	+ 80 EUR/m ² Wohnfläche für Lüftung
G07	Erneuerung Heizkessel	Gebäude	EFH 15.000 EUR/ MFH 20.000 EUR	EFH 15.000 EUR/ MFH 20.000 EUR	Anteilig je Verhältnis durchschnittliches Alter Anlage je Bundesland
G08	Erneuerung Heizkessel + Solar	m ² je Gebäude	Kosten G08 + 0,07*Wohnfläche*800EUR	Kosten G08 + 0,07*Wohnfläche*800EUR	
G09	Tausch Umwälzpumpen	Gebäude	741,52 EUR/EFH und 1004,90 EUR/MFH	741,52 EUR/EFH und 1004,90 EUR/MFH	
G10	Hydraulischer Abgleich	m ² je Gebäude	nach Kostenfunktion , siehe Templates	nach Kostenfunktion , siehe Templates	
G11	Elektrogeräte nicht alle A++	m ² NGF	42,63 EUR/m ²	42,63 EUR/m ²	
G12	Elektrogeräte A++	m ² NGF	42,63 EUR/m ²	42,63 EUR/m ²	
G13	Energieberatung	Gebäude	70,00 EUR	70,00 EUR	
G14	Nutzung PV-Anlage	kWp	1200 EUR/kWp	1200 EUR/kWp	EFH pauschal 15 m ² nutzbare Dachfläche, MFH pauschal 30 m ²
G37	Verbesserter Neubaustandard	m ² NGF	Gesamtkosten nicht quantifizierbar	75 EUR/m ²	hier nur Mehrkosten ausgewiesen, Gesamtkosten nicht möglich
G38	Nutzung regeneratives Heizöl	Endenergie Wärme	15 % Aufschlag zu normalem Heizöl	15 % Aufschlag zu normalem Heizöl	hier: 0,0072 EUR/kWh

Maßnahme	Name	Bezug Kosten	Gesamtkosten	Mehrkosten nur energetische Verbesserung	Bemerkung
G15	Sanierung NWG einfach	m ² Bauteil	400 EUR/m ² + 225 EUR/m ² + 123 EUR/m ²	400 EUR/m ² + 60 EUR/m ² + 50 EUR/m ²	vgl. G05
G16	Sanierung NWG komplett	m ² Bauteil	400 EUR/m ² + 225 EUR/m ² + 123 EUR/m ² + 30 EUR/m ²	400 EUR/m ² + 60 EUR/m ² + 50 EUR/m ² + 30 EUR/m ²	vgl. G06, '+ 80 EUR/m ² Wohnfläche für Lüftung
G17	Energieaudit	Betrieb	5000 EUR/Betrieb	5000 EUR/Betrieb	
G19	Betrieboptimierung	Betrieb	10000 EUR/Betrieb	10000 EUR/Betrieb	
G21	Energieberatung	Betrieb	10000 EUR/Betrieb	10000 EUR/Betrieb	
G23	Erneuerung Heizungsanlage	kW- Heizleistung	100 EUR/kW	100 EUR/kW	
G24	PV-Anlage	kWp	1200 EUR/kWp	1200 EUR/kWp	50 % der Dachfläche nutzbar
G25	Tausch Umwälzpumpen	m ² NGF	5000 EUR/11500 m ²	5000 EUR/11500 m ²	
G26	Hydraulischer Abgleich	m ² NGF	1,25 EUR/m ²	1,25 EUR/m ²	
G27	Sanierung Wärme- /Kälteverteilung	m ² NGF	200 EUR/m ²	200 EUR/m ²	
G28	Sanierung Wärme- /Kälteübergabe	m ² NGF	50 EUR/m ²	50 EUR/m ²	
G29	Bezug regeneratives Heizöl	Endenergie Wärme	15 % Aufschlag zu normalem Heizöl	15 % Aufschlag zu normalem Heizöl	hier: 0,0072 EUR/kWh
G30	Nutzung regenerativer Wärmesenken	€/kW_Endenergie	800 EUR/kW	800 EUR/kW	
G31	Bau nach Green-Building-Gesichtspunkten	m ² NGF	Gesamtkosten nicht quantifizierbar	75 EUR/m ²	Mehrkosten zu "normalem" Neubau
G32	Einsatz von Niedertemperatur Flächenheizungen	Anzahl Gebäude	Gesamtkosten nicht quantifizierbar	30 EUR/m ²	
G33	Einsatz von geregelter natürlicher Lüftung statt RLT	m ² NGF	Vollkosten für Steuer- und Regelung	60 EUR/m ²	
G34	Einrichtung eines Monitoring- und Steuerkonzepts	Anzahl Gebäude	30000 EUR pro Gebäude	30000 EUR pro Gebäude	
G35	Optimierung des außenliegenden Sonnenschutzes	m ² Fenster	35 EUR/m ²	35 EUR/m ²	Kosten für Sonnenschutz
G36	Reduzierung des Kältebedarfs durch aktive Nachtlüftung (ggf. inkl. BTA)	m ² NGF	30 EUR/m ²	30 EUR/m ²	pauschaler Aufschlag

Tabelle 48: Übersicht der Kosten der betrachteten Maßnahmen – Datenquellen

Maßnahme	Datenquelle
G01	Abgeleitet aus: Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Wohngebäuden, BMVBS-Online-Publikation Nr. 07/2012
G02	Abgeleitet aus: Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Wohngebäuden, BMVBS-Online-Publikation Nr. 07/2012
G03	Abgeleitet aus: Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Wohngebäuden, BMVBS-Online-Publikation Nr. .07/2012
G04	Abgeleitet aus: Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Wohngebäuden, BMVBS-Online-Publikation Nr. 07/2012
G05	Abgeleitet aus: Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Wohngebäuden, BMVBS-Online-Publikation Nr. 07/2012
G06	Abgeleitet aus: Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Wohngebäuden, BMVBS-Online-Publikation Nr. 07/2012
G07	Annahmen aus Erfahrung und Benchmarks abgeleitet
G08	Annahmen aus Erfahrung und Benchmarks abgeleitet + Zuschlag für Solarthermie
G09	Abgeleitet aus Kostenrecherchen
G10	Abgeleitet aus Kostenrecherchen Investitionsfunktionen TGA; Jagnow, Kati, Sell, Ingo, Wolff, Dieter
G11	Abgeleitet aus durchschnittlicher Haushaltsausstattung und Erneuerungskosten
G12	Abgeleitet aus durchschnittlicher Haushaltsausstattung und Erneuerungskosten
G13	Annahme Kosten für ca. 1 Stunden Beratung
G14	Systemkosten PV
G37	Mehrkosten, Quelle IWU 2016
G38	Eigene Preisrecherchen
G15	Abgeleitet aus: Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Wohngebäuden, BMVBS-Online-Publikation Nr 07/2012
G16	Abgeleitet aus: Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Wohngebäuden, BMVBS-Online-Publikation Nr 07/2012
G17	Eigene Annahmen aus Projekterfahrung abgeleitet
G19	Eigene Annahmen aus Projekterfahrung abgeleitet
G21	Eigene Annahmen aus Projekterfahrung abgeleitet
G23	Abgeleitet aus Recherchen und Preiskurven
G24	Systemkosten PV
G25	Abgeleitet aus Kostenrecherchen
G26	Abgeleitet aus Recherchen und Preiskurven
G27	Eigene Annahmen aus Projekterfahrung abgeleitet
G28	Eigene Annahmen aus Projekterfahrung abgeleitet
G29	Eigene Preisrecherchen
G30	Kosten für Erdsonden umgelegt
G31	Eigene Annahmen aus Projekterfahrung abgeleitet
G32	Eigene Annahmen aus Projekterfahrung abgeleitet
G33	Eigene Annahmen aus Projekterfahrung abgeleitet
G34	Eigene Annahmen aus Projekterfahrung abgeleitet
G35	Eigene Annahmen aus Projekterfahrung abgeleitet
G36	Eigene Annahmen aus Projekterfahrung abgeleitet

4.5.2 Maßnahmen im Verkehrssektor

Die räumliche Abgrenzung des Verkehrsmodells basiert auf der Einteilung der BBSR-Raumtypen. Die Datengrundlage der verkehrlichen Parameter ist der MID 2008 Studie entnommen. [10, 11]. Als Berechnungsgrundlage für die CO₂-Emissionen und Kosten wird ein konventionelles Mittelklasse-Fahrzeug eingesetzt. Die technischen Eigenschaften sind in Anhang B gegeben. Für die Verkehrsmaßnahmen werden auf Basis der BBSR Raumtypen sowie der MID Daten der anfallenden Fahrleistung, die damit einhergehenden CO₂-Emissionen, die Anzahl der eingesetzten Pkw, sowie die Kosten zur Bereitstellung der Mobilität bestimmt. Zudem erfolgt die Berechnung der im Bilanzraum anfallenden Verkehrsnachfrage nach Aufteilung auf die Bereiche Wohnbevölkerung und dem Arbeits- und Ausbildungsverkehr. Für beide Bestandteile wird der IST-Zustand 2016 sowie der Maßnahmenzustand 2030 separat bestimmt. Eine Übersicht der Angaben für die verwendeten Eingangsgrößen für die Berechnung des Wohn-, Arbeits- und Ausbildungsverkehr der 9 BBSR Raumtypen ist in Anhang B dargestellt.

V-01 Stärkung des Umweltverbundes

Für Maßnahmen zur Stärkung der Modal Split Anteile des ÖPNV, des Radverkehrs und des Fußgängerverkehrs wird eine Reduzierung des konventionellen MIV für jeden Raumtyp angenommen. Durch die Umsetzung der Maßnahme ist eine Reduzierung der CO₂ Emissionen in der jeweiligen Kommune bis 2030 möglich. Die Berechnung des CO₂-Ausstoßes im Ist-Zustand entspricht dem Produkt der Fahrleistungen (siehe Methodik in Kapitel 2.2) und den spezifischen Emissionen je gefahrenen Kilometer. Die Einsparung ergibt sich aus der Reduktion der gefahrenen Kilometer.

Für jeden übergeordneten Raumtyp (Agglomerationsraum, Verstädterter Raum, Ländlicher Raum) wurde eine mögliche Reduzierungsspanne der konventionellen MIV Anteile am Modal Split erarbeitet. Grundlage hierfür waren zahlreiche kommunale Verkehrsentwicklungspläne und Verkehrskonzepte, die entsprechend des Raumtyps und ihren angestrebten Planungen und Zielsetzungen bis 2030 untersucht und zusammengefasst wurden (vgl. Anlage B). In Agglomerationsräumen hochverdichteter Räume findet man z.B. die Förderung für den Bereich ÖPNV, von Bike & Ride sowie die Gestaltung einer generellen Mitnahmemöglichkeit von Fahrrädern. Im Ländlichen Raum, in ländlichen Kreisen höherer Dichte liegt der Fokus beispielsweise in der Einrichtung von ZOB's. Entsprechend der Möglichkeiten durch die verkehrliche Infrastruktur ergeben sich unterschiedliche verkehrliche Potenziale für die jeweiligen Räume. Dies spiegelt sich auch in den an Verkehrskonzepten der Kommunen wieder.

Kernstädte haben ein größeres Potenzial bei den Umsteigemöglichkeiten. Die ländlichen Kreise haben hier weniger Potenzial, da ein Ausbau der Netze oft schwierig zu realisieren ist, bzw. gegenüber dem MIV nur geringfügige Vorteile bietet. Es wird angenommen, dass für Agglomerationsräume Reduzierungen des MIV Anteils am Modal Split von 5-10% möglich sind. Für verstädterte Räume werden Reduzierungen des MIV Anteils am Modal Split von 4-9% angenommen. Für ländliche Räume werden Reduzierungen des MIV von 1-5% angenommen (siehe Kap. 2.3.1.2).

Im Allgemeinen kann die Reduktion des MIV Anteils am Modal Split auf unterschiedliche Weise erfolgen. Möglich sind beispielsweise eine Ausweisung von zusätzlichen Radfahr- oder Schutzstreifen oder ein genereller Ausbau der Straßenbahninfrastruktur. Für die Maßnahme Umweltverbund können

daher keine expliziten Kosten ausgewiesen werden, da Verlagerungsprozesse sehr stark von lokalen Gegebenheiten abhängen und eine Quantifizierung ohne fallspezifische Detailanalyse nicht möglich ist.

V-02 Wechsel auf E-Mobilität

Durch eine verstärkte Nutzung von E-Mobilität wird eine Verringerung der konventionell angetriebenen Pkw zugunsten der ausstoßfreien E-Mobilität erreicht (anfallende Emissionen bei der Produktion wurden nicht berücksichtigt).

Anhand von literaturgestützten Prognosen bezüglich der Entwicklung der Elektromobilität im Pkw-Verkehr und politisch ausgegebenen Zielen werden drei Ziel-Szenarien (Szenario 1, Szenario 2, Szenario Fokus) neben dem Status Quo Szenario (vgl. Kap.2.3.1.2) als erreichbare Ziele für Kommunen entwickelt.

Dem Status Quo Szenario liegt der bestehende Anteil des Elektro-Kfz-Bestands auf Daten des Kraftfahrtbundesamtes (KBA) zu Grunde [12]. Mittels einer linearen Fortschreibung dieses Anteils wurde der zukünftige Anteil bestimmt. Die Berechnung wurde für Gesamtdeutschland durchgeführt, da keine verwendbaren Daten für die einzelnen Stadt- und Landkreise verfügbar sind. Anhand der vorliegenden Daten des KBA wurden die Bestandszahlen der Elektroautos in Deutschland aus den Jahren 2008-2016 linear jährlich fortgeschrieben (nicht enthalten sind Flüssiggas-, Erdgas- und Hybrid Pkw). Die Berechnung basiert auf dem Jahr 2008, da ab dem 1. Januar 2008 elektrisch betriebene Pkw einzeln ausgewiesen werden.

Für das Jahr 2030 ergibt sich für Deutschland im Status Quo Szenario einen Gesamtanteil der Elektroautos von 4.274.872. Für den Gesamt Pkw-Bestand ergibt die Fortschreibung einen Wert von 55.234.062 Pkw. Insgesamt beläuft sich somit der E-Mobilitätsanteil an allen Pkws im Status Quo-Szenario im Jahr 2030 auf 7,74%. Zum Vergleich, im Jahr 2012 beträgt der Anteil der elektrisch betriebenen Pkws 0,06%.

Für das Szenario 1 (15% E-Mobilität 2030), das Szenario 2 (20% E-Mobilität 2030) und das Szenario Fokus (30% E-Mobilität 2030) wurde die jährliche Zunahme der Anteile an Elektrofahrzeugen bis 2016 identisch zum Status Quo berechnet. Die prozentuale Zunahme für die Jahre 2013-2030 wurde über einen fixierten Anteil an Elektro Pkw im Jahr 2030 von 10 % berechnet. Für das Szenario 1 bedeutet das eine jährliche Zunahme von 53,98%. Für das Szenario 2 liegt der Elektro Anteil der Pkw bei 15 %. Für das Szenario 2 ergibt das eine jährliche Zunahme (ab dem Jahr 2017) von 57,65%. Für das Szenario 3 liegt der Elektro Anteil an Pkw bei 20 %. Dies ergibt für Szenario 3 eine jährliche Zunahme (ab dem Jahr 2013) von 62,90%.

Das Szenario Fokus entspricht am ehesten den gängigen Prognosen und Vorstellungen für die Entwicklung der Elektromobilität Deutschland [70]. Die Nationale Plattform E-Mobilität (NPE [71]) geht von einem Ziel von 1.000.000 zugelassen Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 aus. Im Szenario Fokus wird die Millionengrenze im Jahr 2024 erreicht. Bei den anderen, konservativen Szenarien, entsprechend später. Die errechnete Gesamtanzahl der PKW im Jahr 2030 von 52.530.966 PKW (Jahr 2029 51.959.412 PKW) ist bei allen Szenarien gleich. Der Wert deckt sich mit der Prognose des Verbandes der Automobilindustrie (VDA) der von einem PKW Bestand von 51 Millionen PKW in Deutschland im Jahr 2030 ausgeht [72].

Die erreichbaren CO₂-Reduktionspotenziale durch den Einsatz der Elektromobilität ergeben sich aufgrund der CO₂-neutralen Bilanzierung der mit Elektroautos gefahrenen Kilometer. Die elektrisch bereitgestellte Fahrleistung aller Elektrofahrzeuge (abhängig vom Szenario) stellt daher das CO₂-Potenzial dar. Die Kosten hingegen werden analog zur Methodik in Abschnitt 2.2 berechnet.

V-03 Carpooling im Pendlerverkehr

Durch die Steigerung des Besetzungsgrades sollen die zurückgelegten Fahrzeugkilometer im Arbeits- und Ausbildungsverkehr reduziert werden. Diese Maßnahme wird nach jetziger Berechnung nur für den Pendlerverkehr ausgewiesen. Bei Bedarf kann sie jedoch auch auf den Gesamtverkehr erweitert werden. Die CO₂-Reduktionspotenziale ergeben sich durch die Erhöhung des Besetzungsgrades der Pkw und die damit einhergehende Reduktion der Fahrleistungen im Pendlerverkehr.

