

# **Analyse des Energie-Autarkiegrades unterschiedlich großer Bilanzräume mittels integrierter Energiesystemmodellierung**

von

Brodecki, L.; Fahl, U.; Tomaschek, J.; Wiesmeth, M.  
Universität Stuttgart  
Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER)

Gutekunst, F.; Siebenlist, A.; Salah A.  
Universität Stuttgart  
Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK)

Baumann, M.; Graf, R.; Brethauer, L.; Horn, R.  
Universität Stuttgart  
Lehrstuhl für Bauphysik, Abt. Ganzheitliche Bilanzierung (LBP-GaBi)

Hauser, W.; Sonnberger, M.; León, C.  
Universität Stuttgart  
Zentrum für interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung (ZIRIUS)

Pfenning, U.; O'Sullivan, M.  
Institut für Technische Thermodynamik (ITT), Stuttgart  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt in der Helmholtz Gemeinschaft (DLR)

Förderkennzeichen: BWE 13033 - BWE 13034

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert



# Analyse des Energie-Autarkiegrades unterschiedlich großer Bilanzräume mittels integrierter Energiesystemmodellierung

**Brodecki, L.; Fahl, U.; Tomaschek, J.; Wiesmeth, M.; Gutekunst, F.; Siebenlist, A., Salah, A.; Baumann, M.; Graf, R.; Brethauer, L.; Horn, R.; Hauser, W.; Sonnberger, M.; León, C.**

Universität Stuttgart

**Pfenning, U.; O’Sullivan, M.**

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt in der Helmholtz Gemeinschaft (DLR), Stuttgart

## **Zusammenfassung**

Die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Nutzung erneuerbarer Energien, zur Energieeinsparung und zur Emissionsminderung von Kommunen, Regionen, aber auch Bundesländern werden unter dem Schlagwort der „Energie-Autarkie“ diskutiert. Die vorliegende Studie untersucht, in wie weit Autarkie im Energiebereich auf der Ebene einer Kommune und eines Bundeslandes sinnvoll bzw. möglich ist, welche Speicher-Dimensionen und -Technologien dazu in welchen Bereichen notwendig sind, wie derartige Versorgungsstrukturen von der Bevölkerung akzeptiert werden.

Das interdisziplinäre Projekt ermöglicht durch die Einbindung von Praxispartnern und die Partizipation von betroffenen Gruppen eine bestmögliche Einschätzung der Ist-Situation und der möglichen Widerstände und Probleme im Zuge der Steigerung der Energie-Autarkie. Die Umsetzung erfolgte u. a. durch intensive Bürgerbeteiligungsprozesse und Öffentlichkeitsarbeit.

Es zeigt sich, dass die Begriffe „Energie-Autarkie“ und „Energie-Autonomie“ im Sprachgebrauch und in der Literatur meist deckungsgleich und ohne genaue Definition verwendet werden. Daher wurde eine grundlegende Diskussion und Abgrenzung der Begriffe „Autonomie“ und „Autarkie“ erstellt und ein Definitionsvorschlag zur Verwendung des Begriffes „Energie-Autarkie“ erarbeitet und in einem Artikel veröffentlicht.

Eine Vielzahl von Technologieoptionen, denen für eine Entwicklung hin zur Energie-Autarkie eine besondere Bedeutung beigemessen wird, wurde identifiziert und technisch, ökonomisch sowie ökologisch charakterisiert. Hierzu erfolgte u. a. eine systematische Analyse der Umweltwirkungen eines Produktes über seinen gesamten Lebensweg. Die zentralen Ergebnisse der technischen, ökonomischen und ökologischen Bewertung der Technologien werden in übersichtlichen Technologiesteckbriefen zusammengefasst. Mit dem Ziel, die Netzzrückwirkungen auf der Mittelspannungsebene berücksichtigen zu können, wurde ein beispielhaftes Verteilnetz untersucht.

Mittels eines Energiesystemmodells können die unterschiedlichen Determinanten der Energie-Autarkie integriert bewertet werden, um kostenoptimale Maßnahmen zur Autarkieverreichung zu identifizieren. Die integrative Autarkieuntersuchung erfolgt in einem Modellverbund zwischen Systemmodellierung (direkte Ressourcennutzung), Netzanalyse (Ausbau und Betrieb) und ökologischem Gesamtmodell (indirekte und vorgelagerte Ressourcen.) Die Basis für die zu analysierenden Szenaren bildet die Cross-Impact-Bilanzanalyse um die möglichen Kombinationen von Deskriptoren des Entwicklungsrahmens auf eine plausible Kombination zu reduzieren.

# Analysis of energy autarky levels for different system boundaries by using an integrated energy system model approach

**Brodecki, L.; Fahl, U.; Tomaschek, J.; Wiesmeth, M.; Gutekunst, F.; Siebenlist, A., Salah, A.; Baumann, M.; Graf, R.; Brethauer, L.; Horn, R.; Hauser, W.; Sonnberger, M.; León, C.**

Universität Stuttgart

**Pfenning, U.; O'Sullivan, M.**

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt in der Helmholtz Gemeinschaft (DLR), Stuttgart

## **Abstract**

The different aspects for the utilization of renewable energies, energy savings and emission reduction measures in small municipalities and whole states can be bundled under the keyword "energy-autarky" or energy self-sufficiency. This study examines to which extend self-sufficiency in the energy sector is possible, which storage capacities and technologies are needed and last but not least, how such structures are accepted by the population.

The interdisciplinary project is made possible through the integration of stakeholders and the participation of affected groups as a best estimate of the actual situation and the possible resistances and problems in the course of increasing the energy self-sufficiency. The implementation was inter alia carried out through an intensive public participation processes and public information.

It has been found that the terms "energy self-sufficiency" and "energy autonomy" are used mostly congruent and without a precise definition in both, spoken language as well as in the literature. Therefore, a fundamental discussion and definition of the terms "energy autonomy" and "self-sufficiency" resulted in a definition for "energy self-sufficiency" which has been published in an article.

A variety of technology options, which seems to be of particular importance towards energy self-sufficiency was identified during the reporting year and characterized technically, economically and ecologically. To this end, a systematic analysis of the environmental impacts of a product throughout its entire life cycle was carried out. The key findings of the technical, economic and environmental evaluation of technologies are summarized in technology fact sheets. With the objective to take account of the system perturbation of the medium-voltage level, an exemplary grid was investigated.

The different determinants of energy self-sufficiency rate have been integrated by means of an energy system model, to identify cost-optimal measures to achieve energy self-sufficiency. The Integrative investigation of energy autarky was carried out in a model network between system modelling (direct resource use), network analysis (construction and operation) and an overall ecological model (indirect and upstream resource utilization). The basis for the scenarios to be analysed was formed by a cross-impact analysis which reduces possible measures to plausible combinations of descriptors for the scenario frameworks.

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>GRUNDLAGEN.....</b>	<b>4</b>
2.1	PARTIZIPATION UND AKZEPTANZ.....	4
2.1.1	Die Definition der Energiewende und ihre Soziotechnik.....	4
2.1.2	Die EE-Energiewende als Gesellschaftstechnologie.....	5
2.1.3	Kommunen als soziale Arenen der Energiewende: Lokale Autarkie und Autonomie.	5
2.1.4	Bürgerbeteiligung zur Energiewende.....	7
2.2	MESSKONZEPTE FÜR ENERGIE-AUTARKIE .....	7
2.3	METHODISCHE GRUNDLAGEN .....	8
2.3.1	Cross-Impact-Bilanzanalyse .....	8
2.3.2	Ganzheitliche Bilanzierung.....	11
2.3.3	Energienachfrage- und Energiesystemmodellierung.....	12
2.3.4	Netzmodellierung.....	15
2.3.5	LCA Ökologisches Modell .....	20
<b>3</b>	<b>FALLSTUDIE BADEN-WÜRTTEMBERG .....</b>	<b>25</b>
3.1	ANALYSE DER IST-SITUATION.....	25
3.2	STAKEHOLDER INTERVIEWS.....	26
3.2.1	Empirisches Vorgehen .....	26
3.2.2	Ergebnisse der Interviews .....	27
3.2.3	Vergleich mit den Ergebnissen der Literaturstudie.....	29
3.2.4	Fazit.....	30

3.3	SZENARIOERSTELLUNG MITTELS CROSS-IMPACT-BILANZANALYSE (CIB) .....	30
3.3.1	Auswahl der Szenarioelemente für die CIB .....	30
3.3.2	Erhebung der Cross-Impacts .....	32
3.3.3	Szenarioauswahl.....	34
3.4	ENERGIESYSTEMMODELLIERUNG MIT TIMES PANEU-BW .....	41
3.4.1	Endenergieverbrauch in Baden-Württemberg.....	42
3.4.2	Stromerzeugung und Kapazitäten in Baden-Württemberg .....	45
3.4.3	Primärenergieverbrauch in Baden-Württemberg .....	49
3.4.4	CO <sub>2</sub> -Emissionen und Systemkosten in Baden-Württemberg.....	51
3.5	STROMNETZBERECHNUNGEN .....	53
3.6	ÖKOLOGISCHES GESAMTMODELL FÜR BADEN-WÜRTTEMBERG .....	56
<b>4</b>	<b>FALLSTUDIE METZINGEN.....</b>	<b>65</b>
4.1	IST-SITUATION UND POTENZIALE ERNEUERBARER ENERGIEN .....	65
4.2	UMSETZUNG DER BÜRGERBETEILIGUNG IN METZINGEN: BÜRGERUMFRAGE UND BÜRGERGUTACHTEN .....	67
4.2.1	Bürgerumfrage .....	67
4.2.2	Ob und wie beteiligen? Zur Auswahl des Beteiligungsmodus durch die Bürger- schaft .....	69
4.2.3	Zentrale inhaltliche Ergebnisse der Bürgerumfrage.....	70
4.2.4	Technische Aspekte .....	76
4.2.5	Bürger- und Jugendgutachten .....	79
4.2.6	Zentrale Ergebnisse der Bürgergutachten .....	80
4.2.7	Fazit zur Bürgerbeteiligung.....	83