Für den Pendlerverkehr werden die verkehrlichen Faktoren (Wegelänge, Wegezähl, Besetzungsgrad) für den Wegezweck Arbeiten und Ausbildung ausgewiesen und entsprechend der Berechnung in Kapitel 2.2 ermittelt.

Basierend auf bestehenden Verkehrsentwicklungsplänen, Verkehrskonzepten und sonstiger Fachliteratur, wie zum Beispiel der Verflechtungsprognose 2030 [16] können Reduzierungspotenziale für die jeweiligen Kreistypen ermittelt werden [33]. Es wird davon ausgegangen, dass in gut ausgebauten Bereichen, wie z.B. in Kernstädten u.a. Carpooling Angebote nicht so stark nachgefragt werden wie in ländlicheren Kreisen. Grund dafür sind u.a. die gut ausgebauten ÖPNV Möglichkeiten in den Ballungsgebieten. Aus diesem Grund ist die Maßnahme Carpooling im Pendlerverkehr eine Maßnahme, die erhöhtes Reduzierungspotenzial insbesondere im suburbanen und ländlichen Räumen hat. In Kapitel 2.3.1.2 sind die möglichen Reduzierungspotenziale der Fahrzeugkilometer, in Abhängigkeit des betrachteten Bilanzraums aufgezeigt.

4.5.3 Übergreifende Maßnahmen

Zu den übergreifenden Maßnahmen zur CO₂-Minderung zählen sektorübergreifende Maßnahmen zwischen den Bereichen Wärme, Strom und Mobilität sowie Maßnahmen, die innerhalb eines Bereiches über mehrere Elemente wirken (z. B. *Ü-06 Kooperative Energiebereitstellung für Wohn- und Nichtwohngebäude – KWK* (Quartier statt Einzelgebäude-Wärmeversorgung)).

Für die übergreifenden Maßnahmen wird zwischen den Gruppen *Verkehr-Strom*, *Nahwärmeversorgung*, *Wärmepumpe*, *Stromversorgung (nicht KWK)* und *sonstige* unterschieden. Im Folgenden werden die übergreifenden Maßnahmen vorgestellt.

Ü-01 Förderung von PV-Carports

Zur Steigerung des Anteils von erneuerbarem Strom können neben herkömmlichen Dachflächen auf bestehenden oder zukünftig verfügbaren Carports PV-Module installiert werden. Zum einen bestehen bereits zahlreiche Pläne für den verstärkten Ausbau von Carports auf öffentlich zugänglichen Parkplätzen und zum anderen wird durch den steigenden Anteil von Elektrofahrzeugen im Verkehr ein Ausbau von (offenen) Carports durch private Initiativen erwartet. Das Potenzial der zukünftig verfügbaren Dachflächen auf Carports ergibt sich aus der Gebäudestruktur des betrachteten

Bilanzraumes (Quartier, Kommune). Einfamilienhäuser sowie Reihenhäusern wird die Möglichkeit zugesprochen in einen Carport mit 18 m² Dachfläche zu investieren. Als Referenz für die CO₂-Einsparung wird der CO₂-Emissionsfaktor des Bundesstrommixes bzw. wenn bekannt des kommunalen Strommixes angenommen. Als initiierender Akteur kommen z. B. Stadtplaner in Frage, die für Neubauten entsprechende Vorgaben im Bebauungsplan mitaufnehmen.

Ü-02/03 Demandside Management im Verkehr – Haushalte bzw. GHD

Ziel der Maßnahme ist eine stromseitige Sektorkopplung des Verkehrs mit dem Gebäudebereich (Wohngebäude (Haushalte) bzw. Nicht-Wohngebäude (GHD)), in dem die Elektromobilität mit Hilfe intelligenter Ladestrategien und Vehicle-to-Grid in das Energiesystem eingebunden wird. Eine CO₂-Einsparung ergibt sich dadurch, dass in Zeiten negativer Residuallast erneuerbarer Überschussstrom gespeichert wird und in Zeiten positiver Residuallast konventionellen Strom ersetzt. Die Anzahl der Stunden im Jahr mit negativer Residuallast wird vorgegeben. Das Potenzial der E-Autos ergibt sich aus der Gesamtanzahl der Pkw im Bilanzraum und einem angenommenen E-Auto-Anteil (bis zu 30 % E-Autos bis 2030). Die Aufnahmeleistung bei Beladung wird auf 11 kW je Pkw veranschlagt. Berücksichtigt werden zudem die Akzeptanz für Vehicle-to-Grid (für bis zu 20 % der Elektrofahrzeuge wird V2G zugelassen) als auch die technische Verfügbarkeit der Elektrofahrzeuge. Die Beladungskosten mit elektrischem Strom werden nach den Sektoren Haushalte und GHD unterschieden. Dabei wird die Batteriedegradation durch die externe Nutzung der Batterie über eine Entschädigung in Höhe von 14,8 EUR-ct/kWh berücksichtigt, wodurch der Stromverbrauchspreis entsprechend sinkt [73]. Die Abstimmung und Koordination der Ladestrategien könnte mittels Netzbetreiber bzw. Stadtwerken erfolgen.

Ü-04 Netzgebundene Wärmeversorgung mit energieeffizienter KWK

Eine zentrale Nahwärmeversorgung mittels eines effizienten, motorgetriebenen Erdgas-Blockheizkraftwerkes kann im Vergleich zu konventionellen Einzelgebäude-Wärmeversorgungslösungen zur Reduktion des Primärenergieverbrauchs und des CO₂-Ausstoßes beitragen. Das Potenzial der Nahwärmeversorgung bezieht sich aufgrund der notwendigen wirtschaftlichen Mindestwärme-Nachfragedichte auf Mehrfamilienhäuser (MFH) und Nichtwohngebäude (NWG)¹⁵. Hierbei wird ein potenzieller Anschlussgrad von 80 % bei einer Erschließungszeit von 10 Jahren unterstellt. Durch Nahwärmeversorgungssysteme bereits versorgte Gebiete werden bei der Potenzialermittlung berücksichtigt¹⁶. Um Lastspitzen der Wärmenachfrage wirtschaftlich abzudecken, wird ein konventioneller Spitzenkessel zugeschaltet. Der KWK-Anteil im Vergleich zum Spitzenkessel an der bereitzustellenden Nahwärme kann dabei vorgegeben werden. Aus diesem ergibt sich unter vorgegeben Volllaststunden die erforderliche installierte thermische KWK-Leistung. Die Stromkennzahl bestimmt die elektrische Kapazität der KWK-Anlage. Zudem können je nach gewählter Netztemperatur unterschiedliche Effizienzen der Wärmeversorgung berücksichtigt werden. Als Referenz für die Berechnung der CO₂-Einsparung wird ein durchschnittlicher spezifischer Wärmemix-Emissionsfaktor herangezogen. Die Allokation der Koppelprodukte Wärme und Strom der KWK-Anlage erfolgt auf Basis der Exergiemethode. Dabei wird die Energiequalität berücksichtigt,

¹⁵ Das verbleibende Ausbaupotenzial (Gesamtpotenzial minus bereits erschlossenes Potenzial) wird vom Anwender vorgegeben. Eine geografische Differenzierung erfolgt nicht.

¹⁶ Bestehende Nahwärmeversorgung ist dabei vom Anwender des EN-easy Tools anzugeben (MWh/a).

indem Strom zu 100% als Exergie, sprich entsprechend des Carnot-Faktors, und Wärme in Abhängigkeit der Vorlauf- und Rücklauf-temperatur deutlich geringere Exergiegehalte aufweist. Damit fällt ein Großteil der CO₂-Emissionen der Stromproduktion zu. Stadtwerke stehen als zentrale Akteure für den Bau bzw. Ausbau der Nahwärmeversorgung im Fokus dieser Maßnahme. Für Neubau-Quartiere nehmen Stadtplaner eine wichtige Rolle ein, indem sie die Nahwärme vor dem Hintergrund einer nachhaltigen Stadtentwicklung im Bebauungsplan verankern.

Ü-05 Netzgebundene Wärmeversorgung mit energieeffizienten Wärmepumpen

Zur Steigerung des Erneuerbaren Anteils an der Wärmeversorgung können Groß-Wärmepumpen, die die Umweltwärme (z. B. Erdwärme) nutzbar machen, einen wichtigen Beitrag leisten. Die Integration zentraler Wärmepumpen in die Nahwärmeversorgung trägt zur „Vergrünung“ dieser bei. Das Potenzial der Erdwärmepumpen wird, wenn keine weiteren Informationen vorliegen, abgeschätzt über einen pauschalen Anteil an der Siedlungsfläche (1 %) sowie einer angenommen mittleren spezifischen Entzugsleistung (z. B. 40 W/m²). Die CO₂-Einsparung wird im Vergleich zur konventionellen Wärmeerzeugung ermittelt. Für die Wärmepumpe wird eine Jahresarbeitszahl von 3,7 unterstellt [74]. Die Anschaffungskosten der Wärmepumpe basieren auf spezifischen Kostenfunktionen (EUR/kW), die von der erforderlichen Kapazität abhängen. Als Akteure kommen die Betreiber von Wärmenetzen in Frage: die Stadtwerke.

Ü-06 Nutzung von Skaleneffekten durch (kooperative) Nutzung von PV-Freiflächen und großen Solarthermie-Anlagen

Ziel ist es große Solaranlagen (wärme- und stromseitig) auf verfügbaren Freiflächen innerhalb des betrachteten Bilanzraums einzubinden. Dies ermöglicht eine stufenweise Dekarbonisierung sowohl der Strom- als auch der Wärmebereitstellung. Dabei wird im Zusammenhang mit der Maßnahme berücksichtigt, dass aufgrund von Skaleneffekten leistungsspezifische Kosteneinsparungen im Vergleich zur Installation vieler kleiner Anlagen realisiert werden können. Als Flächenpotenzial für PV Großanlagen wird ein pauschaler Wert von 1 % der in einem Bilanzraum verfügbaren landwirtschaftlichen Fläche angesetzt. Zu beachten ist hierbei, dass Flächenkonkurrenzen bestehen (z. B. zu PV-Freiflächennutzung, Nahrungsmittelerzeugung). Im EN-easy sind solarthermische Anlagen unter anderem über Ü-08 abgebildet.

Ü-07 Temperaturabsenkung von Wärmenetzen zur Effizienzsteigerung

Die Effizienz der Nahwärmebereitstellungskette kann durch eine Absenkung der Netztemperaturen gesteigert werden. Zum einen ergeben sich durch ein geringeres Temperatur-Delta zur Umgebung verminderte Verluste bei der Wärmeverteilung. Zum anderen arbeiten die Wärmeerzeuger bei niedrigeren bereit zu stellenden Temperaturen effizienter (u.a. geringere Rauchgasverluste). Damit gehen geringere Primärenergieverbräuche und CO₂-Emissionen einher. Das Einsparpotenzial von Niedertemperatur-Systemen wird sowohl für bestehende Nahwärmesysteme als auch für neue berechnet. Als Referenz wird dabei von einem System der 3. Generation mit 90°C im Vorlauf und 60°C im Rücklauf ausgegangen, womit entsprechende Effizienzen verbunden sind. Damit weist das Referenzsystem schon einen hohen Standard auf, so dass die Einsparpotenziale durch die Niedertemperatur-Nahwärme tendenziell unterschätzt und somit konservativ berechnet werden. Die Temperaturabsenkung auf Niedertemperatur-Nahwärme erfolgt auf 60°C im Vorlauf und 45°C im

Rücklauf mit entsprechend besseren Effizienzen. Die Absenkung der Netztemperatur bedarf ggf. einer Abstimmung mit gebäudeseitigen Maßnahmen (z. B. Flächenheizungen). Als Akteur stehen hier sowohl die Stadtwerke als auch die Stadtentwickler im Fokus. Diese Maßnahme knüpft an Ü-04 an.

Ü-08 Ausbau solarunterstützter Nahwärme – LowEx Netze

Solarthermische Freiflächenanlagen können „grüne“ Nahwärme bereitstellen, indem solare Wärme in das Nahwärmeversorgungssystem eingespeist wird. Hierbei soll das Wärmenetz als Speicher dienen, wobei aufgrund der beschränkten Speicherkapazität ein maximaler solarer Deckungsanteil von 15 % unterstellt wird. Höhere Deckungsanteile können mit einem saisonalen Speicher erreicht werden (siehe Ü-11). Die Auslegung der solarthermischen Freiflächenanlage erfolgt mit dem vorgegebenen solaren Deckungsanteil am gesamten, jährlichen Wärmebedarf. Die effiziente Integration von Solarwärme setzt eine Absenkung der Netztemperaturen voraus (Ü-07). Bezüglich der Flächenfindung obliegt es der Stadtverwaltung bzw. den Stadtplanern verfügbare Areale bereitzustellen.

Ü-09 Abwasserwärmenutzung

Häusliches und industrielles Abwasser haben ein großes Potenzial an Wärme, das ungenutzt der Kanalisation zugeführt wird. Die Abwasserwärme kann jedoch mittels Wärmepumpen nutzbar gemacht werden und damit einen Beitrag zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung leisten. Der mögliche Wärmeertrag wird u.a. aus der Abwassermenge in Abhängigkeit der Einwohner- und Arbeitnehmerzahlen des Bilanzraumes geschätzt. Es wird dabei von einer zentralen Wärmepumpe ausgegangen. Als Referenz für die CO₂-Einsparung wird der Wärmemix genommen. Das Umsetzungspotenzial wird als hoch angesehen, da die Kanalisation i.d.R. in städtischer Hand liegt.

Ü-10 Stromspeicher zur Integration hoher Anteile Erneuerbarer Energien

Mit stationären elektrischen Speichersystemen kann der Eigenverbrauch von photovoltaisch erzeugtem Strom erhöht werden. Die lokale Emissionsreduktion ergibt sich dabei aufgrund des gestiegenen Eigennutzungsanteils und der somit verminderten Stromexporte ins übergreifende Netz. Die Investitionen der elektrischen Speicher werden dabei zu Teilen durch Einsparungen aufgrund der vermiedenen Umlage aufgewogen. Zudem können Quartierspeicher unterstützend zum konventionellen Netzausbau wirken.

Ü-11 Warmwasserspeicher zur Integration hoher Anteile Erneuerbarer Energien

Durch Wärmespeicher können höhere Anteile dargebotsabhängiger Erneuerbarer Energien in das Nahwärmesystem integriert werden. So kann der solare Deckungsgrad erheblich gesteigert werden gegenüber Systemen ohne saisonale Speicher (vgl. Ü-08). Je nach Solarflächenpotenzial und Speichergröße sowie Umfang der Versorgungsaufgabe können solare Deckungsgrade von über 30 % erzielt werden. Die zusätzliche Flächeninanspruchnahme kann durch unterirdische Wärmespeicher gering gehalten werden. Als Flächenpotenzial für solarthermische Großanlagen wird ein pauschaler Wert von 1 % der in einem Bilanzraum verfügbaren landwirtschaftlichen Fläche angesetzt. Zu beachten ist hierbei, dass Flächenkonkurrenzen bestehen (z. B. zu PV-Freiflächennutzung, Nahrungsmittelerzeugung) jedoch auch Konzepte einer Mehrfachnutzung existieren (z. B. Grünfläche zwischen Kollektoren zur Nutzung von Urban Gardening). Die Maßnahme ist mit Ü-04 und Ü-07 verknüpft.

Ü-12 Austausch der Straßenbeleuchtung gegen LED-Leuchten

Die Straßenbeleuchtung hat derzeit noch einen relevanten Anteil am Stromverbrauch einer Kommune. Hier besteht ein Stromeinsparpotenzial in Abhängigkeit der Größe des Bilanzraumes durch die Modernisierung alter Leuchten (z. B. Hochdruck-Quecksilberdampflampen), indem energieeffiziente LED-Technik zum Einsatz kommt. Die Berechnung basiert auf der Anzahl der Lichtpunkte innerhalb des Bilanzraumes, welche mit urban bebauter Fläche korreliert. Das Einsparpotenzial ergibt sich aus der Anzahl der Straßenleuchten und bereits ausgetauschter Leuchten. Die Anzahl der Straßenleuchten sowie der Anteil der LED-, HQL- und Natriumdampf-Lampen sind vom Anwender einzugeben. Sollten die Anteile nicht bekannt sein, wird ein Referenzwert für die Verteilung der LED-, HQL- und Natriumdampf-Lampen angesetzt. Durchführender Akteur der Maßnahme ist die Stadtverwaltung.

Ü-13 Quartiers-/Klimaschutzmanager

Ziel der Maßnahme ist die Etablierung eines Klimaschutzmanagers, der die Umsetzung der verschiedenen Maßnahmen innerhalb des Bilanzraums steuert und fachlich-inhaltlich unterstützt, begleitet und deren Wirksamkeit überprüft. Mit dem Klimaschutzmanager als Steuermann und „Kümmerer“ von Projekten steigt die Chance auf eine erfolgreiche Umsetzung von Maßnahmen zur CO₂-Senkung. Die Einstellung eines Klimaschutzmanagers wird von der KfW gefördert (bis zu 65% in den ersten drei Jahren) und obliegt der kommunalen Verwaltung [75].

4.6 EN-easy – Fallstudien

Das EN-easy Tool wird anhand von zwei Fallstudien angewendet und die Ergebnisse der von EN-easy berechneten Energie- und CO₂-Bilanzen für die beiden Fallstudien werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt. Einerseits wird eine Mittelstadt mit ca. 22.000 Einwohnern in Baden-Württemberg (Metzingen¹⁷, vgl. auch Kapitel 3.1) betrachtet, die überwiegend durch Bestandsbauten (Wohn- und Nichtwohngebäude) charakterisiert ist, während andererseits eine Konversionsfläche mit überwiegender Neubaustruktur (hauptsächlich Nichtwohngebäude) im Falle von Berlin-TXL (vgl. auch Kapitel 3.2) betrachtet wird. Es ist zu beachten, dass die Fallstudien durchgeführt wurden, bevor das EN-easy-Tool in eine Webanwendung überführt wurde und sich daher in der Darstellung der Ergebnisse von der Webapplikation unterscheiden.

4.6.1 Metzingen

Im Folgenden wird für die Modellregion Metzingen eine Energie- und CO₂-Bilanz mithilfe des dem EN-easy Ansatzes (siehe Kapitel 4.3) erstellt, die als Referenz für das CO₂-Einsparpotenzial durch Klimaschutzmaßnahmen dient. Zur Bestimmung des realisierbaren CO₂-Einsparpotenzials einer Maßnahme werden Akteurshemmnisse und Akzeptanzschwierigkeiten berücksichtigt. Kopplungseffekte zwischen Maßnahmen werden zudem berücksichtigt, um das Einsparpotenzial des Maßnahmenportfolios nicht zu überschätzen. Eine Minderungskostenkurve der

¹⁷ nach BBSR dem verstärkerten Raum zuzuordnen

Klimaschutzmaßnahmen wird abschließend erstellt, um Handlungsempfehlungen hinsichtlich der Umsetzungsreihenfolge von Maßnahmen ableiten zu können.

4.6.1.1 Energie- und CO₂-Bilanz

Auf Basis der Vorgehensweise zur Berechnung der Energie- und CO₂-Bilanz einer Modellregion (vgl. Kapitel 4.3) stellt Tabelle 49 den Endenergieverbrauch in Höhe ca. 361 GWh/a für Metzingen im Basisjahr 2012 dar.

Tabelle 49: Endenergieverbrauch für den Bilanzraum Metzingen anhand EN-easy

GWh Endenergie/a	Wärme	Kälte	Strom	Mobilität	Gesamt
Wohngebäude	167,7	-	29,7	-	197,4
Nichtwohngebäude	67,0	4,8	57,8	-	129,6
Verkehr	-	-	-	33,9	33,9
Gesamt	234,7	4,8	87,5	33,9	361

Ein Großteil (ca. 65 %) der Endenergie wird für die Bereitstellung der Wärme genutzt. Stromanwendungen spielen mit ca. 24 % eine vergleichsweise geringere Rolle. Zudem fällt auf, dass der Verbrauch in Wohngebäuden mit 55 % den größten Anteil der Endenergienachfrage darstellt, gefolgt von Nichtwohngebäuden (36 %) und dem Verkehr mit 9 %.

Die CO₂-Emissionen der Wohn- und Nichtwohngebäude (ohne Industrie) und des Verkehrs (nach Verursachern) in Metzingen belaufen sich im Basisjahr 2012 auf rund 120 kt/a (vgl. Abbildung 54).

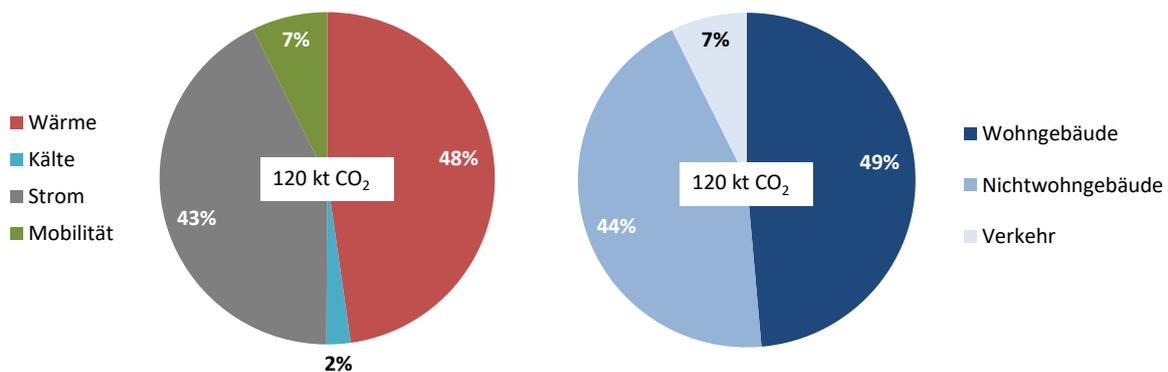


Abbildung 54: CO₂-Emissionen im Basisjahr im Bilanzraum Metzingen nach Anwendung und Verursacher anhand EN-easy

Hierbei sind etwa die Hälfte der Treibhausgasemissionen auf den Wohngebäudebestand bzw. die privaten Haushalte. Auch der Bestand an Nichtwohngebäuden (GHD) hat mit 44 % einen erheblichen Anteil an den CO₂-Emissionen, während der Verkehr als Verursacher von CO₂-Emissionen mit einem Anteil von 7 % einen vergleichsweise geringen Anteil einnimmt. Zusätzlich werden die CO₂-Emissionen nach den Bereichen Wärme, Kälte, Strom und Mobilität unterteilt. In Metzingen dominieren

die wärme- und strombedingten CO₂-Emissionen (48 % bzw. 43 %) gegenüber Emissionen, die von Mobilität und Kälteanwendungen verursacht werden (7 % bzw. 2 %).

4.6.1.2 Durchdringungskurven für Fallstudie Metzingen

Im Allgemeinen werden Potenziale von Maßnahmen, die sehr fallspezifisch zu beurteilen sind und daher sehr unterschiedlich ausfallen können, konservativ angenommen. Da in diesen Fällen eine pauschale Übertragbarkeit der Maßnahmen auf alle Bilanzräume nicht gegeben ist, werden durch diesen Ansatz eine Überschätzung des Einsparpotenzials und eine Verzerrung der CO₂-Minderungskostenkurven vermieden. Dies betrifft vor allem Maßnahmen mit großem Investitionsvolumen bzw. hohen Infrastrukturaufwendungen, wie beispielsweise der Ausbau der Nahwärme oder die energetische Nutzung von Freiflächen. Die angenommene Durchdringungsrate beträgt in diesen Fällen je Maßnahme zwischen 10 % und 25 %. Die absolute Höhe der Durchdringungsrate orientiert sich auch daran, ob Maßnahmen am gleichen Wirkungspunkt angreifen. Maßnahmen, die auf der gleichen Ebene (z. B. auf der End-, Nutzenergieebene oder direkt bei der Energiedienstleistung) und eine vergleichbare Wirkungsweise haben, sind zu Gruppen verbunden (siehe Abschnitt 4.4.3). Maßnahmen einer Gruppe werden gleichbewertet und erhalten daher die gleiche Durchdringungsrate. Beispielsweise wird für die Fallstudie Metzingen für den Gebäudebestand der Wohn- sowie Nichtwohngebäude von einer jährlichen Sanierungsrate von 1 % ausgegangen. Da die Sanierungsmaßnahmen der Wohn- und Nichtwohngebäude jeweils einer Gruppe zugeordnet sind, ist die Sanierungstiefe über die einzelnen Sanierungsstufen gleichverteilt, d. h. über den Betrachtungszeitraum bis 2030 werden 18 % der Bestandgebäude saniert und auf jede Stufe entfallen 3 %, sodass in Summe das vollständige Sanierungsportfolio zur Geltung kommt. Zusätzlich wird in Betracht gezogen, dass die Summe der Maßnahmen innerhalb einer Gruppe nicht über 100 % Durchdringung erreichen kann. Darüber hinaus wird in Abhängigkeit des Verhältnisses der Nutzungsdauer, die der Maßnahme unterstellt ist und dem Betrachtungszeitraum eine Durchdringungsrate zugewiesen. Beispielsweise wird der Maßnahme „Anschaffung effizienter Elektrogeräte“, mit einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von 10 Jahren für den Betrachtungszeitraum bis 2030 eine Durchdringungsrate von 100 % angenommen. Dem gegenüber wird für die Erneuerung der Erzeuger/Anlagentechnik 75 %, angenommen, da Heizungssysteme eine durchschnittliche Nutzungsdauer von 25 Jahren haben. Im Verkehrssektor wird für die Elektromobilität das „Fokus Szenario“ als Grundlage gezogen (30 % Elektromobilitäts-Quote bis 2030). Dieses Ziel wird als realistisch angesehen und daher nicht weiter reduziert, sodass die Durchdringungsrate für diesen Fall bei 100 % liegt. Die Maßnahmen „Umweltverbund“ und „Carpooling“ hingegen werden jeweils mit 50 % Durchdringung bewertet. Die Durchdringung der einzelnen Maßnahmen aus dem Bereich Übergreifende orientiert sich fallspezifisch an der Akzeptanz der Gebäude- und Verkehrsmaßnahmen. Die Förderung von PV-Carports geht mit 50 % Durchdringung in die CO₂-Minderungskostenkurve ein, die Akzeptanz zukunftsorientierter Entwicklungen, wie Demandside-Management bei der Beladung der Elektrofahrzeuge wird in der Literatur mit 20 % angegeben [73]. Für Maßnahmen hinsichtlich der netzgebundenen Wärmeversorgung durch effiziente Erzeugungsanlagen wird eine Durchdringungsrate von 33 % unterstellt. Bei der elektrischen Speichernutzung in Haushalten wird analog zur Sanierungsrate von einem jährlichen Zubau von 1 % ausgegangen, d. h. in Summe wird von einer Durchdringungsrate von 18 % ausgegangen. Eine genaue Übersicht der Annahmen für die Fallstudie Metzingen bezüglich der Durchdringungsraten, sowie der einzelnen Maßnahmenpotenziale sind in Tabelle 67 und Tabelle 68 im Anhang B beigefügt.

4.6.1.3 CO₂-Minderungskostenkurve der Klimaschutzmaßnahmen

Die CO₂-Einsparpotentiale der betrachteten Klimaschutzmaßnahmen für Metzingen sind der horizontalen Achse aus Abbildung 55 zu entnehmen. Die Sortierung der Maßnahmen nach Wirtschaftlichkeit erfolgt aufsteigend nach spezifischen CO₂-Vermeidungskosten in EUR je Tonne vermiedener CO₂-Emissionen (vertikale Achse). Die mögliche Erschließung des Potentials einer Maßnahme ist über Durchdringungsraten abgebildet. Die angesetzten Durchdringungsraten berücksichtigen dabei, dass die Maßnahmen Änderungen im Bestand erfordern und nicht Entwicklungsflächen erschlossen werden. Im Weiteren berücksichtigen die Durchdringungsraten Kopplungseffekte von Maßnahmen, um das Einsparpotenzial sich gegenseitig beeinflussender Maßnahmen nicht zu überschätzen (negative Kopplung) bzw. zu unterschätzen (positive Kopplung) (vgl. Abschnitt 4.4). Die Klimaschutzmaßnahmen sind in die Bereiche Wohngebäude (beige), Nichtwohngebäude (rot), Verkehr (dunkelblau) und übergreifend (hellblau) unterteilt.

Im Folgenden werden zunächst die CO₂-Einsparpotentiale der Maßnahmen (horizontale Achse) analysiert, bevor im Weiteren die wirtschaftliche Seite der Maßnahmen (vertikale Achse) beleuchtet wird.

Das technisch umsetzbare CO₂-Minderungspotenzial bis 2030 in Metzingen beträgt unter den angenommenen Rahmenbedingungen ca. 30 kt CO₂, was einer Emissionsminderung um 25 % gegenüber dem Basisjahr entspricht. Wird das CO₂-Einsparpotenzial nach Bereichen unterteilt, so erzielen Maßnahmen im Wohngebäudebereich mit einem Anteil von 40 % die größte Reduktion (ca. 12 kt CO₂). Während Nichtwohngebäude mit 27 % (~8 kt CO₂) und übergreifende Maßnahmen mit 22 % (~7 kt CO₂) zusammen etwa die Hälfte des Einsparpotenzials einnehmen, spielen verkehrsseitige Maßnahmen mit einem Anteil von 10 % (~3 kt CO₂) am gesamten Einsparpotenzial eine untergeordnete Rolle. Vier Maßnahmen auf Seite der Strombereitstellung und -nutzung kommt eine besondere Bedeutung zu, da sie zusammen etwa ein Drittel des CO₂-Minderungspotenzials vereinen: G-24 Nutzung PV-Anlage (~ 2,9 kt CO₂), G-14 Nutzung PV-Anlage mit Batteriespeicher (~ 2,6 kt CO₂), G11 Energieeffiziente Elektrogeräte (~ 2,3 kt CO₂) und V-02 Förderung von E-Mobilität in Haushalten (~ 2,1 kt CO₂).

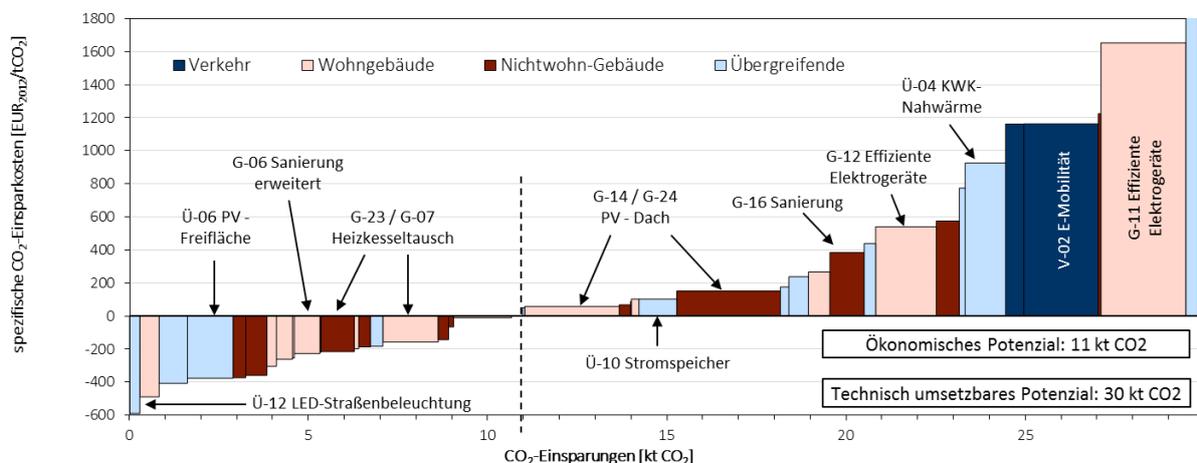


Abbildung 55: CO₂-Potenzialkurve für die Fallstudie Metzingen

Wirtschaftlich kann mehr als ein Drittel (11 kt CO₂) des gesamten CO₂-Minderungspotenzials in der betrachteten Modellregion erschlossen werden. Das bedeutet, dass die Umsetzung der Maßnahmen nicht nur zu einer CO₂-Reduktion, sondern auch zu einer Kostenersparnis führt. Wirtschaftliche Maßnahmen sind insbesondere im Bereich der Wohngebäude und übergreifenden Maßnahmen erkennbar (vgl. beige und hellblaue Säulen in Abbildung 55). Demgegenüber weisen Verkehrs-Maßnahmen nur ein niedriges wirtschaftliches Potential auf.

Zu den wirtschaftlichen Maßnahmen zählen insbesondere der Heizkesseltausch (G-07, G-23) sowie energetische Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle (u.a. G-01 Sanierung Fenster, G-04 Sanierung Außenwand, G-06 Komplettanierung erweitert). Als wirtschaftlichste CO₂-Einsparmaßnahme erweist sich der Austausch der Straßenbeleuchtung durch LED-Technik. Aufgrund von Skaleneffekten zeichnen sich Photovoltaik-Freiflächenanlagen (Ü-06) als wirtschaftlich vorteilhafter aus im Vergleich zu PV-Aufdachanlagen (G-14, G-24). Das größere, realisierbare CO₂-Einsparpotential liegt jedoch bei den PV-Aufdachanlagen. Eine Absenkung der Wärmenetztemperaturen (Ü-07) erweist sich als ebenfalls wirtschaftlich vorteilhaft, setzt jedoch eine energetische Ertüchtigung der Wohngebäude voraus. Eine wirtschaftliche Hebung der Einsparpotenziale der Nichtwohngebäude kann über Maßnahmen zur Wärme- und Kältebereitstellung realisiert werden (z.B. G-23 Erneuerung Heizungsanlage (~0,9 kt CO₂), G-27 Sanierung der Wärme-/Kälteübergabe (~0,6 kt CO₂)).

Insgesamt ergibt sich für das Zieljahr 2030 eine wirtschaftliche CO₂-Minderung von etwa 9 % (11 kt CO₂) gegenüber dem Ausgangswert im Basisjahr von 120 kt CO₂.