4.3	SZENARIOERSTELLUNG MITTELS CROSS-IMPACT-BILANZANALYSE (CIB) .....	83
4.3.1	Auswahl der Szenarioelemente für die CIB .....	83
4.3.2	Erhebung der Cross-Impacts .....	84
4.3.3	Szenarioauswahl.....	86
4.4	STROMNETZBERECHNUNGEN .....	89
4.4.1	Integrierbares PV Potenzial.....	91
4.4.2	Kostenoptimaler Netzausbau .....	92
4.5	ENERGIESYSTEMMODELLIERUNG MIT TEAM-METZINGEN .....	94
4.5.1	Szenario “Stagnierendes Metzingen - Business as usual (BAU)” .....	97
4.5.2	Szenarienvergleich (BAU, IM1, IM2) .....	100
4.5.3	Extreme Autarkieszenarien .....	103
4.6	ÖKOLOGISCHES GESAMTMODELL FÜR METZINGEN .....	113
<b>5</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN .....</b>	<b>123</b>
	<b>ANHANG .....</b>	<b>131</b>
	DESKRIPTORENESSAYS AUTARKIE BADEN-WÜRTTEMBERG .....	131
	DESKRIPTORENESSAYS AUTARKIE METZINGEN .....	151





## **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Arbeitsprogramm und Wechselwirkungen im Projektverbund.....	2
Abbildung 2: Integrative Autarkieuntersuchung im Gesamtmodell.....	3
Abbildung 3: Zentrale Ausbaupfade der Energiewende.....	7
Abbildung 4: Wirkungsbilanzen eines inkonsistenten Szenarios.....	10
Abbildung 5: Wirkungsbilanzen eines konsistenten Szenarios.....	10
Abbildung 6: Vorgehen zur Untersuchung der Technologieoptionen.....	11
Abbildung 7: Themenkomplexe der berücksichtigten Technologieoptionen.....	12
Abbildung 8: PTFD Stromnetzmodellansatz.....	16
Abbildung 9: Netzgebiet des 10 kV Netzes in Metzingen .....	18
Abbildung 10: Vorgehen zur Netzanalyse .....	18
Abbildung 11: Leistungsflüsse bei Maximallast .....	19
Abbildung 12: Spannungsverlauf bei Maximallast .....	19
Abbildung 13: Abweichung der errechneten Stromflüsse und Spannungen zu den Messdaten .....	20
Abbildung 14: Darstellung der Systemgrenzen für das Ökobilanz-Systemmodell .....	21
Abbildung 15: Darstellung der Systemmodellschnittstellen zur Übergabe der jeweiligen Eingangsdaten .....	22
Abbildung 16: Überblick über das Ökobilanz-Systemmodell.....	23
Abbildung 17: Anteile der quellenbezogenen Energie- und CO <sub>2</sub> -Bilanz in Baden-Württemberg im Jahr 2012 .....	25
Abbildung 18: Cross-Impact-Matrix Baden-Württemberg .....	33
Abbildung 19: Häufigkeiten der Deskriptorvarianten bei den 22 vollkonsistenten Szenarien.....	34
Abbildung 20: Häufigkeiten der Deskriptorvarianten bei den 204 leicht inkonsistenten Szenarien.....	36
Abbildung 21: Energieträgerpreisentwicklung für fossile Energieträger in Deutschland, frei Grenze. 41	

Abbildung 22: Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Sektoren in Baden-Württemberg von 2012 bis 2050 (Vergleich der Autarkieszenarien (SABW, PABW) mit dem Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW)) .....	43
Abbildung 23: Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern in Baden-Württemberg von 2012 bis 2050 (Vergleich der Autarkieszenarien (SABW, PABW) mit dem Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW)).....	44
Abbildung 24: Entwicklung des Nettostromverbrauchs nach Sektoren in Baden-Württemberg von 2012 bis 2050 (Vergleich der Autarkieszenarien (SABW, PABW) mit dem Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW)) .....	46
Abbildung 25: Entwicklung der Nettostrombereitstellung nach Energieträgern in Baden-Württemberg von 2012 bis 2050 (Vergleich der Autarkieszenarien (SABW, PABW) mit dem Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW)) .....	47
Abbildung 26: Entwicklung der Installierten Nettoleistung der Stromerzeugung nach Energieträgern in Baden-Württemberg von 2012 bis 2050 (Vergleich der Autarkieszenarien (SABW, PABW) mit dem Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW)) .....	48
Abbildung 27: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs nach Energieträgern in Baden-Württemberg von 2012 bis 2050 (Vergleich der Autarkieszenarien (SABW, PABW) mit dem Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW)) .....	50
Abbildung 28: Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionen in Baden-Württemberg von 2012 bis 2050 (Vergleich der Autarkieszenarien (SABW, PABW) mit dem Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW))...	51
Abbildung 29: Jährliche Differenzkosten der Autarkieszenarien (SABW, PABW) gegenüber dem Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW) in Baden-Württemberg .....	52
Abbildung 30: Stromerzeugung und Leistungsflüsse im Ausgangszustand 2012.....	54
Abbildung 31: Stromerzeugung und Leistungsflüsse bei 50 % Leistungsautarkie .....	55
Abbildung 32: Stromerzeugung und Leistungsflüsse bei 100 % Leistungsautarkie .....	57
Abbildung 33: Vergleich der Szenarien für Baden-Württemberg für die Bereitstellung von 1 kWh Strom in der Wirkungskategorie Treibhauspotenzial (GWP) .....	58
Abbildung 34: Vergleich der Szenarien für Baden-Württemberg für die Bereitstellung von 1 kWh Strom in der Kategorie fossiler Primärenergiebedarf (PED).....	58
Abbildung 35: Vergleich der Szenarien für Baden-Württemberg für die Bereitstellung von 1 kWh Strom in der Wirkungskategorie Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP) .....	59
Abbildung 36: Gegenüberstellung der Anteile der Energieträger an der Stromerzeugung und ihre Anteile an den Umweltwirkungen für Baden-Württemberg im Referenzzustand ETSBW 2010 .....	59

Abbildung 37: Gegenüberstellung der Anteile der Energieträger an der Stromerzeugung und ihre Anteile an den Umweltwirkungen für Baden-Württemberg im Szenario mit ETS-Zielen (ETSBW) in 2050.....	60
Abbildung 38: Gegenüberstellung der Anteile der Energieträger an der Stromerzeugung und ihre Anteile an den Umweltwirkungen für Baden-Württemberg im Szenario Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW) in 2050.....	60
Abbildung 39: Vergleich der Szenarien für Baden-Württemberg für die Bereitstellung von 1 kWh Wärme in der Wirkungskategorie Treibhauspotenzial (GWP) .....	62
Abbildung 40: Vergleich der Szenarien für Baden-Württemberg für die Bereitstellung von 1 kWh Wärme in der Kategorie fossiler Primärenergiebedarf (PED).....	62
Abbildung 41: Vergleich der Szenarien für Baden-Württemberg für die Bereitstellung von 1 kWh Wärme in der Wirkungskategorie Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP) .....	62
Abbildung 42: Zusammensetzung der Fernwärmeerzeugung in den verschiedenen Szenarien von Baden Württemberg .....	63
Abbildung 43: Gegenüberstellung der Anteile der Energieträger an der Wärmeerzeugung und ihre Anteile an den Umweltwirkungen für Baden-Württemberg im Referenzzustand ETSBW 2010 .....	63
Abbildung 44: Gegenüberstellung der Anteile der Energieträger an der Wärmeerzeugung und ihre Anteile an den Umweltwirkungen für Baden-Württemberg im Szenario mit ETS-Zielen (ETSBW) in 2050.....	64
Abbildung 45: Gegenüberstellung der Anteile der Energieträger an der Wärmeerzeugung und ihre Anteile an den Umweltwirkungen für Baden-Württemberg im Szenario Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW) in 2050.....	64
Abbildung 46: Anteile der endenergiebasierten Territorialbilanz für Metzingen im Jahr 2012.....	65
Abbildung 47: Anteile der CO <sub>2</sub> -Emissionen auf Basis der endenergiebasierten Territorialbilanz für Metzingen im Jahr 2012.....	65
Abbildung 48: Potenziale Erneuerbarer Energien und bereits erfolgte Nutzung von Erneuerbaren Energien im Jahr 2012 in Metzingen.....	66
Abbildung 49: Cross-Impact Matrix Metzingen .....	85
Abbildung 50: Häufigkeiten der Deskriptorvarianten bei den drei vollkonsistenten Szenarien für Metzingen.....	87
Abbildung 51: Vorgehen zur Ermittlung des integrierbaren PV-Zubaus.....	89
Abbildung 52: Vorgehen zur Ermittlung des kostenoptimalen Netzausbaus zur Integration des Gesamtpotenzials.....	90