Etwa zwei Drittel des CO₂-Minderungspotentials in Metzingen (ca. 19 kt CO₂) kann nicht wirtschaftlich erschlossen werden. Dies betrifft insbesondere Maßnahmen im Wohngebäudebereich (z. B. G-14 PV-Aufdachanlage mit Batteriespeicher (~2,6 kt CO₂), G11/12 Austausch durch energieeffiziente Elektrogeräte (~4,1 kt CO₂)). Die Erschließung der CO₂-Einsparung mit PV-Aufdachanlagen ist dabei spezifisch günstiger zu erzielen als durch den Einsatz von effizienten Elektrogeräten (60 €/t CO₂ vs. 500 €/t CO₂). Im Weiteren bestehen auch bei den Nichtwohngebäude-Maßnahmen noch nicht wirtschaftliche Potenziale in Höhe von über 5,5 kt CO₂-Reduktion (u.a. G-24 PV-Aufdachanlage (~3 kt CO₂ Reduktion), G-16 Sanierung NWG komplett (~1 kt CO₂ Reduktion). Das nicht wirtschaftliche CO₂-Minderungspotenzial übergreifender Maßnahmen beläuft sich auf rund 4 kt CO₂. Dabei entfällt etwa die Hälfte davon auf Nahwärmeversorgungsmaßnahmen (u.a. Ü-04 Netzgebundene Wärmeversorgung mit energieeffizienter KWK, Ü-08 Ausbau solarunterstützter Nahwärme). Verkehrsmaßnahmen, die gegenwärtig zwar nicht wirtschaftlich sind, aber zu einer erheblichen CO₂-Minderung führen, sind z.B. V-02 Wechsel auf E-Mobilität (Haushalte und GHD) mit über 2,6 kt CO₂.

Zusammenfassend können für die Fallstudie Metzingen im Zieljahr 2030 durch Klimaschutzmaßnahmen 30 kt CO₂ gegenüber dem Basisjahr 2012 erreicht werden. Dies entspricht einer CO₂-Minderung um 25 % gegenüber dem Basisjahr. Zusätzlich ergeben sich zwischen 2012 und 2030 Sowieso-CO₂-Einsparungen, die unabhängig von den Maßnahmen eintreten (z.B. CO₂-Einsparung durch Verbesserung des CO₂-Strommixes), so dass die gesamte CO₂-Minderung noch höher ausfällt.

Die Wohngebäuðemaßnahmen stellen in Summe 41 % des Potenzials des Maßnahmenportfolios bereit (12 kt CO₂ Einsparung), während die Nichtwohngebäuðemaßnahmen etwa 27 % (8 kt CO₂ Einsparung) und die übergreifenden Maßnahmen 22 % (7 kt CO₂ Einsparung) ausmachen. Verkehrsmaßnahmen hingegen spielen mit 10 % Anteil am Einsparpotential eine geringe Rolle (3 kt CO₂ Einsparung). Die

tabellarische Aufführung der in Abbildung 55 dargestellten CO₂-Minderungskostenkurven ist im Anhang in Tabelle 53 und Tabelle 54 zu finden.

4.6.2 Berlin TXL

Der zweite exemplarische Bilanzraum, der mit dem EN-easy Tool betrachtet wird, ist die Konversionsfläche Flughafen Berlin Tegel oder kurz Berlin TXL, der charakteristisch für die Neuerschließung von Quartieren mit Mischnutzung ist, d.h. mit einem hohen Anteil von Nichtwohngebäuden ist. Zusätzlich sind Planwerte wie die Nutzflächenverteilung nach Nutzungsarten (vgl. Abschnitt 3.2.1) gegeben. Die Grundstücksflächen erstrecken sich zurzeit über ca. 159 ha und es sollen bis zum Jahr 2036 in Summe ca. 1.100.000 m² Nettogeschossflächen für unterschiedliche Nutzungen erschlossen werden. Weitere Beschreibungen zur Modellregion Berlin TXL sind in Abschnitt 3.2 zu finden.

4.6.2.1 Energie- und CO₂-Bilanz

Die Energie- und CO₂-Bilanz für eine konkrete Neuerschließung der Konversionsflächen kann nicht auf Basis statistischer Daten berechnet werden. Da keine Stadtentwicklung bzw. die Erstellung von Stadtentwicklungskonzepten im Fokus stehen, wird auf bestehenden Planungen (Masterplan Berlin TXL) aufgebaut [46]. Das Nachnutzungskonzept sieht vor allem die Entwicklung eines Forschungs- und Industrieparks für urbane Technologien vor.

Die Energie- und CO₂-Bilanzierung ist im EN-easy-Tool auf das Basisjahr 2012 bezogen, wobei die Parameter zwischen Bestand und Neubau unterschieden werden (vgl. Abschnitt 4.4.1). Der Endenergieverbrauch des betrachteten Bilanzraumes umfasst in Summe 114 GWh/a (vgl. Tabelle 50).

Tabelle 50: Endenergieverbrauch für den Bilanzraum Berlin TXL

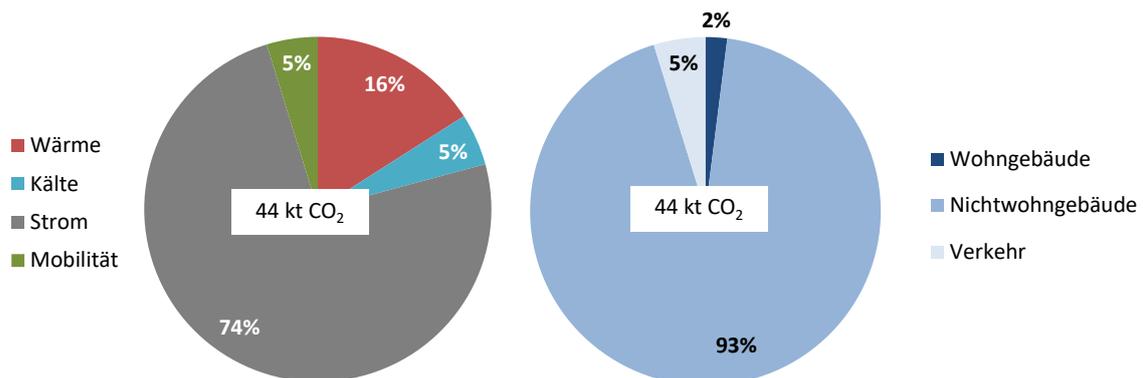
GWh Endenergie/a	Wärme	Kälte	Strom	Mobilität	Gesamt
Wohngebäude	2,20		0,75		2,95
Nichtwohngebäude	32,77	14,73	55,55		103,05
Verkehr				8,15	8,15
Gesamt	34,97	14,73	56,30	8,15	114,15

Es fällt auf, dass die Nichtwohngebäude mit 90 % den größten Anteil am Endenergieverbrauch ausmachen. Zudem ist die starke Nachfrage nach Strom, der ca. die Hälfte der gesamten Nachfrage darstellt, erkennbar. Auf Wärme- bzw. Kälteerzeugende Technologien sind mit 30 % bzw. 13 % ein deutlich geringerer Anteil des Endenergiebedarfs zurückzuführen, im Vergleich zur Fallstudie Metzingen (siehe Tabelle 49).

Die auf das Basisjahr 2012 bezogenen CO₂-Emissionen der Wohn- und Nichtwohngebäude (ohne Industrie) und des Verkehrs (nach Verursachern) im betrachteten Bilanzraum Berlin TXL belaufen sich auf 44 kt/a (vgl. Abbildung 56). Der Großteil der Treibhausgas-Emissionen ist mit ca. 93 % auf den GHD-Sektor (Nichtwohngebäude) zurückzuführen. Entsprechend hoch ist mit etwa drei Vierteln auch der Anteil des Stromverbrauchs am gesamten Endenergieverbrauch.

Tabelle 51: CO₂-Emissionen für den Bilanzraum Berlin TXL

t CO ₂ -Emissionen/a	Wärme	Kälte	Strom	Mobilität	Gesamt
Wohngebäude	442	-	440	-	882
Nichtwohngebäude	6.587	2.151 ¹⁸	32.442	-	41.180
Verkehr	-	-	-	2.102 ¹⁹	2.102
Gesamt	7.029	2.151	32.882	2.102	44.164

Abbildung 56: CO₂-Emissionen im Basisjahr im Bilanzraum Berlin TXL nach Anwendung und Verursacher

4.6.2.2 Durchdringungskurven für Fallstudie Berlin TXL

Die Quantifizierung der technischen Potenziale sowie der kumulierten Durchdringungskurven werden für die Fallstudie Berlin TXL nach den gleichen Prinzipien, wie in der Fallstudie Metzingen durchgeführt (vgl. Kapitel 4.6.1.2). Aufgrund der Besonderheit der vorwiegenden Neubaustuktur des Bilanzraums in Berlin, kommen alle Einzelmaßnahmen, die den Gebäudebestand betreffen nur eingeschränkt zum Einsatz. Der Fokus bei den gebäudeseitigen Maßnahmen liegt daher in erster Linie auf den Neubaumaßnahmen, d. h. die Maßnahme „Neubau im KfW Effizienzhaus 40 Standard“ fällt mit 18 % höher aus im Vergleich zur Fallstudie Metzingen. Zudem werden die Nutzung von PV in Wohn- und Nichtwohngebäuden sowie der Einsatz von Stromspeichern mit 36 % (2 %-Punkte/a über den Betrachtungszeitraum) im Vergleich zur Bestandsbauten verdoppelt. Gleiches gilt für die gebäudeseitigen Maßnahmen zur Nutzung regenerativer Wärmesenken bei der Gebäudekühlung. Im Bereich der übergreifenden Maßnahmen wird davon ausgegangen, dass die Durchdringung ebenfalls höher ausfällt. Bei der Abwasserwärmenutzung und der netzgebundenen Wärmeversorgung wird von einer vollständigen Nutzung der technischen Potenziale ausgegangen. Die Durchdringungsraten der Verkehrsmaßnahmen werden wie in der Fallstudie Metzingen eingesetzt. Eine genaue Übersicht der

¹⁸ Kältebereitstellung mittels Wärmepumpe (COP 4) und CO₂-Emissionsfaktor von 0,584 g CO₂/kWh (2015 Bundesmix)

¹⁹ Verursacherbilanz (Pkw-Verkehr der Einwohner und Arbeitnehmer von Berlin TXL)

Annahmen für die Fallstudie Berlin TXL bezüglich der Durchdringungsraten, sowie der einzelnen Maßnahmenpotenziale sind im Anhang B in Tabelle 69 und Tabelle 70 beigefügt.

4.6.2.3 CO₂-Minderungskostenkurven der Klimaschutzmaßnahmen

Die CO₂-Minderungskostenkurve der Klimaschutzmaßnahmen ist für die Fallstudie Berlin TXL nach ihren spezifischen CO₂-Einsparungskosten (EUR/ t CO₂) mit Angabe des jeweiligen CO₂-Einsparpotenzials (kt CO₂) in Abbildung 57 dargestellt. Das technisch umsetzbare CO₂-Einsparpotenzial, d.h. unter Berücksichtigung von Durchdringungsraten (vgl. Abschnitt 4.6.2.2), beläuft sich für die Fallstudie Berlin TXL auf 21 kt CO₂. Dies entspricht im Zieljahr 2030 einer Einsparung von fast 50 % gegenüber dem Referenzwert der CO₂-Bilanz im Basisjahr 2012 (44 kt CO₂). Grund hierfür ist die Annahme, dass Neubaumaßnahmen eine vergleichsweise hohe Durchdringungsrate erreichen können, da bei einem überwiegenden Neubauquartier von einem Planer bzw. Bauherrn mit entsprechend hohem Umsetzungspotenzial ausgegangen wird. Der Anteil des wirtschaftlich erschließbaren CO₂-Einsparpotenzials fällt mit 6 % bzw. 1 kt CO₂ im Neubauquartier erwartungsgemäß gering aus.

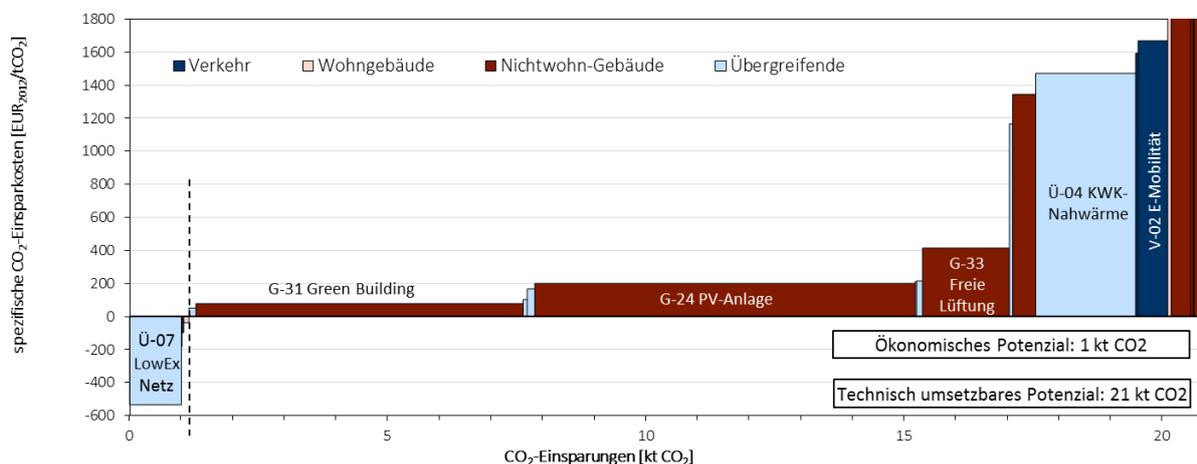


Abbildung 57: CO₂-Potenzialkurve für die Fallstudie Berlin TXL

Da auf der Konversionsfläche Berlin TXL der Anteil der Nichtwohngebäude dominiert, entfallen etwa 80 % (~ 16 kt CO₂) des CO₂-Einsparpotenzials auf Nichtwohngebäude-Maßnahmen. Weitere Potenziale können über übergreifende Maßnahmen (~ 3 kt CO₂) und Verkehrsmaßnahmen (~ 1 kt CO₂) erschlossen werden. Wohngebäuðemaßnahmen spielen hingegen nur eine untergeordnete Rolle (~ 0,2 kt CO₂-Reduktionspotenzial).

Zu den wirtschaftlich realisierbaren Maßnahmen zählen z.B. LowEx-Netze (Ü-07), wobei eine Effizienzsteigerung im Vergleich zu Standard-Nahwärmenetzen (Ü-04 KWK-Nahwärme) durch eine Absenkung der Netztemperaturen erzielt wird. Der Großteil der Maßnahmen weist hingegen positive spezifische CO₂-Vermeidungskosten auf. Aufgrund der dominierenden Neubaustruktur in Berlin TXL bestehen Einsparpotenziale insbesondere in der Umsetzung von Neubaumaßnahmen wie z.B. beim Bau nach Green-Building-Gesichtspunkten (G-31). Der gesteigerte Bauaufwand führt im Zusammenhang mit dieser Maßnahme zu CO₂-Vermeidungskosten in Höhe von 80 €/t CO₂, wobei ca. 6 kt CO₂ in Berlin TXL auf diese Weise eingespart werden. Einen größeren Beitrag - jedoch mit höheren

Vermeidungskosten verbunden (200 €/t CO₂) - kann die Nutzung von Photovoltaik-Aufdachanlagen (G-24) mit einem CO₂-Einsparpotenzial von 7 kt leisten. Weitere CO₂-Einsparpotenziale bestehen in der Nutzung von freier Lüftung statt Raumluftechnik (G-33, ~1,7 kt CO₂). Etwa 2 kt CO₂ können über eine Nahwärmeversorgung von Berlin TXL mittels effizienter Kraft-Wärme-Kopplung im Vergleich zur Referenz (Gasbrennwert-Kessel) eingespart werden²⁰. Verkehrsseitige Maßnahmen bestehen insbesondere in der Förderung der Elektromobilität innerhalb des Bilanzraums (V-02), womit ca. 0,6 kt CO₂ eingespart werden können.

Zusammenfassend können für die Fallstudie Berlin TXL 21 kt CO₂ Einsparungen infolge der Klimaschutzmaßnahmen realisiert werden, was einer CO₂-Reduktion um 47% entspricht. Diese im Vergleich zur Fallstudie Metzingen hohe relative CO₂-Einsparung wird durch hohe Durchdringungsraten der Maßnahmen erzielt, da von einer relativ geringen Anzahl von Bauherrn mit entsprechend hohem Umsetzungspotenzial der Maßnahmen ausgegangen werden kann. Die Nichtwohngebäudemaßnahmen stellen rund 80 % des Potenzials bereit (16 kt CO₂ Einsparung), während die übergreifenden Maßnahmen etwa 17 % ausmachen (3 kt CO₂ Einsparung). Verkehrs- und Wohngebäudemaßnahmen spielen eine untergeordnete Rolle.

Die spezifischen CO₂-Vermeidungskosten und CO₂-Einsparpotenziale der weiteren Maßnahmen sind im Anhang in Tabelle 55 zu finden.