Abbildung 53: Technisches Dachflächenpotenzial in MW je Stadtquartier .....	91
Abbildung 54: Optimierter PV-Zubau bei bestehendem Verteilnetz .....	92
Abbildung 55: Gesamtinvestitionen in notwendige Netzausbaumaßnahmen .....	93
Abbildung 56: Kostenaufschlüsselung nach Technologieoption .....	94
Abbildung 57: Referenzenergiesystem für TEAM-Metzingen (aggregiert) .....	95
Abbildung 58: Übersicht der Sanierungsmodellierung von Wohngebäuden in TEAM-Metzingen .....	96
Abbildung 59: Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Sektoren in Metzingen von 2012 bis 2050 (Szenario Stagnierendes Metzingen (BAU)).....	98
Abbildung 60: Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern in Metzingen von 2012 bis 2050 (BAU Szenario) .....	99
Abbildung 61: Entwicklung des Endenergieverbrauchs privater Haushalte nach Energieträgern in Metzingen von 2012 bis 2050 (Vergleich der Szenarien basierend auf der CIB Analyse).....	101
Abbildung 62: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor nach Energieträgern in Metzingen von 2012 bis 2050 (Vergleich der Szenarien basierend auf der CIB Analyse).....	101
Abbildung 63: Entwicklung des Gesamtendenergieverbrauchs nach Energieträgern in Metzingen von 2012 bis 2050 (Vergleich der Szenarien basierend auf der CIB Analyse).....	102
Abbildung 64: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs nach Energieträgern in Metzingen von 2012 bis 2050 (Vergleich der Szenarien basierend auf der CIB Analyse).....	102
Abbildung 65: Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionen in Metzingen von 2012 bis 2050 (Vergleich der Szenarien basierend auf der CIB Analyse).....	103
Abbildung 66: Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Sektoren in Metzingen von 2012 bis 2050 (Szenario Strom-autarkes Metzingen (SAM)).....	104
Abbildung 67: Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Sektoren in Metzingen von 2012 bis 2050 (Szenario Endenergie-autarkes Metzingen (EAM)) .....	105
Abbildung 68: Entwicklung des Gesamtendenergieverbrauchs nach Energieträgern in Metzingen von 2012 bis 2050 (Vergleich der extremen Autarkieszenarien (SAM, EAM) mit dem Szenario Innovatives Metzingen II (IM2)).....	106
Abbildung 69: Entwicklung des Gesamtendenergieverbrauchs der privaten Haushalte nach Energieträgern in Metzingen von 2012 bis 2050 (Vergleich der extremen Autarkieszenarien (SAM, EAM) mit dem Szenario Innovatives Metzingen II (IM2)) .....	107
Abbildung 70: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor nach Energieträgern in Metzingen von 2012 bis 2050 (Szenario Strom-autarkes Metzingen (SAM)).....	108

Abbildung 71: Entwicklung der Fahrzeugkapazitäten im Verkehrssektor in Metzingen von 2012 bis 2050 (Szenario Strom-autarkes Metzingen (SAM)).....	109
Abbildung 72: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor nach Energieträgern in Metzingen von 2012 bis 2050 (Endenergie-Autarkes Metzingen ).....	109
Abbildung 73: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor nach Energieträgern in Metzingen von 2012 bis 2050 (Vergleich der extremen Autarkieszenarien (SAM, EAM) mit dem Szenario Innovatives Metzingen II (IM2)).....	110
Abbildung 74: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs nach Energieträgern in Metzingen von 2012 bis 2050 (Vergleich der extremen Autarkieszenarien (SAM, EAM) mit dem Szenario Innovatives Metzingen II (IM2)).....	111
Abbildung 75: Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionen in Metzingen von 2012 bis 2050 (Vergleich der extremen Autarkieszenarien (SAM, EAM) mit dem Szenario Innovatives Metzingen II (IM2)).....	111
Abbildung 76: Auf das Basisjahr 2012 abdiskontierte Systemkosten pro Einwohner und Jahr im Vergleich der fünf für Metzingen analysierten Szenarien.....	113
Abbildung 77: Vergleich der Szenarien für Metzingen für die Bereitstellung von 1 kWh Strom in der Wirkungskategorie Treibhauspotenzial (GWP) .....	113
Abbildung 78: Gegenüberstellung der Anteile der Energieträger an der Stromerzeugung und ihre Anteile an den Umweltwirkungen für Metzingen im Referenzzustand BAU 2012 .....	114
Abbildung 79: Gegenüberstellung der Anteile der Energieträger an der Stromerzeugung und ihre Anteile an den Umweltwirkungen für Metzingen im Szenario Innovatives Metzingen I (IM1) in 2050 .....	115
Abbildung 80: Gegenüberstellung der Anteile der Energieträger an der Stromerzeugung und ihre Anteile an den Umweltwirkungen für Metzingen im Szenario Innovatives Metzingen II (IM2) in 2050 .....	115
Abbildung 81: Gegenüberstellung der Anteile der Energieträger an der Stromerzeugung und ihre Anteile an den Umweltwirkungen für Metzingen im Szenario Endenergie-autarkes Metzingen (EAM) in 2050 .....	116
Abbildung 82: Vergleich der Szenarien für Metzingen für die Bereitstellung von 1 kWh Strom in der Kategorie fossiler Primärenergiebedarf (PED) .....	116
Abbildung 83: Vergleich der Szenarien für Metzingen für die Bereitstellung von 1 kWh Strom in der Wirkungskategorie Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP).....	117
Abbildung 84: Vergleich der Zusammensetzung der Stromerzeugung der Bilanzräume Metzingen 2012 und Baden-Württemberg 2010 .....	118
Abbildung 85: Vergleich der Szenarien für Metzingen für die Bereitstellung von 1 kWh Wärme in der Wirkungskategorie Treibhauspotenzial (GWP) .....	118

Abbildung 86: Vergleich der Szenarien für Metzinger für die Bereitstellung von 1 kWh Wärme in der Kategorie fossiler Primärenergiebedarf (PED) .....	119
Abbildung 87: Vergleich der Szenarien für Metzinger für die Bereitstellung von 1 kWh Wärme in der Wirkungskategorie Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP).....	119
Abbildung 88: Zusammensetzung der Fernwärmeerzeugung in den verschiedenen Szenarien für Metzinger.....	120
Abbildung 89: Gegenüberstellung der Anteile der Energieträger an der Wärmeerzeugung und ihre Anteile an den Umweltwirkungen für Metzinger im Referenzzustand BAU 2012 .....	120
Abbildung 90: Gegenüberstellung der Anteile der Energieträger an der Wärmeerzeugung und ihre Anteile an den Umweltwirkungen für Metzinger im Szenario Innovatives Metzinger I (IM1) in 2050.....	120
Abbildung 91: Gegenüberstellung der Anteile der Energieträger an der Wärmeerzeugung und ihre Anteile an den Umweltwirkungen für Metzinger im Szenario Innovatives Metzinger II (IM2) in 2050.....	121
Abbildung 92: Gegenüberstellung der Anteile der Energieträger an der Wärmeerzeugung und ihre Anteile an den Umweltwirkungen für Metzinger im Szenario Endenergie-autarkes Metzinger (EAM) in 2050 .....	121

**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Jährliche, periodische und saisonale Zuwachsraten der EE-Bruttostromproduktion in Deutschland von 1990 bis 2014 (in Mio kWh) .....	5
Tabelle 2: Energiebereitstellung – Berücksichtigte Technologien .....	13
Tabelle 3: Energienachfrage – Berücksichtigte Technologien .....	14
Tabelle 4: Modularer Aufbau des Ökobilanz-Systemmodells .....	22
Tabelle 5: Beschreibung der betrachteten Umweltwirkungskategorien .....	24
Tabelle 6: Umfrageergebnisse Wichtigkeit der Deskriptoren Baden-Württemberg .....	31
Tabelle 7: Vollkonsistente Autarkieszenarien für Baden-Württemberg .....	35
Tabelle 8: Szenarien mit 33-%iger lastgerechter Energie-Autarkie für Strom, Wärme und Mobilität für Baden-Württemberg .....	37
Tabelle 9: Szenarien mit sektorübergreifender 100-%iger bilanzieller Energie-Autarkie für Baden-Württemberg .....	38
Tabelle 10: Szenarien mit sektorübergreifender 100-%iger lastgerechter Energie-Autarkie für Baden-Württemberg .....	39
Tabelle 11: Sozioökonomische und verkehrswirtschaftliche Rahmenannahmen für Baden-Württemberg bis zum Jahr 2050 .....	41
Tabelle 12: Vergleich der Autarkiegrade der drei für Baden-Württemberg analysierten Szenarien .....	50
Tabelle 13: Empirische Verteilungen und Gewichtung zentraler Variablen .....	68
Tabelle 14: Legitimation verschiedener Beteiligungsverfahren .....	69
Tabelle 15: Kognitionen zur Energiewende (in %) .....	71
Tabelle 16: Bewertung der Beiträge lokaler Akteure zur Energiewende .....	72
Tabelle 17: Einstellungen zum Vertrauen in die Wissenschaft zur Umsetzung der Energiewende .....	73
Tabelle 18: Soziale Szenarien lokaler Energiewenden in der Einzelbetrachtung .....	74
Tabelle 19: Zentrale Ausbaupfade Bürgerumfrage (Ranking) .....	75
Tabelle 20: Einstellungen zu technischen und sozialen Kriterien von Autarkie und Autonomie (in %) .....	75

Tabelle 21: Auswahl zentraler EE-Technologien für Metzingen .....	76
Tabelle 22: Annahmen zum zukünftigen Energieverbrauch in Haushalten (Mehrfachnennungen) .....	77
Tabelle 23: Verwendete Heizungssysteme und Wärmenergien in den Haushalten von Metzingen .....	77
Tabelle 24: Baujahr der Gebäude und Wärmestandard bzw. Dämmung in Metzingen .....	78
Tabelle 25: Nutzung und Planungen zur Nutzung von EE-Anlagen in Metzingen.....	78
Tabelle 26: Umfrageergebnisse zur Wichtigkeit der Deskriptoren für Metzingen .....	84
Tabelle 27: Vollkonsistente Szenarien für Metzingen .....	86
Tabelle 28: Ausbaupfade für die dezentrale Erzeugung in Metzingen und Kosten für den Verteilnetzausbau .....	93
Tabelle 29: Rahmenbedingungen für das Szenario Stagnierendes Metzingen (BAU) basierend auf der CIB Analyse .....	98
Tabelle 30: Annahmen zum Strommixfaktor für das Szenario Stagnierendes Metzingen (BAU).....	98
Tabelle 31: Rahmenbedingungen für die Szenarien Innovatives Metzingen I (IM1) und Innovatives Metzingen II (IM2) basierend auf der CIB Analyse .....	100
Tabelle 32: Vergleich der Autarkiegrade der fünf für Metzingen analysierten Szenarien.....	112
Tabelle 33: Vergleich der Autarkiegrade der fünf für Metzingen analysierten Szenarien.....	124
Tabelle 34: Vergleich der Autarkiegrade der drei für Baden-Württemberg analysierten Szenarien...	125



## 1 Einleitung

Die Landesregierung von Baden-Württemberg hat im Klimaschutzgesetz für das Land das Ziel formuliert, die Treibhausgasemissionen bis 2050 um 90 % gegenüber den Emissionen im Jahr 1990 zu verringern. Auch zahlreiche Kommunen haben im Rahmen ihres Einflussbereiches vielfältige Aktivitäten zur lokalen und regionalen Nutzung erneuerbarer Energien, zur Energieeinsparung und zur Emissionsminderung im Allgemeinen gestartet. Zusammengefasst werden diese Entwicklungen unter dem Schlagwort der „Energie-Autarkie“ diskutiert.

Im Rahmen dieses Projektes wird ein „energie-autarkes“ Gesamtsystem in einem interdisziplinären Team von Ingenieur- und Naturwissenschaftlern, Ökonomen und Soziologen modelliert und simuliert. Damit soll auch verdeutlicht werden, welche Bedeutung dabei Energiespeichern und Flexibilisierungspotenzialen zukommt. Für das Bundesland Baden-Württemberg soll mittels einer integrierten Energiesystemmodellierung der Frage nachgegangen werden, wie sich unterschiedliche Energie-Autarkiegrade auf das Energieverbrauchs-niveau und seine Struktur, die Ausgestaltung der notwendigen Infrastruktur (Speicher, Netze usw.), die Treibhausgasemissionen und die wirtschaftlichen Belastungen auswirken. Im Einzelnen sollen die folgenden drei Teilfragen beantwortet werden:

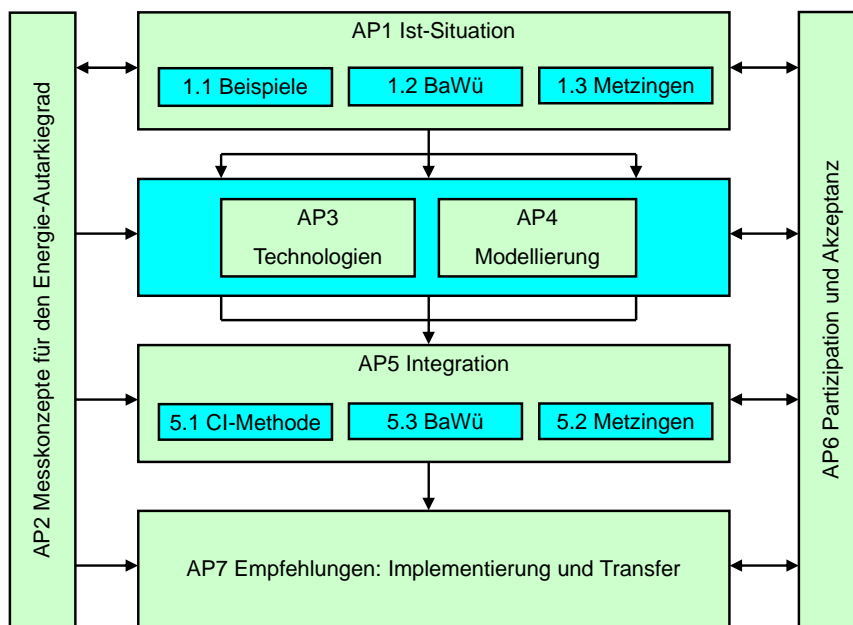
- Ist auf der Ebene eines Bundeslandes Autarkie im Energiebereich sinnvoll / möglich?
- Welche Speicherdimensionen / -technologien sind in welchen Bereichen sinnvoll / notwendig?
- Wie werden derartige Versorgungsstrukturen von der Bevölkerung akzeptiert?

Auch zahlreiche Kommunen haben im Rahmen ihres Einflussbereiches vielfältige Aktivitäten zur lokalen und regionalen Nutzung erneuerbarer Energien, zur Energieeinsparung und zur Emissionsminderung im Allgemeinen gestartet. Über den Charakter von Modellprojekten hinaus, haben sich ländliche Gemeinden als sogenannte Bioenergiedörfer zusammen geschlossen (BMEL, et al.), mit dem Ziel ihren Strom- und Wärmebedarf ausschließlich über Biomasse und Solarenergie (Stichwort Solarthermie) zu decken. Auf regionaler Ebene finden sich inzwischen sogenannte 100% Erneuerbare-Energie-Regionen (Institut für dezentrale Energietechnologien, 2016), die ihre Energieversorgung auf lange Sicht vollständig auf Erneuerbare Energien umstellen wollen. Um Fragen der Energie-Autarkie auf Ebene einer Kommune zu analysieren, wurde parallel zu dem über das BWPLUS-Programm Energie/Energiespeichertechnologien geförderten Vorhaben für das Bundesland Baden-Württemberg ein weiteres Teilvorhaben konkret für die Stadt Metzingen durchgeführt, das finanziell von der Stadt Metzingen und von den Stadtwerken Metzingen unterstützt wurde. Zur vergleichenden Analyse werden beide Teilvorhaben gemeinsam in diesem Ergebnisbericht dargestellt.

In beiden Teilvorhaben – Baden-Württemberg und Metzingen – wird ein interdisziplinärer Lösungspfad beschrieben unter Einbeziehung von Ingenieur-, wirtschafts-, naturwissenschaftlicher und sozialwissenschaftlicher Kompetenz. Die technische Kompetenz beinhaltet Simulationen und Szenarien zu den drei Kernbereichen der Energiewende: Wärme, Strom und Mobilität im privaten, industriellen und gewerblichen Sektor. Hierzu gilt es komplexe Simulationsmodelle auf Basis vorhandener erprobter Simulationssysteme weiter zu entwickeln und informationstechnisch miteinander zu einem modularen Modellverbund über die Institutsgrenzen hinweg in Verbindung zu bringen. Hinzu kommen soziale Szenarien (Partizipation) auf Basis von Bürgerumfragen, Stakeholderbefragungen und Diskursverfahren und -formaten (z. B. Bürgergutachten). Abgebildet werden soll dadurch das prototypische Energieverhalten und

die Energienutzung, die Bereitschaft zur Handlungsänderung und dafür subjektiv als wichtig definierte gesellschaftliche Rahmenbedingungen sowie die Akzeptanz verschiedener Technologien. Die Einschätzung relevanter Parameter und der Tendenz zu deren Veränderung soll wiederum mittels der Cross-Impact-Bilanzanalyse geleistet werden, u. a. durch Expertenbefragungen. Diese Vorgehensweise soll die Komplexität des modularen Modellverbundes reduzieren und pragmatisch auf als wissenschaftlich realistisch empfundene Optionen eingrenzen.