4.6.3 Energiewirtschaftliche Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

Das technisch realisierbare CO₂-Minderungspotenzial in Metzingen beläuft sich auf 30 kt bzw. in Berlin TXL auf 21 kt CO₂. Aus der CO₂-Minderungskostenkurve geht hervor, dass bereits heute wirtschaftliche CO₂-Minderungsmaßnahmen in Höhe von 11 kt CO₂ in Metzingen bzw. 1 kt CO₂ in Berlin TXL bestehen. Dies entspricht 9 % der heutigen Emissionen in Metzingen bzw. 3 % der voraussichtlichen Emissionen in Berlin TXL. Hier ist es sinnvoll, die Hemmnisse, die einer Umsetzung trotz gegebener Wirtschaftlichkeit entgegenstehen, zu analysieren und mittels informatorischer Maßnahmen seitens der kommunalen Verwaltung die Hebung der wirtschaftlichen Potenziale anzustoßen. Maßnahmen, deren Wirtschaftlichkeit geringfügig über 0 €/t CO₂-Minderung liegen, sollten auf Förderwürdigkeit geprüft werden, um ggf. mit finanziellen Anreizen gepaart mit informatorischen Maßnahmen auch diese Minderungspotenziale heben zu können. Bei Maßnahmen mit hohen CO₂-Minderungskosten ist generell zu klären, ob eine wirtschaftliche Förderung sinnvoll ist bzw. eine Umsetzung überhaupt in Frage kommt. Neben finanziellen und informatorischen Maßnahmen können auch regulatorische Maßnahmen seitens der Stadtplaner bzw. Stadtverwaltung ergriffen werden, wobei diese insbesondere für Neubaugebiete in Frage kommen (z.B. Anschlusspflicht Nahwärmeversorgung). Die CO₂-Minderungskostenkurve zeigt ebenfalls, dass ambitionierte Ziele, wie sie beispielsweise im „Klimaschutzplan 2050“ der Bundesregierung, eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 85 % im Vergleich zu 1990 bis 2050 bzw. als Zwischenziel 55 % bis 2030 nicht erreicht werden [76]. Dies liegt jedoch auch daran, dass mit der vorgeschlagenen Methode keine flächendeckenden und

²⁰ Wird als Referenz der bestehenden Nahwärmeversorgung ein Heizwerk angenommen, ergeben sich noch größere CO₂-Einsparpotenziale (>4 kt CO₂).

tiefgreifenden Transformationsprozesse des Energiesystems berücksichtigt werden, wie sie zur Erreichung der klimapolitischen Ziele notwendig sind.

Die beiden Fallstudien zeigen, dass die Ansatzpunkte der CO₂-Einsparungen und die Akteure, die bei der Umsetzung der Maßnahmen beteiligt sind, stark von der betrachteten Modellregion abhängen. Für den Fall Metzingen, einem durch Wohngebäude und Nichtwohn-Gebäude gleichermaßen geprägten Bilanzraum spielen gebäudeseitigen Maßnahmen eine bedeutende Rolle bei der Realisierung der gesetzten Emissionsziele. Dabei können aufgrund der heterogenen Verbraucher- und Erzeugerstruktur auch die übergreifenden Maßnahmen einen bedeutenden Beitrag leisten. Hindernd wirkt sich die Bestandsstruktur und die damit verbundenen niedrigen Durchdringungsraten der Maßnahmen auf die Hebung der CO₂-Einsparpotenziale aus. Im Vergleich dazu liegen die kumulierten Durchdringungsraten im Neubaugebiet Berlin TXL auf einem höheren Niveau. Darüber hinaus ist die Struktur der CO₂-Minderungskostenkurve für diesen Bilanzraum geprägt von gebäudeseitigen Maßnahmen. Verkehrsseitig sowie im Bereich der übergreifenden können nur geringe CO₂-Einsparungen erzielt werden. In beiden Fallstudien ist auch erkennbar, dass die wirtschaftlichen Einsparpotenziale überproportional durch die Umsetzung von übergreifenden Maßnahmen erreicht werden können. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die übergreifenden Maßnahmen oft durch mehrere Akteure umgesetzt werden müssen und eine Koordination zwischen diesen oft schwierig ist. Daher besteht noch ein hohes wirtschaftliches Potenzial in diesem Bereich. Der heute wirtschaftliche Anteil der Maßnahmen, die einem konkreten Bereich zugeordnet werden können, ist hingegen schon zu großem Anteil umgesetzt.

Im Allgemeinen zeigt die CO₂-Minderungskostenkurve sowohl der Stadtverwaltung als auch den Stadtentwicklern, welche finanziellen Mittel theoretisch (vor dem Hintergrund der getroffenen Annahmen und Vereinfachungen des Ansatzes) aufzuwenden sind, um ein gesetztes CO₂-Minderungsziel zu erreichen. Es empfiehlt sich damit zu prüfen, ob ein bereits gesetztes CO₂-Minderungsziel überhaupt sinnvoll ist, wenn die letzten Prozente der CO₂-Minderung (z. B. von 80% auf 90%) mit unverhältnismäßig hohen CO₂-Minderungskosten verbunden wären. Umgekehrt kann geprüft werden, welche maximale CO₂-Minderung mit einem gegebenen volkswirtschaftlichen Investitionsbudget zu erreichen ist.

Wie gezeigt wurde, bestehen Wechselwirkungen einzelner CO₂-Minderungsmaßnahmen sowohl innerhalb eines Sektors (z. B. Gebäudesanierung und Erneuerung der Heizungsanlage) als auch sektorübergreifend (z. B. Nahwärmeversorgung und Gebäudesanierung), die dazu führen, dass das CO₂-Minderungspotenzial in Summe geringer ausfällt als die Einzelpotenziale aufsummiert. Daher empfiehlt es sich von Seiten der Stadtverwaltung bzw. Stadtplanern die im Rahmen von Klimaschutzkonzepten ermittelten CO₂-Minderungspotenziale dahingehend zu überprüfen, ob die angegebenen Minderungspotenziale Wechselwirkungen bereits berücksichtigen, damit das Gesamt-minderungspotenzial des Konzeptes nicht überschätzt wird. Falls ja, könnte sich zeigen, dass ein bestehendes Konzept nicht ausreichend ist, um die gesetzten CO₂-Ziele zu erreichen. Dies hätte zur Folge, dass Nachbesserungen notwendig sind, z.B. mit neuen Maßnahmen bzw. die bestehenden Maßnahmen mit größerer Wirkungstiefe umzusetzen.

4.6.4 Vergleich SCIM Modellierungsergebnisse mit EN-easy

Fallstudie Metzingen

Im SCIM ergibt sich im Zieljahr ein Delta zwischen Basisszenario und Zielszenario von ca. 57 kt an CO₂-Emissionen, EN-easy weist in Summe ein CO₂-Einsparpotenzial von 55 kt aus, (davon sind allerdings schon 21 wirtschaftlich realisierbar, daher im Zieljahr des Basisszenarios schon enthalten). Davon können 34 kt CO₂ auf die Einsparmaßnahmen basierend auf dem EN-easy Tool zurückgeführt werden. Weitere 17 kt CO₂ Einsparungen ergeben sich aus dem Sektor der Industrie, der im EN-easy nicht berücksichtigt wurde, allerdings im SCIM in der Metzingen Fallstudie abgebildet ist. Weitere CO₂ Einsparungen werden im Verkehrssektor realisiert, die im Zusammenhang mit technischem Fortschritt stehen, der die Nutzung von neuen Fahrzeugen ermöglicht. Diese Auswirkung auf die Emissionen im EN-easy wurden nicht explizit berücksichtigt. Der technische Fortschritt im Gebäudebereich ist jedoch im EN-easy abgebildet mit der Maßnahme „Erneuerung der Anlagentechnik“.

Fallstudie Berlin TXL

Im SCIM ergibt sich im Zieljahr ein Delta zwischen Basisszenario und Zielszenario von ca. 15 kt an CO₂-Emissionen, EN-easy weist in Summe ein CO₂-Einsparpotenzial von 12,5 t aus, (davon sind allerdings schon 2 kt wirtschaftlich realisierbar, daher im Basisszenario im Zieljahr im Rahmen der Optimierung schon enthalten. Der Mehreinsparungen in Höhe von 4,5 t CO₂ (=15-[12,5-2]) sind, wie in der Fallstudie Metzingen vor allem auf den technischen Fortschritt im Verkehrssektor zurückzuführen.

Für beide Fallstudien kann festgehalten werden, dass EN-easy und der damit einhergehende Ansatz sowohl für den Bestand als auch für den Neubau einen Großteil der technisch möglichen sowie lokal realisierbaren CO₂-Einsparmaßnahmen abbildet.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung eines einfachen Berechnungstools für die städtische Energieplanung (EN-easy), um eine breite Anwendung systemanalytischer Instrumente auf der kommunalen Ebene zu ermöglichen. Vor dem Hintergrund der zunehmenden Komplexität der städtischen Energieplanung infolge zunehmender Verflechtung von Energieversorgung, Gebäuden und Verkehr (z. B. Nahwärmekonzepte oder Elektromobilität) wurden diese Bereiche im EN-easy-Tool integral erfasst, um nicht nur Einzel-Maßnahmen, sondern auch übergreifende Maßnahmen für den Klimaschutz zu berücksichtigen. Mit dem EN-easy-Tool steht den Energie- und Stadtplanern ein unterstützendes Hilfsmittel für die strategische Vorplanung von Klimaschutzmaßnahmen zur Seite. Ausgehend von Kennzahlen können mit wenig Aufwand erste Energie- und CO₂-Bilanzen als auch CO₂-Einsparpotentiale abgeschätzt und Empfehlungen für die Umsetzungsreihenfolge von Klimaschutzmaßnahmen gegeben werden. Gleichzeitig kann der finanzielle Aufwand für die Einsparung von CO₂-Emissionen über die spezifischen CO₂-Vermeidungskosten abgeschätzt werden. Das EN-easy-Tool kann somit als Ausgangspunkt tiefergehender Analysen und nachfolgender Realisierung von Treibhausgasreduzierungsmaßnahmen angesehen werden.

Neben der Entwicklung eines vereinfachten Instruments für Stadtplaner kam ein komplexes Tool aus der Wissenschaft zum Einsatz. Ein lineares Energiesystemmodell ermittelt die wirtschaftlich optimale Energieversorgungsstruktur einer Stadt bei Vorgabe von Klimaziele. Anhand von zwei Fallstudien wurden unterschiedliche Gebiete systemanalytisch bewertet. Einerseits einer durch Bestandsbauten geprägter Bilanzraum (Stadt Metzingen) und andererseits ein durch Neubauten gekennzeichnetes Quartier (Berlin TXL). Für die Fallstudie Metzingen zeigte sich, dass das Klimaziel bis 2030 eine deutliche Veränderung in der Versorgungsstruktur des Energiesystems erfordert. Stromseitig kommt dem Ausbau von Photovoltaik-Anlagen eine besondere Bedeutung zu, während wärmeseitig die Integration von Solarthermie in die Wärmeversorgung als auch die energetische Nutzung von Biomasse kostengünstige Dekarbonisierungsoptionen darstellen. Gegenüber einem Basisszenario belaufen sich die jährlichen Mehrkosten pro Einwohner im Klimazielszenario auf durchschnittlich ca. 400 EUR₂₀₁₀. Die durchschnittlichen, spezifischen CO₂-Vermeidungskosten betragen dabei rund 470 EUR₂₀₁₀/t CO₂. Demgegenüber resultieren für die Fallstudie Berlin TXL mit rund 900 EUR₂₀₁₀/t CO₂ im Neubau noch höhere Vermeidungskosten, da zusätzliche Maßnahmen mit hohen Investitionen und geringem verbleibendem CO₂-Einsparpotential verbunden sind. Für die Umsetzung der Maßnahmen zur Realisierung der Treibhausgasreduzierungsmaßnahmen wird jeweils die besondere Rolle der Stadtverwaltung und der lokalen Energieversorger als Akteure der Energiewende hervorgehoben. Dabei kann die Stadt nicht nur als Planer von ganzheitlichen Energiekonzepten (Energieversorgung, Gebäude, Verkehr) direkten Einfluss auf die Stadtentwicklung nehmen, sondern auch über Informationskampagnen klimafreundliche Investitionen anstoßen. Lokale Energieversorger können über innovative Nahwärmekonzepte (z. B. Integration von Solarthermie) die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung vorantreiben.

EN-easy als einfaches Werkzeug für Stadt- und Energieplaner kann die Grundlage für mehrere Weiterentwicklungen sein. Eine Möglichkeit besteht in der Erhöhung der Detaillierung der Datensätze. So können die Zensus- und BBSR-Daten durch ggf. vorhandene Daten aus lokalen Studien ersetzt werden, um detailliertere Ergebnisse zu erhalten. Gleichzeitig eröffnet eine umfassende Funktion der Dateneingabe die Möglichkeit, das EN-easy-Tool als Monitoring-Tool für Energie- und CO₂-Bilanzen

einzusetzen. Weiterhin wäre die Erweiterung des bisherigen Maßnahmenportfolios durch neue innovative Klimaschutzmaßnahmen oder bisher unberücksichtigte energetische Aspekte denkbar. So könnten beispielsweise neben E-Mobilität auch wasserstoffbasierte Technologien berücksichtigt werden. In der sektoralen Bilanzierung kann der gewerbliche Verkehr und die Industrie Gegenstand einer Erweiterung sein. Weiterhin können bisher getroffene Annahmen und Vereinfachungen durch tieferegehende Analysen verbessert werden. So kann eine exakte Quantifizierung der bisher abgeschätzten Wechselwirkungen unterschiedlicher Klimaschutzmaßnahmen auf das gesamte Treibhausgasreduzierungspotential eine höhere Güte der Ergebnisse im Hinblick auf Wechselwirkungseffekte hervorbringen.

Für die Realisierbarkeit von Maßnahmen für den Klimaschutz ist es auch denkbar, die Entscheidungsträger und ihre finanziellen Möglichkeiten in den Fokus zu rücken. So können in zukünftigen Analysen im für den Klimaschutz bedeutsamen Wohngebäudebestand die Haushalte nach Einkommensgruppen differenziert werden, um die finanzielle Kapazität für Klimaschutzmaßnahmen abzuschätzen und gleichzeitig etwaigen Förderbedarf bzw. auch Nicht-Förderbedarf zu identifizieren. Hierfür erforderliche Kennzahlen könnten aus Studien zum Haushaltseinkommen abgeleitet werden (z. B. Einkommens- und Verbrauchsstichprobe (EVS) oder Sozio-ökonomischen Panels (SOEP)). Im Weiteren könnten im EN-easy-Tool finanzielle Fördermittel (z.B. Marktanreizprogramm, KfW-Zuschüsse) ergänzt und damit in der CO₂-Vermeidungskostenkurve berücksichtigt werden.

Weiterentwicklungen im Energiesystemmodell sind analog möglich, so dass die finanziellen Möglichkeiten der Akteure Teil der Optimierungslösung sind. Aus Systemsicht kostenminimale Dekarbonisierungspfade unter Berücksichtigung der Budgets der Akteure können zu realitätsnäheren Ergebnissen im Hinblick auf die Umsetzbarkeit führen.

Aus verkehrlicher Sicht besteht die Schwierigkeit in der Integration verkehrlicher Belange in die energetische Betrachtung von Stadtquartieren. Parallel zu den beschriebenen Analysen soll eine kritische Betrachtung über die Herausforderungen der Integration verkehrlicher Belange in die energetische Betrachtung von Stadtquartieren erstellt werden. Eine gebäudescharfe Betrachtung des Verkehrs ist nicht möglich, da der Verkehr nur bedingt einem festen Ort zugewiesen werden kann und immer auf ein Straßennetz umzulegen ist. Ein einheitliches Straßennetz, welches den notwendigen Detailgrad zur Berechnung der CO₂-Vermeidungspotenziale für beliebige Bilanzräume für ganz Deutschland beinhaltet lag für dieses Forschungsprojekt nicht vor oder ist nur in Teilen käuflich erhältlich. Daten zum übergeordneten Straßennetz (Autobahnen, Bundesstraßen) existieren, reichen jedoch für die strukturelle und vor allen Dingen einheitliche und flächenmäßige Analyse kleinräumiger Bilanzräume oder der kommunalen Ebene nicht aus. Für den Bereich Verkehr besteht aktuell in diesem Punkt noch weiterer Forschungsbedarf.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Hegger und J. Dettmar, Energetische Stadtraumtypen - Strukturelle und energetische Kennwerte von Stadträumen, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2014.
- [2] Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit (StMUG), Leitfaden Energienutzungsplan, München, 2011.
- [3] Institut für Wohnen und Umwelt; Loga, Tobias, TABULA - Typology Approach for Building Stock Energy Assessment, Darmstadt, 2012.
- [4] Institut für Wohnen und Umwelt, Deutsche Wohngebäudetypologie - Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden, Darmstadt, 2015.
- [5] S. Bonk, Methodology for the Assessment of the Hot Water Comfort of Factory Made Systems and Custom Built Systems, Stuttgart, 2012.
- [6] A. Braun, Stromspiegel für Deutschland 2016, Berlin, 2016.
- [7] BDEW Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft e.V., Stromverbrauch im Haushalt, Berlin, 2016.
- [8] Destatis,
<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltoekonomieGesamtrechnungen/MaterialEnergiefluesse/Tabellen/StromverbrauchHaushalte.html>,
abgerufen 15.10.2016.
- [9] N. Pflugradt, LoadProfilGenerator V 4.5.0.24479, Chemnitz, 2014.
- [10] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, „Mobilität in Deutschland (MID) 2008,“ 2010.