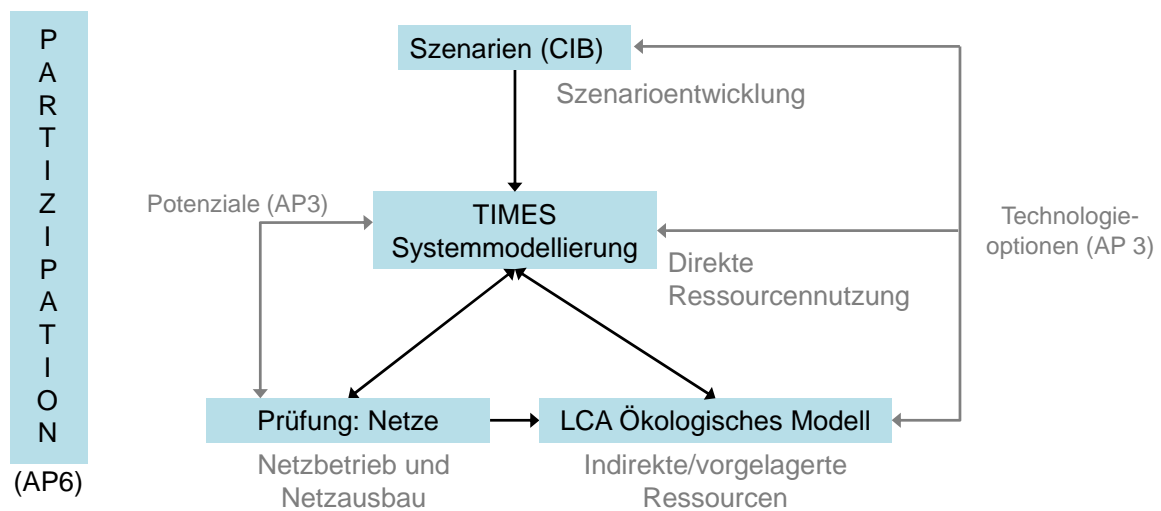
Zur Umsetzung des Ansatzes gliedert sich das Projekt in sieben Arbeitspakete (AP), die in Abbildung 1 mit ihren Verbindungen dargestellt sind.



**Abbildung 1: Arbeitsprogramm und Wechselwirkungen im Projektverbund**

Während die Arbeitspakete 1 und 2 die Grundlagen bezüglich der Ist-Situation und der vorhandenen Messkonzepte für den Energie-Autarkiegrad legen, widmet sich Arbeitspaket 3 den wichtigsten Technologien, die für die Erreichung von Energie-Autarkie relevant sind. Arbeitspaket 6 ordnet die technischen und modellgestützten Analysen in die Diskussion mit Stakeholdern und Bürgerinnen und Bürgern ein.

Zur Integration der in AP4 entwickelten Modelle werden zunächst die möglichen Kombinationen mittels der Cross-Impact-Bilanzanalyse (Weimer-Jehle, 2006) auf eine reduzierte Anzahl von plausiblen Kombinationen von Deskriptoren im Entwicklungsraum reduziert. Mittels Energiesystemmodellierung werden die in der CIB aufgestellten Szenarien quantifiziert und der direkte Ressourceneinsatz bilanziert. Die Netzmodellierung stellt im Modellverbund die Plausibilisierung des Netzbetriebs und mögliche Ausbaustrategien sicher. Die Betrachtung des vorgelagerten und indirekten Ressourceneinsatzes erfolgt über ein Ökologisches Gesamtmodell auf Basis der Ganzheitlichen Bilanzierung (vgl. Abbildung 2).



**Abbildung 2: Integrative Autarkieuntersuchung im Gesamtmodell**

Ziel des letzten Arbeitspakets (AP7) ist es, aus den Ergebnissen des Vorhabens Rückschlüsse für die Energiepolitik zu ziehen sowie Empfehlungen für die Energiewirtschaft abzuleiten. Ein Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Frage, wie der Begriff der Energie-Autarkie zu verstehen ist und welche Konsequenzen für Baden-Württemberg bzw. für Metzingen mit der Umsetzung dieses Konzeptes einhergehen würden und welche Rolle Speicher und Flexibilisierungsoptionen dabei einnehmen sollten. Auch die jeweilige Rolle der einzelnen Akteure in den Sektoren Umwandlung, Industrie, Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und Verkehr und ihre möglichen Handlungsoptionen bei der Umsetzung einer auf Energie-Autarkie ausgelegten Strategie sind zu bewerten.

## 2 Grundlagen

Bevor ausführlicher auf die einzelnen Fallstudien eingegangen wird, werden im Folgenden die Grundlagen dargestellt, die für die Untersuchung von Bedeutung sind und in Anwendung kommen. Sie bestehen aus drei Teilen, der Diskussion von Partizipations- und Akzeptanzaspekten, den unterschiedlichen Messkonzepten für den Energie-Autarkiegrad und schließlich den Methoden, die für die Analyse verwendet werden.

### 2.1 Partizipation und Akzeptanz

#### 2.1.1 Die Definition der Energiewende und ihre Soziotechnik

Die Energiewende, definiert als die Transformation des gesamten Energieversorgungssystems von Erzeugung, Speicherung, Verteilung und Steuerung von Bedarf und Nachfrage an Energien auf Basis erneuerbarer Energiequellen (im Folgenden kurz: EVS-EE) ist eigentlich eine Soziotechnik. Denn es geht um die Akzeptanz neuer Energiequellen, eines neugestalteten Versorgungssystems wie auch um die aktive Integration der Bürger als Nutzer, Anwender, „Prosumenten“ und Anlageneigentümer in dieses neue, dezentral organisierte Energieversorgungssystem. Die Interaktionen von Politik, Bürger/innen, Wirtschaft und Wissenschaft werden damit bedeutsam für die erfolgreiche Umsetzung der geplanten EE-Energiewende.

Erstmals werden bei einer Energiewende (die es in der Vergangenheit schon mehrfach gab, z. B. ÖL>Kohle/Gas>Atomkraft<sup>1</sup>) nicht nur die Energieträger ausgetauscht, sondern auch die gesamte Systemarchitektur verändert (Netzausbau, Smart-Grids, Smart Systems, HGÜ-Leitungen, Speicher).

Erstmals verändern sich auch massiv die Eigentumsstrukturen. Neben wenige große Energieversorger treten für PV-Anlagen hunderttausende Privathaushalte, bundesweit inzwischen über 600 Bürgerenergiegenossenschaften mit Investitionen in Milliardenhöhe (Pfenning, et al., 2016), Investment-fonds und Anleger von Windanlagen. Dies erhöht die Bedeutung der neuen Energiemärkte.

Erstmals dezentralisiert sich in einem energieintensiven nationalen Hochtechnologiestandort die Energieversorgung durch eine Vielzahl von Einzelanlagen und eines Energiemix, der vor allem lokale Ressourcen berücksichtigt. Diese müssen miteinander verbunden und energetisch ausgeglichen werden. Damit assoziiert sind Autarkie und Autonomie als neue zentrale Wertorientierungen in der Energiepolitik (Deuschle, et al., 2015). Dies erhöht die Bedeutung der Akzeptanz von Anlagen und nötiger EE-Infrastruktur.

Da eine solche Auswahl den Ausbaupfad von EE-Technologien für Jahrzehnte festlegt, ist die Beteiligung nachfolgender Generationen relevant, bisher aber kaum umgesetzt. Dies thematisiert die Energiewende als Bildungsthema und als Agenda für die Wissenschaftskommunikation (vgl. PUSH-Ansatz<sup>2</sup>).

---

<sup>1</sup> Auch für diese Energiewenden gab es politische (Öl-„schock“ 1973) wie wirtschaftliche Gründe (sinkende Preise für Kohle, Umweltschutz („blauer Himmel über der Ruhr“) und weniger Bedeutung hatte die technische Innovation der einzelnen Technologien (Entschwefelung, Wirbelverfeuerung, CO<sub>2</sub>-Abscheidung (CES) u. a.).

<sup>2</sup> Public Understanding of Science and Humanities, ein Programm zur populärwissenschaftlichen Vermittlung relevanter wissenschaftlicher Themen und technischer Innovationen.

Inhaltlich assoziiert ist damit die Energieeffizienz und möglicher Weise Suffizienz als maßgebliche Säule der Energiewende im Verhaltensbereich bzgl. des Umgangs und Verständnisses von Energie (u. a. steigender Energieverbrauch, Rebound-Effekte u. a.). Konkret geht es um eine Technikmündigkeit der Bürger zur Entscheidung der Auswahl örtlich adäquater EE-Technologien und Sozialisationseffekte im Verhaltensbereich.

### 2.1.2 Die EE-Energiewende als Gesellschaftstechnologie

Ein entscheidendes Merkmal der EE-Energiewende ist der überparteiliche politische Konsens im Jahre 2011 nach der dreifachen Atomkatastrophe im japanischen Kernkraftwerk Fukushima. Dies erhob die EE-Technologien in den Stand einer Gesellschaftstechnologie als maßgebliche Technologien zur zukünftigen Energieversorgung als Teil der staatlichen Daseinsvorsorge für seine Bürgerschaft. Das heißt für deren Erforschung, Anwendung und Verbreitung bestehen rechtliche Grundlagen, Förderungen und eine politische Legitimation. Allerdings bedingt dies auch, dass sich diese Legitimation der EE-Technologien sich aus ihrer Effizienz, Akzeptanz und Akzeptabilität ergibt und nicht nur aus externen Begründungszusammenhängen wie Klimaschutz und Ausstieg aus der Hochrisiko-Technologie Atomkraftwerk (Brodecki, et al., 2016). Deshalb zählen dazu Information und Aufklärung für die Akzeptabilität (Duldung einer technischen Innovation trotz individueller Ablehnung aufgrund gesellschaftlichen Entscheidungen oder Funktionalität) wie auch Partizipation (bis hin zur finanziellen Beteiligung) für die individuelle Akzeptanz. Eine Gesellschaftstechnologie geht immer mit einer Soziotechnik einher. Die Interaktionen der Nutzer und Konsumenten mit den EE-Technologien wirkt auf deren systemische Integration zurück, angefangen bei der Auswahl möglicher EE-Technologien für ein lokales EE-EVS über die Smartsystems und deren Usability bis hin zur Nutzungsbereitschaft dezentraler kollektiver Versorgungssysteme wie EE-KWK und EE-BHKWs und der Investitionsbereitschaft. So beschleunigten sich die Zubauraten an EE-Anlagen nach ihrer 2011 erfolgten Legitimation als Gesellschaftstechnologien nochmals rasant (Tabelle 1).