- [11] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, „Raumbeobachtung,“ 2009.
- [12] Kraftfahrt-Bundesamt, „Bestand an Personenkraftwagen am 1.Januar 2016 gegenüber 1.Januar 2015 nach Segmenten und Modellreihen (Statistische Mitteilung des Kraftfahrt-Bundesamtes),“ 2016.
- [13] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, „Deutsches Mobilitätspanel (MOP) - Wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen Bericht 2015/2016: Alltagsmobilität und Fahrleistung,“ 2016.
- [14] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Begriffsbestimmungen Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb, Köln, 2012.
- [15] Volkswagen, „Der Golf,“ *Technik und Preise*, 10 November 2016.
- [16] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, „Verflechtungsprognose 2030,“ 2014.
- [17] ETSAP und IEA, Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP), Contributing to the Kyoto Protocol, Summary of Annex VII (1999-2002), 2002.
- [18] Remme, Goldstein, Schlenzig und Schellmann, „MESAP/-TIMES - Advanced decision support for energy and environmental planning,“ in *Operations Research Proceedings*, Berlin, Springer-Verlag, 2001, pp. pp.59-66.
- [19] Blesl et al., Verfahren zur Entwicklung einer digitalen Wärmebedarfskarte, Kurzbericht, Frankfurt: AGFW, 2010.
- [20] J. Welsch und M. Blesl, „Modellierung von Energiespeichern und Power-to-X-Technologien mit dem europäischen Energiesystemmodell TIMES PanEU,“ in *VDI Optimierung in der Energiewirtschaft*, 2015.
- [21] R. Born, N. Diefenbach und T. Loga, „Energieeinsparung durch Verbesserung des Wärmeschutzes und Modernisierung der Heizungsanlage für 31 Musterhäuser der Gebäudetypologie,“ Institut für Wohnen und Umwelt (IWU), Darmstadt, 2003.

- [22] L. Brodecki und M. Blesl, „Modellgestützte Bewertung von Flexibilitätsoptionen und Versorgungsstrukturen eines Bilanzraums mit hohen Eigenversorgungsgraden mit Energie,“ Symposium Energieinnovation, Graz, 2018.
- [23] J. Bracke, J. Tomaschek, L. Brodecki und U. Fahl, „Möglichkeiten und Grenzen einer autarken Energieversorgung von Mehrfamilienhäusern,“ Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Essen, 2016.
- [24] J. Bracke, J. Tomaschek, L. Brodecki und U. Fahl, „Techno-ökonomische Bewertung von Energie-Autarkie für die Energieversorgung von Einfamilienhäusern,“ Zeitschrift für Energiewirtschaft, Wiesbaden, 2016.
- [25] Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, „Mobilität in Deutschland,“ Berlin und Bonn, 2008.
- [26] J. Liebhart, „Simulation aktorenspezifischer, zeitlich hochaufgelöster Mobilitätsganglinien zur Analyse des Einflusses von Elektromobilität auf Energiesystemmodelle,“ Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2017.
- [27] Destatis - Statistisches Bundesamt, „Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserentsorgung,“ Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2016.
- [28] H. Brauer, Handbuch des Umweltschutzes und der Umweltschutztechnik; Band 4: Additiver Umweltschutz: Behandlung von Abwässern, Berlin / Heidelberg: Springer-Verlag, 1996.
- [29] J. Welsch, U. Fahl, M. Blesl und K. Hufendiek, „Modellierung von Energiespeichern und Power-to-X-Technologien mit dem europäischen Energiesystemmodell TIMES PanEU,“ 14. Symposium Energieinnovation, Graz, 2016.
- [30] L. Brodecki, U. Fahl, J. Tomaschek, W. Hauser, A. Salah, B. Schober, A. Siebenlist, M. Baumann, R. Graf und U. Pfenning, „Metzingen will 2! Integriertes Klimaschutzkonzept für die Stadt Metzingen,“ Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2016.

- [31] Statistisches Bundesamt, „Zensus 2011,“ [Online]. Available: www.zensus2011.de. [Zugriff am 2013].
- [32] Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, „Potentialatlas Erneuerbaren Energien,“ LUBW, Karlsruhe, 2014.
- [33] L. Brodecki, U. Fahl, J. Tomaschek, M. Wiesmeth, F. Gutekunst, A. S. A. Siebenlist, M. Baumann, R. Graf, L. Brethauer, R. Horn, W. Hauser, M. Sonnberger, C. León, U. Pfenning und M. O’Sullivan, „Analyse des Energie-Autarkiegrades unterschiedlich großer Bilanzräume mittels integrierter Energiesystemmodellierung,“ Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Stuttgart, 2016.
- [34] Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, „Bevölkerung und Gebiet im Überblick, Stadt Metzingen,“ 2011.
- [35] Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI); Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik TU München; Bernd Geier; GfK Retail and Technology GmbH; IREES GmbH, Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2011 - 2013, Karlsruhe, München, Nürnberg, 2015.
- [36] Statistisches Landesamt Baden Württemberg, 2016. [Online]. Available: <http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/>. [Zugriff am 01 06 2016].
- [37] Fritz Technik GmbH & Co. KG, „Machbarkeitsstudie zur Nutzung Erneuerbarer Energien in Metzingen,“ Bad Urach, Auftraggeber Stadtwerke Metzingen, März 2014.
- [38] „Arbeitskreis für Energie und Klima,“ 28 09 2016. [Online]. Available: http://ake-metzingen.info/?page_id=36. [Zugriff am 28 September 2016].
- [39] T. Frank, „Abwasser-Wärmenutzung am Beispiel des Abwassersammlers Ermstal,“ Fakultät Versorgungs- und Umwelttechnik der Hochschule Esslingen, Esslingen, 2012.
- [40] Prognos, EWI, GWS, „Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose,“ Basel-Köln-Osnabrück, 2014.

- [41] M. Schlesinger , P. Hofer , A. Kemmler, A. Kirchner, S. Koziel, A. Ley, D. Lindenberger und C. Lutz, „Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose,“ Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Basel, Köln, Osnabrück, 2014.
- [42] Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, „Energiewende-Ziele 50/80/90,“ [Online]. Available: <https://energiewende.baden-wuerttemberg.de/de/wissen/energiewende-ziele-50-80-90/unsere-kernziele/>. [Zugriff am 13.02.2018].
- [43] Umweltbundesamt, P. Icha und G. Kuhs, „Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990-2016,“ Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2017.
- [44] International Energy Agency, „World Energy Outlook 2015,“ Paris, 2015.
- [45] M. Stehle und M. Blesl, „Erweiterung der Investitionsentscheidungen in der Energiesystemmodellierung,“ Symposium Energieinnovation, Graz, 2017.
- [46] EDF Deutschland, Tegel Projekt GmbH, EIFER, TU Berlin, Drees & Sommer, „Räumliche Energiesimulation für den Standort Tegel - RES TXL,“ Berlin TXL, Berlin, 2015.
- [47] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), „Hinweise zur Schätzung des Verkehrsaufkommens von Gebietstypen,“ 2006.
- [48] Tegel Projekt GmbH, EDF DE, EIFER, TU Berlin, Drees & Sommer, „Spatial Energy Simulation for Berlin Tegel - RES TXL,“ 2015. [Online]. Available: <https://www.eifer.kit.edu/Spatial-Energy-Simulation-for-Berlin-Tegel-RES-TXL>. [Zugriff am 12.02.2016].
- [49] Universität für Bodenkultur Wien, Technische Universität Graz, STUDIA-Schlierbach, „ELAS - Energetische Langzeitanalysen für Siedlungsstrukturen,“ 2011. [Online]. Available: <http://www.elas-calculator.eu/>. [Zugriff am 12.02.2016].

- [50] Amt der NÖ Landesregierung; Emrich Consulting ZT-GmbH; Universität für Bodenkultur Wien, „Energieausweis für Siedlungen,“ 2014. [Online]. Available: www.energieausweis-siedlungen.at/. [Zugriff am 12. 02. 2016].
- [51] Österreichisches Institut für Raumplanung, „Energieeffizientesiedlung,“ 2010. [Online]. Available: www.energieeffizientesiedlung.at/. [Zugriff am 12. 02. 2016].
- [52] M. Blesl und M. Stehle, „Annex TS 1: Low Temperature District Heating for Future Energy Systems - Subtask A: Methods and Planning Tools,“ 2017.
- [53] D. Schmidt und A. Kallert, „Annex TS 1 Low Temperature District Heating for Future Energy Systems,“ AGFW-Project Company, Frankfurt am Main, 2017.
- [54] Zentrale Stelle Hauskoordinaten, Hausumringe und 3D-Gebäudemodelle (ZSHH) beim Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung Bayern, *Amtliche 3D-Gebäudemodelle in den Ausprägungen LoD1 und LoD2 (LoD1-DE, LoD2-DE)*.
- [55] Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), *Dienst TopPlus-Web-Open*.
- [56] M. Herrmann, S. Weyland, M. Stehle, U. Fahl, M. Müller und D. Schreyer, „Integriertes Klimaschutzkonzept für die Stadt Freiberg am Neckar (Klima-FaN), Band 1- Bericht,“ Freiberg am Neckar, 2015.
- [57] „Destatis Zensus,“ Statistisches Bundesamt, [Online]. Available: https://www.destatis.de/DE/Methoden/Zensus_/Zensus.html. [Zugriff am 01 11 2017].
- [58] Institut Wohnen und Umwelt, Deutsche Wohngebäudetypologie - Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden, Darmstadt, 2015.
- [59] Arbeitskreis Energieberatung , „Stromverbrauch in Bürogebäuden Energiecontrolling und Optimierung,“ Institut Wohnen und Wohnen GmbH, Darmstadt , 2004.
- [60] M. Blesl, U. Fahl und S. Kempe, „CO₂-Vermeidungskosten von Maßnahmen im Baubereich,“ *Heiztechnik Klimatechnik Sanitärtechnik Zeitschrift*, November 2006.

- [61] Statistisches Bundesamt, „Energiepreisentwicklung“, Statistisches Bundesamt, 2016.
- [62] energieheld.de, „www.energieheld.de“, 2017. [Online]. Available: <https://www.energieheld.de/heizung/pelletheizung/pellets/preise>.
- [63] Flüssiggas-Verbraucher-Portal, „www.flüssiggas-verbraucher.de“, 2017. [Online]. Available: <https://www.fluessiggas-verbraucher.de/preise>.
- [64] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), „Entwicklung von Energiepreisen und Preisindizes und Entwicklung von monatlichen Energiepreisen - Tabellen 26 und 26a der Gesamtausgabe Energiedaten“, BMWi, 2018.
- [65] Bundesministerium für Verkehr Bau und Stadtentwicklung, BMVBS, Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Wohngebäuden, Berlin, 2012.
- [66] G. Guzek, Zur Energieeinsparung in Heizungsanlagen durch den hydraulischen Abgleich, Dresden: TUDpress Verlag der Wissenschaften, 2010.
- [67] K. Jagnow, i. Sell und D. Wolff, Investitionskostenfunktionen TGA, 2001.
- [68] Gebäude Energieberater, Stundensätze: Es geht aufwärts, Stuttgart: Alfons W. Gentner Verlag GmbH & Co. KG, März 2016.
- [69] W. van Sark, P. Muizebelt, J. Cace, A. de Vries und P. de Rijk, „Grid parity reached for consumers in the Netherlands“, *IEEE*, 2011.
- [70] FOCUS-Online, „Bis 2030 ist jeder Dritte Neuwagen ein E-Auto“, 2016.
- [71] Nationale Plattform Elektromobilität, „Die Ziele - Erfahren Sie mehr über Motivation und Ziele“, 2016.
- [72] Verband derAutomobilindustrie, „Prognose 2030 Zugelassene PKW in Deutschland“, Berlin, 2016.

- [73] N. Hartmann, „Rolle und Bedeutung der Stromspeicher bei hohen Anteilen erneuerbarer Energien in Deutschland,“ Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart, Stuttgart, 2013.
- [74] A. David, „Large heat pumps in European district heating systems,“ *En+Eff-22nd International Trade Fair and Congress*, 20 04 2016.
- [75] KfW, „Energetische Stadtsanierung - Zuschuss (432),“ Frankfurt am Main, 2016.
- [76] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, „Klimaschutzplan 2050,“ [Online]. Available: https://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf. [Zugriff am 17 11 2017].
- [77] M. Blesl et al., Verfahren zur Entwicklung einer digitalen Wärmebedarfskarte, Kurzbericht, Frankfurt: AGFW, 2010.
- [78] F. Online, „Bis 2030 ist jeder Dritte Neuwagen ein E-Auto,“ 2016.
- [79] Tomaschek, Fahl, Brodecki, Gutekunst, Siebenlist, Sala, Baumann, Graf, Brethauer, Hirn, Hauser, Léon, Pfenning und O`Sullivan, „Analyse des Energie-Autarkiegrades unterschiedlich großer Bilanzräume mittels integrierter Energiesystemmodellierung,“ Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung - BWPLUS, Stuttgart, 2015.
- [80] Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, „Mobilität in Deutschland,“ Berlin und Bonn, 2008.
- [81] U. Pfenning und R. Schröter, „Von Energiewenden und neuen Energiebürgern,“ in *ISSN 1867 9935*, Neu-Isenburg, Genossenschaftsverband e.V. Netzwerk Magazin für Kooperation & Management, Ausgabe 02/2016 , 2016, pp. S.10-12.
- [82] W. Rickerson, T. Couture, G. Barbose, D. Jacobs, G. Parkinson, E. Chessin, A. Belden, H. Wilson und H. Barrett, „Residential Prosumers - Drivers and Policy Options,“ IEA - RETD, Kyoto, 2014.

- [83] BMWi, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Energie der Zukunft - Vierter Monitoring-Bericht zur Energiewende,“ Berlin, 2015.
- [84] U. Remme, „Zukünftige Rolle erneuerbarer Energien in Deutschland: Sensitivitätsanalyse mit einem linearen Optimierungsmodell,“ Dissertation, Stuttgart, 2006.
- [85] R. Loulou, A. Lehtilä, A. Kanudia, U. Remme und G. Goldstein, „Documentation for the TIMES Model Part II,“ Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP), 2016.
- [86] M. Blesl, „Kraft-Wärme-Kopplung im Wärmemarkt Deutschlands und Europas - eine Energiesystem- und Technikanalyse,“ Forschungsbericht des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart, 2011.
- [87] Hessisches Landesamt für Straßen- und Verkehrswesen, „Abschätzung des Verkehrsaufkommens durch Vorhaben der Bauleitplanung, Dr.-Ing.Dietmar Bosserhoff,“ 2016.
- [88] M. Pfisterer, „Was tut sich in der Outlet-City Metzingen im Jahr 2018?,“ *Reutlinger General-Anzeiger*, Nr. 30.12.2017, 2017.
- [89] Nationale Plattform Elektromobilität, „Nationale Plattform Elektromobilität,“ 2016. [Online]. Available: <http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/hintergrund/die-ziele/>. [Zugriff am 18 05 2018].
- [90] W. Weimer-Jehle, „Cross-Impact Balances: A System-Theoretical Approach to Cross-Impact Analysis,“ *Technological Forecasting and Social Change* 77:3, pp. 334-361, 2006.
- [91] Bundesministerium für Finanzen, „Kfz-Steuer-Rechner,“ [Online]. Available: https://www.bundesfinanzministerium.de/Web/DE/Service/Apps_Rechner/KfzRechner/KfzRechner.html. [Zugriff am 15 März 2018].