**Tabelle 1: Jährliche, periodische und saisonale Zuwachsraten der EE-Bruttostromproduktion in Deutschland von 1990 bis 2014 (in Mio kWh)**

Ereignisse:

Einspeisegesetz 1992, Ur-EEG 2000, erste Novellierungen 2007, weitere Novellierungen 2012, 2014, geplant 2016

bis 2011 politischer Streit und fehlender Konsens zum Atomausstieg, ab 2011 Energiewende und überparteilicher Konsens

ab 1990 aufkommende Klimaschutzdebatte und Zunahme der Wetterextreme, Verfestigung von Klimaschutz als politisches Ziel

bis 2010 technischer Fokus auf Erzeugungstechnologien, Fortschritte vor allem bei Wind-Anlagen, ab 2010 Ausbau Speicher & Netz(e)

Quantitativer Ausbaupfad und Aufbau Förderprogramme								Restringierter Ausbaupfad und gesellschaftlicher Konsens								
1990	1995	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
18,9	25,3	36,5	38,5	45,1	45,6	56,6	62,5	71,6	88,3	93,2	94,9	104,8	123,8	143,8	152,4	160,6
	6,4*	11,2	2	6,6	0,5	11	5,9	9,1	16,7	4,9	1,7	9,9	19	20	8,6	8,2
17,6**			58,4									65,7				
5,87***			6,49									13,14				

\* Zuwachs im Vergleich zum Vorjahr

\*\* absoluter Zuwachs in Mia. kWh, nach obigen Daten verdoppelt sich alle 10 Jahre annähernd die installierte EE-Kapazität

\*\*\* mittlerer Zuwachs in den jeweiligen Zeitperioden in Mio. kWh | Quelle: Daten in Schaubild 1 (ZSW Universität Stuttgart, 2010)

Dies erfolgte trotz aller Bemühungen der Politik, den Zu- und Ausbau zu restringieren (vgl. EEG-Novellierungen nach 2014 mit Ausbaukorridoren, Absenkung der Vergütungen und Streichung von

Privilegien für EE-Energien). Die Zeiträume der Verdopplung der EE-Kapazitäten halbierten sich, was in vielen Szenarien vor 2011 überhaupt nicht berücksichtigt wurde<sup>3</sup>.

### **2.1.3 Kommunen als soziale Arenen der Energiewende: Lokale Autarkie und Autonomie**

Die dezentrale technisch autarke Versorgung von Gemeinden oder Arealen/Quartieren innerhalb von Gemeinden durch örtlich erzeugten Strom und Wärme rückt mit der Energiewende ebenso in den Fokus wie die autonome Auswahl und Selbstbestimmung über die lokale Energieversorgung. Es geht also um technische und (klein-)räumliche Dezentralisierung. Sozialwissenschaftlich weist Dezentralisierung Analogien zum Konzept der Sozialökologie auf. Inwieweit räumlich-lokale Umwelten das menschliche Verhalten beeinflussen? Denn die technische Dezentralisierung bedingt eine soziale Beteiligung und Abstimmung a) die zentralen lokalen Ausbaupfade und Auswahl passender EE-Technologien, b) die Bereitschaft zu kollektiven Nutzungen, c) die Bereitschaft sich über EE-Technologien zu informieren, um über (a) entscheiden zu können, d) Sektorenkopplungen von Wärme & Strom für höhere Effizienz und (e) zur Energieeinsparung und Energieeffizienz.

Inwieweit es nur zur öffentlichen Agenda oder auch zum individuellen Thema wird, kann die Akzeptanz und Beteiligung beeinflussen. Die Sozialökologie führt technisch betrachtet zum zellulären Ansatz (VDE 2013). In diesem wird die Autarkie „heruntergebrochen“ auf kleinräumliche Versorgungszellen innerhalb einer Gemeinde wie Quartiere, Industrieareale, Siedlungsgebiete u. ä., die sich wiederum gegenseitig vernetzen und ausbalanzieren in Erzeugung & Speicherung, Bedarf & Nachfrage. Damit erhalten Smart-Grids und Smartsystems eine erhöhte Bedeutung. Die Energiewende wird hierdurch auch technisch interdisziplinärer.

Die extremen Ausbaupfade sind ein quantitativer, nicht limitierter Ausbau versus einen bedarfsorientierten Pfad mit einem Demand-Side-Management (Abbildung 3). An den Schnittstellen beider Extreme und modifizierter Szenarien finden sich die gesellschaftspolitischen Entscheidungspunkte. Die dazugehörigen Visionen sind beim quantitativen Ausbau die „All Electric Society“, in der Strom als „saubere“ Energieform alle Lebensbereiche umfasst, bis hin zur Elektromobilität. Überzähliger EE-Strom findet seine Verwendung in Power-to-X-Technologien. Der bedarfsorientierte Pfad trägt den ressourcensparenden Nachhaltigkeitsgedanken Rechnung und bedarf weniger Netze und weniger Speicher, dafür aber vieler Smart-Systems. Die Technologien sind somit vom Ausbaupfad abhängig.

Die sozialen Arenen, in denen die verschiedenen Interessengruppen und ggf. die Bevölkerung über diese Ausbaupfade entscheiden, sind die Kommunen. Hier wird über die Verzweigung der verschiedenen Ausbaupfade, mithin Szenarien entschieden. Diese Entscheidungen reichen weit über die Strom-Wärmeversorgung mittels eines EVS-EE hinaus. Sie betreffen Mobilität, Energieeffizienz, Lebensmittelproduktion vor Ort (in Konkurrenz zur Biomasse für KWK-Systeme), Architektur und Stadtentwicklung (autarke Gebäude, Smart-Factory). Diese Entscheidungsfindung ist zudem abhängig von ortsspezifischen geologischen Gegebenheiten wie Windstärken, Sonneneinstrahlung, Wärmeeinstrahlung, Wärmeeinstrahlung, Wärmeeinstrahlung im Erdreich, verfügbaren Wasserressourcen u. v. a.

---

<sup>3</sup> Für eine These der Entkopplung von EEG-Förderung und Ausbauraten sind diese Daten nicht ausreichend, aber ein erster Indikator eines sich eventuell anbahnenden relevanten Bruchs im Ausbau der EE-Technologien.

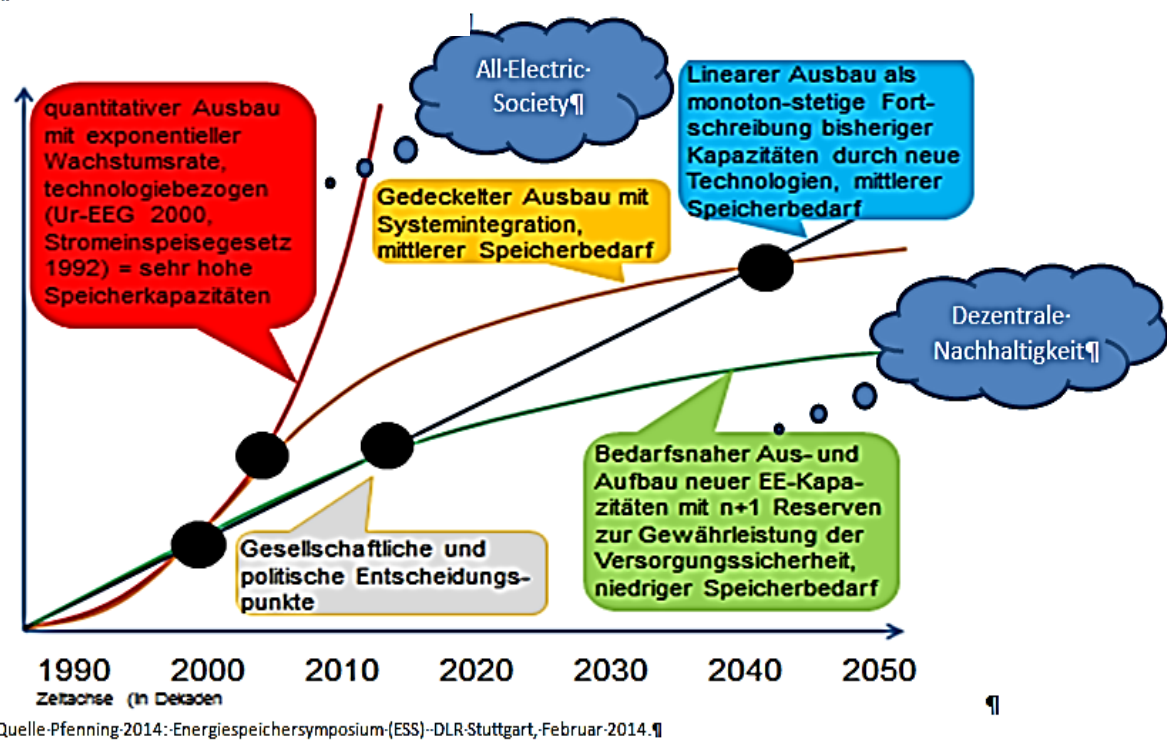


Abbildung 3: Zentrale Ausbaupfade der Energiewende

### 2.1.4 Bürgerbeteiligung zur Energiewende

Aus diesen sozialökologischen Bezügen (Informiertheit, Wissenschaftskommunikation, EE-Technikmündigkeit, Auswahl Ausbaupfad, Effizienzverhalten, EE-verhaltensgerechte Sozialisation des Energieverbrauchs) speist und legitimiert sich die Bürgerbeteiligung. Eine soziotechnische Beteiligung der Bürger reicht jedoch weiter, weil die Bürger selbst über Form und Format ihrer Beteiligung entscheiden (auch zur Erhöhung der Akzeptanzangebote), die technischen Implikationen einbezieht (Verbesserung der Messdaten durch individuelle Datenerhebung) und die technischen Szenarien durch soziale Szenarien ergänzt. Die soziotechnische Bürgerbeteiligung mündet in einem interaktiven Prozess: In engagierten Kleingruppen werden Detailfragen der EE-Technologien für den lokalen Einsatz erörtert und die Rahmenbedingungen benannt (i.e. Bürgergutachten) und deren Ergebnisse an die Öffentlichkeit weitergegeben zur Diskussion und Einbringen neuer Gesichtspunkte. Schritt für Schritt entsteht so ein Bürgervotum (Pfenning, et al., 2008).