A. Anhang: Fallstudien

Detaildaten Fallstudie Metzingen

Tabelle 52: Endenergiebedarf Metzingen Ausgangszustand – Detailanalyse

2012 / [GWh]	Benzin	Diesel	Biokraft- stoffe	Kohlen	Erdgas / (CNG+LPG)	Heizöl	Holz/ Pellets	Nahwärme	Sonst. EE	Strom	Gesamt
Industrie ¹	-	-	-	4,8	65,0	3,7	-	-	-	35,5	109,0
GHD ²	-	-	-	-	32,3	13,3	-	4,0	-	35,2	84,8
Private Haushalte ³	-	-	-	0,5	80,9	46,4	6,8	12,6	4,0	35,4	186,6
Öffentliche Liegenschaften ¹	-	-	-	-	8,1	0,9	2,9	-	0,9	3,5	16,3
Verkehr ³	27,4	48,3	4,8	-	0,3	-	-	-	-	3,5	84,3
Summe	27,4	48,3	4,8	5,3	186,6	64,3	9,7	16,6	4,9	113,1	481,0

Tabelle 53: Tabellarische Form der CO₂-Minderungskostenkurve der Klimaschutzmaßnahmen für die Fallstudie Metzgingen (1/2)

Kürzel	Maßnahmenname	€/t_CO ₂ /a	CO ₂ -Erparnis kt
Ü12	Straßenbeleuchtung	-590	0.287
G13	Energieberatung	-489	0.539
Ü07	Temperaturabsenkung von Wärmenetzen zur Effizienzsteigerung	-407	0.789
Ü06	Nutzung von Skaleneffekten durch (kooperative) Nutzung von PV-Freiflächen und großen Solarthermie-Anlagen	-376	1.272
G26	Hydraulischer Abgleich	-374	0.353
G27	Sanierung Wärme-/Kälteübergabe	-359	0.590
G04	Sanierung Außenwand	-304	0.265
G05	Sanierung Standard	-261	0.449
G01	Sanierung Fenster	-253	0.051
G06	Sanierung Erweitert	-227	0.714
V03	Carpooling	-218	0.032
G23	Erneuerung Heizungsanlage	-215	0.925
G02	Sanierung Dach	-197	0.127
G21	Energieberatung (niedrige Umsetzung)	-187	0.325
Ü02	Demandside Management im Verkehr - Haushalte	-182	0.345
G07	Erneuerung Heizkessel	-157	1.544
G19	Betriebsoptimierung	-143	0.286
G17	Energieaudit geringinvestiv	-65	0.143
G08	Erneuerung Heizkessel + Solar	-10	1.616
V01.1	Umweltverbund für Haushalte	0	0.253
V01.2	Umweltverbund für GHD	0	0.051

Tabelle 54: Tabellarische Form der CO₂-Minderungskostenkurve der Klimaschutzmaßnahmen für die Fallstudie Metzgingen (2/2)

Kürzel	Maßnahmenname	€/t_CO ₂ /a	CO ₂ -Erparnis kt
Ü03	Demandside Management im Verkehr - GHDI	52	0.061
G14	PV-Anlage mit Batteriespeicher	57	2.633
G28	Sanierung Wärme-/Kälteverteilung	68	0.320
G03	Sanierung unterste Geschossdecke	89	0.022
G09	Tausch Umwälzpumpen	103	0.212
Ü10	Batteriespeicher	103	1.053
G24	PV-Anlage	151	2.890
Ü09	Abwasserwärmenutzung	177	0.235
Ü01	Förderung von PV-Carports	238	0.546
G15	Sanierung NWG einfach	267	0.599
G16	Sanierung NWG komplett	385	0.955
Ü11	Warmwasserspeicher zur Integration hoher Anteile Erneuerbarer Energien	439	0.319
G12	Elektrogeräte A++	541	1.692
G34	Einrichtung eines Monitoring- und Steuerkonzepts	575	0.642
Ü05	Kooperative Energiebereitstellung für Wohn- und Nichtwohngebäude - Wärmepumpen	775	0.162
Ü04	Kooperative Energiebereitstellung für Wohn- und Nichtwohngebäude - KWK	926	1.126
V02.2	Förderung von E-Mobilität in GHD	1162	0.513
V02.1	Förderung von E-Mobilität in Haushalten	1163	2.075
G29	Bezug regeneratives Heizöl	1225	0.070
G11	Elektrogeräte nicht alle A++	1654	2.372
Ü08	Ausbau solarunterstützter Nahwärme - LowEx Netze	1,875	0.331
G38	Nutzung regeneratives Heizöl	1966	0.105
G25	Tausch Umwälzpumpen	2235	0.004
G36	Reduzierung des Kältebedarfs durch aktive Nachtlüftung (ggf. inkl. BTA)	5355	0.016
G35	Optimierung des außenliegenden Sonnenschutzes	7980	0.005
G10	Hydraulischer Abgleich	10252	0.005

Detaildaten Fallstudie Berlin TXL

Tabelle 55: Tabellarische Form der CO₂-Minderungskostenkurve der Klimaschutzmaßnahmen für die Fallstudie Berlin TXL

Kürzel	Maßnahmenname	€/t_CO ₂ /a	CO ₂ -Ersparnis kt
Ü07	Effizienzsteigerung in bestehenden Nahwärmenetzen	-534	1.00
Ü02	Demandside Management im Verkehr - Haushalten	-182	0.01
V03	Carpooling	-97	0.032
G14	Nutzung PV-Anlage	-37	0.103
V01.1	Umweltverbund für Haushalten	0	0.008
V01.2	Umweltverbund für GHD	0	0.084
Ü03	Demandside Management im Verkehr - GHDI	52	0.14
G31	Bau nach Green-Building-Gesichtspunkten	78	6.33
Ü10	Stromspeicher	102	0.08
Ü01	Förderung von PV-Carports	167	0.15
G24	PV-Anlage	201	7.36
G37	Verbesserter Neubaustandard	211	0.029
Ü09	Abwasserwärmenutzung	216	0.11
G33	Einsatz von geregelter natürlicher Lüftung statt RLT	414	1.68
Ü05	Kooperative Energiebereitstellung für Wohn- und Nichtwohngebäude - Wärmepumpen	1166	0.06
G30	Nutzung regenerativer Wärmesenken	1344	0.45
Ü04	Kooperative Energiebereitstellung für Wohn- und Nichtwohngebäude - KWK	1472	1.93
V02.1	Förderung von E-Mobilität in Haushalten	1593	0.049
V02.2	Förderung von E-Mobilität in GHD	1669	0.573
G12	Elektrogeräte A++	1830	0.069
G32	Einsatz von Niedertemperatur Flächenheizungen	2449	0.37
G36	Reduzierung des Kältebedarfs durch aktive Nachtlüftung (ggf. inkl. BTA)	2460	0.05
G35	Optimierung des außenliegenden Sonnenschutzes	3683	0.01
G34	Einrichtung eines Monitoring- und Steuerkonzepts	12919	0.08

B. Anhang: Strukturdaten En-Easy

MID-Daten der 9 BBSR Raumtypen

Tabelle 56: Agglomerationsraum Kernstadt (eigene Berechnung nach [10])

BBSR Raumtyp:	Agglomerationsraum Kernstadt
Modal Split Anteil MIV Zweck Wohnen:	49,66 %
Wegelänge Zweck Wohnen:	13,77 km
Wegeanzahl Zweck Wohnen:	1,68 Wege
Besetzungsgrad Zweck Wohnen:	1,53 Pers/Fz
Betrachtungszeitraum Zweck Wohnen:	365 Tage
Modal Split Anteil MIV Zweck Arbeit und Ausbildung:	58,07 %
Wegelänge Zweck Arbeit und Ausbildung:	17,88 km
Wegeanzahl Zweck Arbeit und Ausbildung:	1,67 Wege
Besetzungsgrad Zweck Arbeit und Ausbildung:	1,54 Pers/Fz
Betrachtungszeitraum Zweck Arbeit und Ausbildung:	230 Tage
Anteil konventionelle Pkw:	98,42 %
Anteil Wohnbevölkerung:	31,35%
Anteil Arbeiten und Ausbildung:	68,65 %

Tabelle 57: Agglomerationsraum Hochverdichtete Kreise (eigene Berechnung nach [10])

BBSR Raumtyp:	Agglomerationsraum Hochverdichtete Kreise
Modal Split Anteil MIV Zweck Wohnen:	61,03 %
Wegelänge Zweck Wohnen:	14,37 km
Wegeanzahl Zweck Wohnen:	1,70 Wege
Besetzungsgrad Zweck Wohnen:	1,50 Pers/Fz
Betrachtungszeitraum Zweck Wohnen:	365 Tage
Modal Split Anteil MIV Zweck Arbeit und Ausbildung:	73,92 %
Wegelänge Zweck Arbeit und Ausbildung:	19,01 km
Wegeanzahl Zweck Arbeit und Ausbildung:	1,63 Wege
Besetzungsgrad Zweck Arbeit und Ausbildung:	1,58 Pers/Fz
Betrachtungszeitraum Zweck Arbeit und Ausbildung:	230 Tage
Anteil konventionelle Pkw:	98,42 %
Anteil Wohnbevölkerung:	31,35%
Anteil Arbeiten und Ausbildung:	68,65 %

Tabelle 58: Agglomerationsraum Verdichtete Kreise (eigene Berechnung nach [10])

BBSR Raumtyp:	Agglomerationsraum Verdichtete Kreise
Modal Split Anteil MIV Zweck Wohnen:	63,66 %
Wegelänge Zweck Wohnen:	16,27 km
Wegeanzahl Zweck Wohnen:	1,71 Wege
Besetzungsgrad Zweck Wohnen:	1,52 Pers/Fz
Betrachtungszeitraum Zweck Wohnen:	365 Tage
Modal Split Anteil MIV Zweck Arbeit und Ausbildung:	76,76 %
Wegelänge Zweck Arbeit und Ausbildung:	19,77 km
Wegeanzahl Zweck Arbeit und Ausbildung:	1,63 Wege
Besetzungsgrad Zweck Arbeit und Ausbildung:	1,50 Pers/Fz
Betrachtungszeitraum Zweck Arbeit und Ausbildung:	230 Tage
Anteil konventionelle Pkw:	98,42 %
Anteil Wohnbevölkerung:	31,35%
Anteil Arbeiten und Ausbildung:	68,65 %

Tabelle 59: Agglomerationsraum Ländliche Kreise (eigene Berechnung nach [10])

BBSR Raumtyp:	Agglomerationsraum Ländliche Kreise
Modal Split Anteil MIV Zweck Wohnen:	58,94 %
Wegelänge Zweck Wohnen:	18,37 km
Wegeanzahl Zweck Wohnen:	1,65 Wege
Besetzungsgrad Zweck Wohnen:	1,61 Pers/Fz
Betrachtungszeitraum Zweck Wohnen:	365 Tage
Modal Split Anteil MIV Zweck Arbeit und Ausbildung:	66,29 %
Wegelänge Zweck Arbeit und Ausbildung:	20,82 km
Wegeanzahl Zweck Arbeit und Ausbildung:	1,65 Wege
Besetzungsgrad Zweck Arbeit und Ausbildung:	1,66 Pers/Fz
Betrachtungszeitraum Zweck Arbeit und Ausbildung:	230 Tage
Anteil konventionelle Pkw:	98,42 %
Anteil Wohnbevölkerung:	31,35%
Anteil Arbeiten und Ausbildung:	68,65 %

Tabelle 60: Verstärterte Räume Kernstadt (eigene Berechnung nach [10])

BBSR Raumtyp:	Verstärterte Räume Kernstadt
Modal Split Anteil MIV Zweck Wohnen:	52,70 %
Wegelänge Zweck Wohnen:	16,15 km
Wegeanzahl Zweck Wohnen:	1,79 Wege
Besetzungsgrad Zweck Wohnen:	1,57 Pers/Fz
Betrachtungszeitraum Zweck Wohnen:	365 Tage
Modal Split Anteil MIV Zweck Arbeit und Ausbildung:	62,76 %
Wegelänge Zweck Arbeit und Ausbildung:	22,87 km
Wegeanzahl Zweck Arbeit und Ausbildung:	1,90 Wege
Besetzungsgrad Zweck Arbeit und Ausbildung:	1,47 Pers/Fz
Betrachtungszeitraum Zweck Arbeit und Ausbildung:	230 Tage
Anteil konventionelle Pkw:	98,42 %
Anteil Wohnbevölkerung:	31,35%
Anteil Arbeiten und Ausbildung:	68,65 %

Tabelle 61: Verstärterte Räume Verdichtete Kreise (eigene Berechnung nach [10])

BBSR Raumtyp:	Verstärterte Räume Verdichtete Kreise
Modal Split Anteil MIV Zweck Wohnen:	62,68 %
Wegelänge Zweck Wohnen:	14,85 km
Wegeanzahl Zweck Wohnen:	1,69 Wege
Besetzungsgrad Zweck Wohnen:	1,53 Pers/Fz
Betrachtungszeitraum Zweck Wohnen:	365 Tage
Modal Split Anteil MIV Zweck Arbeit und Ausbildung:::	76,41 %
Wegelänge Zweck Arbeit und Ausbildung:	19,18 km
Wegeanzahl Zweck Arbeit und Ausbildung:	1,70 Wege
Besetzungsgrad Zweck Arbeit und Ausbildung:	1,48 Pers/Fz
Betrachtungszeitraum Zweck Arbeit und Ausbildung:	230 Tage
Anteil konventionelle Pkw:	98,42 %
Anteil Wohnbevölkerung:	31,35%
Anteil Arbeiten und Ausbildung:	68,65 %

Tabelle 62: Verstädterte Räume Ländliche Kreise (eigene Berechnung nach [10])

BBSR Raumtyp:	Verstädterte Ländliche Kreise	Räume
Modal Split Anteil MIV Zweck Wohnen:	61,19 %	
Wegelänge Zweck Wohnen:	15,14 km	
Wegeanzahl Zweck Wohnen:	1,71 Wege	
Besetzungsgrad Zweck Wohnen:	1,51 Pers/Fz	
Betrachtungszeitraum Zweck Wohnen:	365 Tage	
Modal Split Anteil MIV Zweck Arbeit und Ausbildung:	76,63 %	
Wegelänge Zweck Arbeit und Ausbildung:	20,08 km	
Wegeanzahl Zweck Arbeit und Ausbildung:	1,67 Wege	
Besetzungsgrad Zweck Arbeit und Ausbildung:	1,51 Pers/Fz	
Betrachtungszeitraum Zweck Arbeit und Ausbildung:	230 Tage	
Anteil konventionelle Pkw:	98,42 %	
Anteil Wohnbevölkerung:	31,35%	
Anteil Arbeiten und Ausbildung:	68,65 %	

Tabelle 63: Ländliche Räume Ländliche Kreise höherer Dichte (eigene Berechnung nach [10])

BBSR Raumtyp:	Ländliche Räume Ländliche Kreise höherer Dichte	Räume
Modal Split Anteil MIV Zweck Wohnen:	63,11 %	
Wegelänge Zweck Wohnen:	15,52 km	
Wegeanzahl Zweck Wohnen:	1,66 Wege	
Besetzungsgrad Zweck Wohnen:	1,52 Pers/Fz	
Betrachtungszeitraum Zweck Wohnen:	365 Tage	
Modal Split Anteil MIV Zweck Arbeit und Ausbildung:	75,41 %	
Wegelänge Zweck Arbeit und Ausbildung:	20,08 km	
Wegeanzahl Zweck Arbeit und Ausbildung:	1,57 Wege	
Besetzungsgrad Zweck Arbeit und Ausbildung:	1,53 Pers/Fz	
Betrachtungszeitraum Zweck Arbeit und Ausbildung:	230 Tage	
Anteil konventionelle Pkw:	98,42 %	
Anteil Wohnbevölkerung:	31,35%	
Anteil Arbeiten und Ausbildung:	68,65 %	

Tabelle 64: Ländliche Räume Ländliche Kreise geringerer Dichte (eigene Berechnung nach [10])

BBSR Raumtyp:	Ländliche Räume Ländliche Kreise geringerer Dichte
Modal Split Anteil MIV Zweck Wohnen:	61,61 %
Wegelänge Zweck Wohnen:	16,68 km
Wegeanzahl Zweck Wohnen:	1,61 Wege
Besetzungsgrad Zweck Wohnen:	1,479 Pers/Fz
Betrachtungszeitraum Zweck Wohnen:	365 Tage
Modal Split Anteil MIV Zweck Arbeit und Ausbildung:	70,85 %
Wegelänge Zweck Arbeit und Ausbildung::	26,88 km
Wegeanzahl Zweck Arbeit und Ausbildung:	1,62 Wege
Besetzungsgrad Zweck Arbeit und Ausbildung:	1,41 Pers/Fz
Betrachtungszeitraum Zweck Arbeit und Ausbildung:	230 Tage
Anteil konventionelle Pkw:	98,42 %
Anteil Wohnbevölkerung:	31,35%
Anteil Arbeiten und Ausbildung:	68,65 %

Tabelle 65: Exemplarische Zusammenstellung für Maßnahmen in kommunalen Verkehrsentwicklungsplänen

Stadt	Maßnahmen ÖPNV	Maßnahmen Radverkehr	Maßnahmen Fußgängerverkehr	Quelle
Stuttgart	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung und Ausbau des ÖPNV Angebots • Anschlussicherungen im ÖPNV • ÖPNV attraktiver machen 	<ul style="list-style-type: none"> • Stärkung Radverkehr • Weiterentwicklung des Radverkehrssystems • Radverkehr attraktiver machen • Mehr Sicherheit für den Radverkehr • Verbesserung Fahrradinfrastruktur • Verbesserung Bike&Ride Angebot • Mehr Fahrradabstellmöglichkeiten • Verbesserung Verkehrssicherheit 	<ul style="list-style-type: none"> • Höhere Aufenthaltsfunktion in Straßenräume • Fußgängerfreundliche Begegnungszonen erstellen • Vereinfachung der Querung von Hauptstraßen • Verbesserung Verkehrssicherheit 	<p>Stadt der Zukunft. Lebenswerte Innenstädte durch emissionsfreien Verkehr. Stadt Stuttgart (2014)</p>
Karlsruhe		<ul style="list-style-type: none"> • Reduzierung von Gefahren durch verlangsamte KFZ Geschwindigkeiten • Verbesserung der Anbindung des Radverkehrs 	<ul style="list-style-type: none"> • Unterbinden des Gehwegparkens • Verkürzung der Abstände zwischen den Querungshilfen • Verbesserung der Aufenthaltsfunktion • Reduzierung der KFZ Belastung • Sicherung der Barrierefreiheit • Größere Gehwegbreiten • Reduzierung von Gefahren durch verlangsamte KFZ Geschwindigkeiten • Verbesserung der Anbindung der Fußgängerverkehr 	<p>VEP Karlsruhe Handlungskonzept. Stadt Karlsruhe (2012)</p>
Dresden	<ul style="list-style-type: none"> • Beschleunigung und Verbesserung der Bahnanbindungen • Verbesserung der Zuverlässigkeit und Pünktlichkeit, • Stärkung der Verbindungsfunktionen, • Bereitstellung ausreichender Beförderungskapazitäten auf nachfragestarken Relationen, • langfristige Sicherung der ÖPNV-Finanzierung. 	<ul style="list-style-type: none"> • konzeptionelle Maßnahmen (z. B. der Verkehrssicherheit) • baulich-organisatorische Kernaussagen für Bereiche mit dringendem Handlungsbedarf • ein Netz von Radkorridoren • Prinzipien für Radabstellanlagen in Kernbereichen • Schnittstellen mit dem ÖPNV (Bike&Ride) • Innovationsansätze 	<ul style="list-style-type: none"> • die Neuaufstellung des Personenbeförderungsgesetzes (PBefG) bzw. die Nahverkehrsplanung • Umsetzung laufender Programme (z. B. das Gehwegprogramm des STA) • Mehr Fußgängerübergänge schaffen 	<p>Verkehrsentwicklungsplan 2025plus Entwurf. Stadt Dresden (2013)</p>
Potsdam	<ul style="list-style-type: none"> • Infrastrukturmaßnahmen des ÖPNV 	<ul style="list-style-type: none"> • Radverkehrskonzept mit zusätzlicher Beschleunigung und Netzverdichtung • Mobilitätsmanagement • Umsetzung prioritärer Routen/Radverkehrskonzept • Weiterentwicklung/Verdichtung Radroutennetz • Beschleunigung/Bevorrechtigung Radverkehr (z. B. grüne Welle) • Verbesserung Verbindungen Stadt/Umland (z. B. Radschnellverbindungen) • Verbesserung Radwegweisung • Einrichtung Fahrradstation Hauptbahnhof 	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung der Querungsmöglichkeiten an Hauptstraßen • Fußverkehrskonzept für Potsdam 	<p>Stadtentwicklungskonzept Verkehr für die Landeshauptstadt Potsdam. Stadt Potsdam (2011)</p>

Tabelle 66: Annahmen zum Referenzfahrzeug

Marke/Typ	<i>Golf TDI 4MOTION BlueMotion Technologie Trendline (Diesel)</i>
<i>Anschaffungskosten</i>	22.350 €
<i>Treibstoffpreis</i>	1,18 €/l
<i>Verbrauch /100km</i>	4,91
<i>CO₂ g/km</i>	129
<i>Max. Geschwindigkeit</i>	191 km/h
<i>KW/PS</i>	81/110
<i>Hubraum</i>	1598
<i>Zul. Gesamtgewicht (kg)</i>	1930
<i>Versicherung/Jahr</i>	760,25 €
<i>Steuer/Jahr</i>	220 €
<i>Fahrleistung km/Jahr</i>	15.000
<i>Nutzungsdauer</i>	12 Jahre

Tabelle 67: Durchdringungsraten der Maßnahmenpotenziale bis 2030 gegenüber dem Basisjahr 2012 für den Gebäudebereich in Metzingen

Name		Durchdringungsrate 1. Stufe (Akzeptanz)	maximale positive Kopplung	maximale negative Kopplung	kumulierte Durchdringungsrate	kumulierte Durchdringungsrate Korrektur
Gebäudesanierung Fenster	G-01	3%	100%	90%	3%	3%
Gebäudesanierung Dach	G-02	3%	100%	90%	3%	3%
Gebäudesanierung: Unterste Geschossdecke	G-03	3%	100%	90%	3%	3%
Gebäudesanierung: Außenwand	G-04	3%	100%	90%	3%	3%
Gebäudesanierung: Komplett standard	G-05	3%	100%	90%	3%	3%
Gebäudesanierung: Komplett erweitert	G-06	3%	100%	90%	3%	3%
Erneuerung Erzeuger / Anlagentechnik zur Effizienzverbesserung (konventionell)	G-07	50%	110%	50%	28%	28%
Erneuerung Erzeuger / Anlagentechnik zur Effizienzverbesserung (zukunftsweisend)	G-08	25%	110%	50%	14%	14%
Austausch der Umwälzpumpen	G-09	25%	150%	50%	19%	0%
Durchführung eines hydraulischen Abgleichs	G-10	25%	150%	50%	19%	0%
Anschaffung hocheffizienter Elektrogeräte (nicht durchgängig A++)	G-11	65%	110%	100%	72%	25%
Anschaffung hocheffizienter Elektrogeräte (durchgängig A++)	G-12	25%	110%	100%	28%	75%
Energieberatung	G-13	18%	110%	100%	20%	20%
Nutzung PV-Anlage	G-14	18%	125%	90%	20%	41%
Neubau im KfW Effizienzhaus 40 Standard	G-37	9%	110%	100%	10%	20%
Gebäudesanierung einfach	G-15	9%	110%	90%	9%	9%
Gebäudesanierung komplett	G-16	9%	110%	90%	9%	9%
Energieaudit (geringinvestive Maßnahmen)	G-17	3%	125%	100%	4%	4%
Energieaudit (gering- und hochinvestive Maßnahmen)	G-18	3%	125%	100%	4%	4%
Betrieboptimierung	G-19	3%	125%	100%	4%	4%
Optimierung von Querschnittstechnologien	G-20	3%	125%	100%	4%	4%
Energieberatung (niedriger Umsetzungsgrad)	G-21	3%	125%	100%	4%	4%
Energieberatung (hoher Umsetzungsgrad)	G-22	3%	125%	100%	4%	4%
Erneuerung Erzeuger / Anlagentechnik zur Effizienzverbesserung (konventionell)	G-23	75%	110%	50%	41%	41%
Nutzung PV-Anlage	G-24	18%	125%	90%	20%	41%
Austausch der Umwälzpumpen	G-25	75%	110%	50%	41%	0%
Durchführung eines hydraulischen Abgleichs	G-26	75%	110%	50%	41%	0%
Erneuerung Wärme- bzw. Kälteverteilung	G-27	13%	125%	75%	12%	17%
Erneuerung Wärme- bzw. Kälteübergabe	G-28	13%	125%	75%	12%	17%
Bezug regeneratives Heizöl	G-29	9%	125%	75%	8%	0%
Nutzung regenerativer Wärmesenken zur Gebäudekühlung	G-30	100%	110%	100%	110%	25%
Bau nach optimierter Green-Building-Planung	G-31	100%	110%	100%	110%	50%
Einsatz von Niedertemperatur-Flächenheizungen	G-32	100%	110%	100%	110%	50%
Einsatz von geregelter natürlicher Lüftung statt RLT	G-33	100%	110%	100%	110%	25%
Energiemonitoring- und Energieregelkonzept	G-34	25%	110%	90%	25%	25%
Optimierung des außenliegenden Sonnenschutzes zur Senkung des Kühlbedarfs	G-35	5%	110%	100%	6%	6%
Reduzierung des Kühlbedarfs durch aktive Nachtlüftung (ggf. inkl. BTA)	G-36	5%	110%	100%	6%	6%

Tabelle 68: Durchdringungsraten der Maßnahmenpotenziale bis 2030 gegenüber dem Basisjahr 2012 für den Verkehrs- und Übergreifenden Bereich in Metzingen

			Durchdringungs- rate 1. Stufe (Akzeptanz)	maximale positive Kopplung	maximale negative Kopplung	kumulierte Durchdringungs- rate	kumulierte Durchdringungs- rate Korrektur	
Verkehr	Name							
	Stärkung Umweltverbund	V-01	CV	50%	100%	50%	25%	25%
	Wechsel auf E-Fahrzeuge	V-02	CV	100%	200%	100%	200%	100%
	Carpooling im Pendlerverkehr	V-03	CV	50%	110%	90%	50%	50%
	Verkehrsaufklärung (Mobilitäts-Audit)	V-04	CV	100%	100%	100%	100%	100%
	Verkehrserziehung	V-05	CV 4	100%	100%	100%	100%	100%
	Initiative Saubere Stadt/Kommune	V-06	CV	100%	100%	100%	100%	100%
Bike-Sharing	V-07	CV	100%	100%	100%	100%	100%	
Übergreifend	Förderung von PV-Carports	Ü-01	CÜ	50%	150%	75%	56%	56%
	Demandside-Management im Verkehr - Haushalte	Ü-02	CÜ 2	20%	150%	90%	27%	27%
	Demandside-Management im Verkehr - GHDl	Ü-03	CÜ	20%	150%	90%	27%	27%
	Kooperative Energiebereitstellung für Wohn- und Nichtwohngebäude – KWK	Ü-04	CÜ	33%	110%	75%	27%	83%
	Kooperative Energiebereitstellung für Wohn- und Nichtwohngebäude – Wärmepumpen	Ü-05	CÜ	33%	110%	75%	27%	83%
	Nutzung von Skaleneffekten durch (kooperative) Nutzung von PV-Freiflächen und großen Solarthermie-Anlagen	Ü-06	CÜ	100%	100%	100%	100%	5%
	Effizienzsteigerung in bestehenden Nahwärmenetzen	Ü-07	CÜ	33%	150%	90%	45%	100%
	Ausbau solarunterstützter Nahwärme – LowEx Netze	Ü-08	CÜ	33%	150%	90%	45%	100%
	Abwasserwärmenutzung-Wärmepumpen	Ü-09	CÜ	33%	125%	90%	37%	100%
	Stromspeicher zur Integration hoher Anteile erneuerbarer Energien	Ü-10	CÜ	18%	125%	75%	17%	34%
	Warmwasserspeicher zur Integration hoher Anteile erneuerbarer Energien	Ü-11	CÜ	33%	110%	75%	27%	100%
	Straßenbeleuchtung	Ü-12	CÜ	75%	150%	100%	113%	100%
	Klimaschutzmanager	Ü-13	CÜ	100%	100%	100%	100%	100%

Tabelle 69: Durchdringungsraten der Maßnahmenpotenziale bis 2030 gegenüber dem Basisjahr 2012 für den Gebäudebereich in Berlin TXL

			Durchdringungs- rate 1. Stufe (Akzeptanz)	maximale positive Kopplung	maximale negative Kopplung	kumulierte Durchdringungs- rate	kumulierte Durchdringungs- rate Korrektur
WG	Name						
	Gebäudesanierung Fenster	G-01	3%	100%	90%	3%	3%
	Gebäudesanierung Dach	G-02	3%	100%	90%	3%	3%
	Gebäudesanierung: Unterste Geschossdecke	G-03	3%	100%	90%	3%	3%
	Gebäudesanierung: Außenwand	G-04	3%	100%	90%	3%	3%
	Gebäudesanierung: Komplett standard	G-05	3%	100%	90%	3%	3%
	Gebäudesanierung: Komplett erweitert	G-06	3%	100%	90%	3%	3%
	Erneuerung Erzeuger / Anlagentechnik zur Effizienzverbesserung (konventionell)	G-07	50%	110%	50%	28%	28%
	Erneuerung Erzeuger / Anlagentechnik zur Effizienzverbesserung (zukunftsweisend)	G-08	25%	110%	50%	14%	14%
	Austausch der Umwälzpumpen	G-09	25%	150%	50%	19%	19%
	Durchführung eines hydraulischen Abgleichs	G-10	25%	150%	50%	19%	19%
	Anschaffung hocheffizienter Elektrogeräte (nicht durchgängig A++)	G-11	65%	110%	100%	72%	72%
	Anschaffung hocheffizienter Elektrogeräte (durchgängig A++)	G-12	25%	110%	100%	28%	28%
	Energieberatung	G-13	18%	110%	100%	20%	20%
Nutzung PV-Anlage	G-14	18%	125%	90%	20%	20%	
Neubau im KfW Effizienzhaus 40 Standard	G-37	9%	110%	100%	10%	10%	
NWG	Gebäudesanierung einfach	G-15	9%	110%	90%	9%	9%
	Gebäudesanierung komplett	G-16	9%	110%	90%	9%	9%
	Energieaudit (geringinvestive Maßnahmen)	G-17	3%	125%	100%	4%	4%
	Energieaudit (gering- und hochinvestive Maßnahmen)	G-18	3%	125%	100%	4%	4%
	Betriebsoptimierung	G-19	3%	125%	100%	4%	4%
	Optimierung von Querschnittstechnologien	G-20	3%	125%	100%	4%	4%
	Energieberatung (niedriger Umsetzungsgrad)	G-21	3%	125%	100%	4%	4%
	Energieberatung (hoher Umsetzungsgrad)	G-22	3%	125%	100%	4%	4%
	Erneuerung Erzeuger / Anlagentechnik zur Effizienzverbesserung (konventionell)	G-23	75%	110%	50%	41%	41%
	Nutzung PV-Anlage	G-24	18%	125%	90%	20%	20%
	Austausch der Umwälzpumpen	G-25	75%	110%	50%	41%	41%
	Durchführung eines hydraulischen Abgleichs	G-26	75%	110%	50%	41%	41%
	Erneuerung Wärme- bzw. Kälteverteilung	G-27	13%	125%	75%	12%	12%
	Erneuerung Wärme- bzw. Kälteübergabe	G-28	13%	125%	75%	12%	12%
	Bezug regeneratives Heizöl	G-29	9%	125%	75%	8%	8%
	Nutzung regenerativer Wärmesenken zur Gebäudekühlung	G-30	100%	110%	100%	110%	100%
	Bau nach optimierter Green-Building-Planung	G-31	100%	110%	100%	110%	100%
	Einsatz von Niedertemperatur-Flächenheizungen	G-32	100%	110%	100%	110%	100%
	Einsatz von geregelter natürlicher Lüftung statt RLT	G-33	100%	110%	100%	110%	100%
	Energiemonitoring- und Energieregulierungskonzept	G-34	25%	110%	90%	25%	25%
Optimierung des außenliegenden Sonnenschutzes zur Senkung des Kühlbedarfs	G-35	5%	110%	100%	6%	6%	
Reduzierung des Kühlbedarfs durch aktive Nachtlüftung (ggf. inkl. BTA)	G-36	5%	110%	100%	6%	6%	

Tabelle 70: Durchdringungsraten der Maßnahmenpotenziale bis 2030 gegenüber dem Basisjahr 2012 für den Verkehrs- und Übergreifenden Bereich in Berlin TXL

			Durchdringungs- rate 1. Stufe (Akzeptanz)	maximale positive Kopplung	maximale negative Kopplung	kumulierte Durchdringungs- rate	kumulierte Durchdringungs- rate Korrektur
Verkehr	Name						
	Stärkung Umweltverbund	V-01	50%	100%	50%	25%	25%
	Wechsel auf E-Fahrzeuge	V-02	100%	200%	100%	200%	100%
	Carpooling im Pendlerverkehr	V-03	50%	110%	90%	50%	50%
	Verkehrsaufklärung (Mobilitäts-Audit)	V-04	100%	100%	100%	100%	100%
	Verkehrserziehung	V-05	100%	100%	100%	100%	100%
	Initiative Saubere Stadt/Kommune	V-06	100%	100%	100%	100%	100%
Bike-Sharing	V-07	100%	100%	100%	100%	100%	
Übergreifend	Förderung von PV-Carports	Ü-01	50%	150%	75%	56%	56%
	Demandside-Management im Verkehr - Haushalte	Ü-02	20%	150%	90%	27%	27%
	Demandside-Management im Verkehr - GHDI	Ü-03	20%	150%	90%	27%	27%
	Kooperative Energiebereitstellung für Wohn- und Nichtwohngebäude – KWK	Ü-04	33%	110%	75%	27%	27%
	Kooperative Energiebereitstellung für Wohn- und Nichtwohngebäude – Wärmepumpen	Ü-05	33%	110%	75%	27%	27%
	Nutzung von Skaleneffekten durch (kooperative) Nutzung von PV-Freiflächen und großen Solarthermie-Anlagen	Ü-06	100%	100%	100%	100%	100%
	Effizienzsteigerung in bestehenden Nahwärmenetzen	Ü-07	33%	150%	90%	45%	45%
	Ausbau solarunterstützter Nahwärme – LowEx Netze	Ü-08	33%	150%	90%	45%	45%
	Abwasserwärmenutzung-Wärmepumpen	Ü-09	33%	125%	90%	37%	37%
	Stromspeicher zur Integration hoher Anteile erneuerbarer Energien	Ü-10	18%	125%	75%	17%	17%
	Warmwasserspeicher zur Integration hoher Anteile erneuerbarer Energien	Ü-11	33%	110%	75%	27%	27%
	Straßenbeleuchtung	Ü-12	75%	150%	100%	113%	100%
	Klimaschutzmanager	Ü-13	100%	100%	100%	100%	100%