Die Legitimation der Bürgerbeteiligung kann durch eine Bürgerumfrage, idealer Weise als Vollerhebung erfolgen. Zusätzlich können individuelle Angaben zu Energieverbrauch und -verhalten, Wohngebäuden und Einstellungen zur Energiewende sowie Informationsbedürfnissen und Szenarien (Ausbaupfade) die Datenbasis für technische Simulationen verbessern. Sie wird damit zu einem zentralen sozialwissenschaftlichen Instrument der soziotechnischen Bürgerbeteiligung.

## 2.2 Messkonzepte für Energie-Autarkie

Im Rahmen einer Literaturrecherche wurde die Verwendung des Autarkie- und Autonomiebegriffes im Energiebereich untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass die Begriffe „Energie-Autarkie“ und „Energie-

Autonomie“ in der Literatur meist deckungsgleich und ohne genaue Definition, auf welche Bereiche (z. B. Strom, Wärme, Verkehr, etc.) sie sich erstrecken, gebraucht werden.

In einem Artikel, welcher mittlerweile in der „Zeitschrift für Energiewirtschaft“ erfolgreich einem peer-review Verfahren unterzogen und veröffentlicht wurde (Deuschle, et al., 2015), wurden die Ergebnisse der Literaturrecherche zusammengefasst. Es wurde eine grundlegende Diskussion und Abgrenzung der Begriffe „Autonomie“ und „Autarkie“ erstellt und ein Definitionsvorschlag zur Verwendung des Begriffes „Energie-Autarkie“ erarbeitet.

So ist zunächst einmal zwischen bilanzieller und lastgerechter Energie-Autarkie zu trennen. Überdies kann die Grenze des Autarkie-Begriffs unterschiedlich weit gefasst werden. Als mögliche Betrachtungsweisen können die Versorgung mit Wärme und/oder Strom genannt werden. Seltener wird der Aspekt des Energieverbrauchs im Mobilitätssektor (Treibstoffe) in die Autarkiebetrachtung mit eingeschlossen. Die unterschiedlichen „Wertigkeiten“ verschiedener Energieträger sollten hierbei beachtet werden.

Dieser Bericht beschäftigt sich mit der Betrachtung von bilanziellen Energie-Autarkiegraden. Untersucht werden einerseits die Teilbereiche Strom, andererseits wird der bilanzielle Energie-Autarkiegrad für die gesamte primärenergetische Versorgung inklusive der Bereiche Strom, Wärme und Mobilität bestimmt.

## **2.3 Methodische Grundlagen**

Die Untersuchung der Energie-Autarkiegrade erfolgt gemäß Abbildung 2 integriert in einem Gesamtmodell unter Verknüpfung von Cross-Impact-Bilanzanalyse, Ganzheitlicher Bilanzierung, Energiesystemmodellierung und Netzmodell sowie einem Ökobilanz-Systemmodell. Diese unterschiedlichen Bausteine des Gesamtmodells werden im Folgenden hinsichtlich der dabei zur Anwendung kommenden methodischen Grundlagen näher ausgeführt.

### **2.3.1 Cross-Impact-Bilanzanalyse**

Als Standardwerkzeug der Szenariotechniken sind Cross-Impact Methoden seit längerem etabliert und konzentrieren sich auf die Analyse der Wechselwirkungen zwischen den Bestandteilen des zu analysierenden Systems. Besonders geeignet sind sie für die Analyse von Systemen, die Einflüsse aus Bereichen unterschiedlicher Forschungsdisziplinen aufweisen und für wegen dieser Heterogenität oder wegen zu hoher Komplexität keine umfassenden numerischen Modelle bestehen (Weimer -Jehle, 2014). Die Cross-Impact-Bilanzanalyse (CIB) ist Teil dieser Methodenfamilie und eignet sich „aufgrund ihrer transparenten Logik und ihrer methodischen Flexibilität besonders gut für die qualitative Systemanalyse von multidisziplinären Systemen“ (Weimer- Jehle, 2009). Insbesondere ist sie auch für die Erstellung von Kontextszenarien und sozio-technischen Energieszenarien geeignet, da sie qualitative Systemfaktoren miteinbeziehen kann, Zukunftsannahmen explizit werden lässt und die Unsicherheit in Bezug auf soziale und andere Zukunftsentwicklungen berücksichtigen kann (Weimer-Jehle, et al., 2016).

In Anlehnung an Micheal Porter, der Szenarien als inwendig konsistente Bilder einer möglichen Zukunft versteht, konzentriert sich die CIB auf die interne Konsistenz der Szenarien als wichtigstes Gütekriterium. Dazu werden die Wechselwirkungen zwischen allen Szenarioelementen (Deskriptoren) untersucht – dies geschieht meist durch die Einholung von Expertenurteilen – und die widerspruchsfreien Kombinationen der unterschiedlichen Deskriptorausprägungen identifiziert (Weimer- Jehle, 2009; Weimer-



Jehle, 2006). Idealtypisch verläuft die Durchführung einer CIB nach Weimer-Jehle (Weimer- Jehle, 2009) in folgenden Schritten:

- Identifikation der relevantesten Einflussfaktoren im untersuchten System
- Festlegung der unterschiedlichen Entwicklungsmöglichkeiten der einzelnen Einflussfaktoren
- Erhebung der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Entwicklungsmöglichkeiten aller Einflussfaktoren
- Identifikation von widerspruchsfreien, also konsistenten Kombinationen der unterschiedlichen Entwicklungsmöglichkeiten aller Einflussfaktoren

Die Erhebung der Wechselwirkungen geschieht in diesem Zusammenhang durch eine qualitative Bewertung, ob und welchen Einfluss die Realisierung einer bestimmten Entwicklungsmöglichkeit (Deskriptorvariante) eines Einflussfaktors (Deskriptor) auf die Realisierung aller möglichen Entwicklungsmöglichkeiten aller anderen Einflussfaktoren hat. Dabei sind folgende Bewertungen möglich:

- -3: stark hemmender Einfluss
- -2: hemmender Einfluss
- -1: schwach hemmender Einfluss
- 0: kein Einfluss
- +1: schwach fördernder Einfluss
- +2: fördernder Einfluss
- +3: stark fördernder Einfluss

Das Ergebnis dieser Schritte ist eine „Cross-Impact-Matrix“ über die nun konsistente Kombinationen der Deskriptorvarianten identifiziert werden können, indem die Wirkungsbilanzen der einzelnen Deskriptoren untersucht werden. Beispielhaft ist in Abbildung 4 eine kleine Cross-Impact-Matrix mit fünf Deskriptoren aufgeführt (Weimer - Jehle, 2016).

Im gezeigten Beispiel handelt es sich um ein inkonsistentes Szenario. Zwar haben die Deskriptoren A, B, C, E und F Varianten eingenommen, die die jeweils höchste Wirksumme aufweist, allerdings ist das beim Deskriptor D nicht der Fall. Die Cross-Impacts der anderen Deskriptoren sprechen also dafür, dass Deskriptor D nicht in der Variante D1 sondern in der Variante D2 vorliegen müsste. Hier genügt es nun aber nicht, nur den Zustand dieses Deskriptors auf D2 zu ändern, um ein konsistentes Szenario zu erhalten, da sich dadurch auch die Wirkungsbilanzen aller anderen Deskriptoren verändern. Um die konsistenten Szenarien einer Cross-Impact-Matrix zu identifizieren, müssen daher die Wirkungsbilanzen aller möglichen Kombinationen der unterschiedlichen Deskriptorvarianten untersucht werden. In diesem Fall sind das  $3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 = 486$  Möglichkeiten. In einem konsistenten Szenario ist die Wirksumme aller angenommenen Dekriptorvarianten jeweils die höchste der zugehörigen Wirkungsbilanz, wie im in Abbildung 5 dargestellten Beispiel.

Cross-Impact Matrix "SomewhereLand"	A.Reg			B.AP			C.WL			D.W		E.SZ			F.GW		
	A1 patriotisch	A2 wirtschaftsor.	A3 sozial	B1 Kooperation	B2 Rivalität	B3 Konflikt	C1 sinkend	C2 stagnierend	C3 dynamisch	D1 ausgeglichen	D2 gr. Kontraste	E1 soz. Friede	E2 Spannungen	E3 Unruhen	F1 Leistung	F2 Solidarität	F3 Familie
<b>A. Regierung</b>																	
A1 "patriotisch"				-2	1	1	0	0	0	0	0	-2	1	1	0	0	0
A2 "wirtschaftsorientiert"				2	1	-3	-2	-1	3	-2	2	0	0	0	2	-1	-1
A3 "sozial"				0	0	0	0	2	-2	3	-3	2	-1	-1	-2	2	0
<b>B. Außenpolitik</b>																	
B1 Kooperation	0	0	0				-2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
B2 Rivalität	0	0	0				0	1	-1	0	0	1	0	-1	0	0	0
B3 Konflikt	3	-1	-2				3	0	-3	0	0	3	-1	-2	-2	1	1
<b>C. Wirtschaftsleistung</b>																	
C1 sinkend	2	1	-3	0	0	0				-2	2	-3	1	2	0	0	0
C2 stagnierend	-1	2	-1	0	0	0				0	0	0	0	0	0	0	0
C3 dynamisch	0	0	0	0	0	0				-2	2	3	-1	-2	0	0	0
<b>D. Wohlstandsverteilung</b>																	
D1 ausgeglichen	0	0	0	0	0	0	0	0	0			3	-1	-2	-2	1	1
D2 große Kontraste	0	-3	3	0	0	0	0	0	0			-3	1	2	2	-1	-1
<b>E. Sozialer Zusammenhalt</b>																	
E1 sozialer Friede	0	0	0	0	0	0	-2	-1	3	0	0				2	-1	-1
E2 Spannungen	0	0	0	-1	0	1	1	1	-2	0	0				-1	0	1
E3 Unruhen	2	-1	-1	-3	1	2	3	0	-3	0	0				-2	-1	3
<b>F. Gesellschaftliche Werte</b>																	
F1 Leistung	0	3	-3	0	0	0	-3	0	3	-3	3	-2	1	1			
F2 Solidarität	1	-2	1	0	0	0	-1	2	-1	2	-2	2	-1	-1			
F3 Familie	0	0	0	0	0	0	-1	2	-1	1	-1	2	-1	-1			
Szenario:	↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓																
<b>Wirkungsbilanzen</b>	0	3	-3	2	1	-3	-9	-1	10	-7	7	4	-1	-3	2	-1	-1
Maximalwert:	↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑																

Die Wirkungssumme der Variante "B1 Außenpolitik: Kooperation" (Pfeil von 2 auf 1)

Die Wirkungsbilanz des Deskriptors "E Sozialer Zusammenhalt" (Klammer um 4, -1, -3)

Abbildung 4: Wirkungsbilanzen eines inkonsistenten Szenarios (Weimer-Jehle, et al., 2016)

Cross-Impact Matrix "SomewhereLand"	A.Reg			B.AP			C.WL			D.W		E.SZ			F.GW		
	A1 patriotisch	A2 wirtschaftsor.	A3 sozial	B1 Kooperation	B2 Rivalität	B3 Konflikt	C1 sinkend	C2 stagnierend	C3 dynamisch	D1 ausgeglichen	D2 gr. Kontraste	E1 soz. Friede	E2 Spannungen	E3 Unruhen	F1 Leistung	F2 Solidarität	F3 Familie
<b>A. Regierung</b>																	
A1 "patriotisch"				-2	1	1	0	0	0	0	0	-2	1	1	0	0	0
A2 "wirtschaftsorientiert"				2	1	-3	-2	-1	3	-2	2	0	0	0	2	-1	-1
A3 "sozial"				0	0	0	0	2	-2	3	-3	2	-1	-1	-2	2	0
<b>B. Außenpolitik</b>																	
B1 Kooperation	0	0	0				-2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
B2 Rivalität	0	0	0				0	1	-1	0	0	1	0	-1	0	0	0
B3 Konflikt	3	-1	-2				3	0	-3	0	0	3	-1	-2	-2	1	1
<b>C. Wirtschaftsleistung</b>																	
C1 sinkend	2	1	-3	0	0	0				-2	2	-3	1	2	0	0	0
C2 stagnierend	-1	2	-1	0	0	0				0	0	0	0	0	0	0	0
C3 dynamisch	0	0	0	0	0	0				-2	2	3	-1	-2	0	0	0
<b>D. Wohlstandsverteilung</b>																	
D1 ausgeglichen	0	0	0	0	0	0	0	0	0			3	-1	-2	-2	1	1
D2 große Kontraste	0	-3	3	0	0	0	0	0	0			-3	1	2	2	-1	-1
<b>E. Sozialer Zusammenhalt</b>																	
E1 sozialer Friede	0	0	0	0	0	0	-2	-1	3	0	0				2	-1	-1
E2 Spannungen	0	0	0	-1	0	1	1	1	-2	0	0				-1	0	1
E3 Unruhen	2	-1	-1	-3	1	2	3	0	-3	0	0				-2	-1	3
<b>F. Gesellschaftliche Werte</b>																	
F1 Leistung	0	3	-3	0	0	0	-3	0	3	-3	3	-2	1	1			
F2 Solidarität	1	-2	1	0	0	0	-1	2	-1	2	-2	2	-1	-1			
F3 Familie	0	0	0	0	0	0	-1	2	-1	1	-1	2	-1	-1			
Szenario:	↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓																
<b>Wirkungsbilanzen</b>	7	-4	-3	-5	2	3	5	2	-7	-1	1	-3	1	2	-2	-1	3
Maximalwert:	↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑																

Abbildung 5: Wirkungsbilanzen eines konsistenten Szenarios (Weimer-Jehle, et al., 2016)

### 2.3.2 Ganzheitliche Bilanzierung

Grundsätzlich erfolgt die Untersuchung der Technologieoptionen mit dem Ziel, unter Berücksichtigung lokaler Randbedingungen, geeignete Technologien für die Realisierung von Energie-Autarkie zu identifizieren und spezifische Informationen über die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen bereitzustellen. Der Schwerpunkt liegt dabei im Projektkontext auch auf der zielgruppenorientierten Aufbereitung der gewonnenen Daten. Die Bestimmung der Umweltprofile der Technologieoptionen erfolgt auf Basis einer technischen Charakterisierung. Abbildung 6 zeigt das Vorgehen zur Untersuchung der Technologieoptionen.

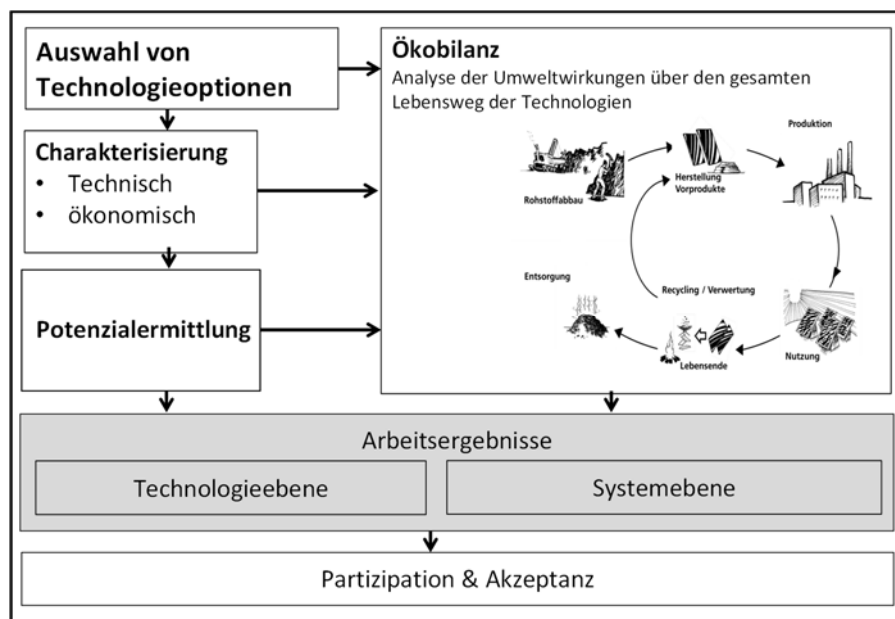
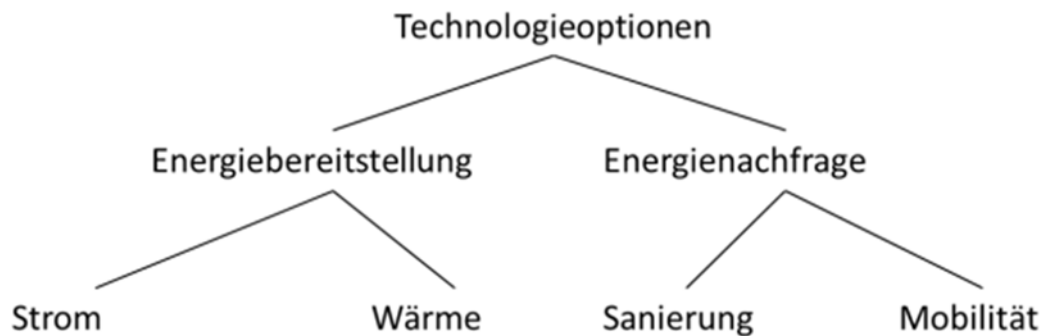


Abbildung 6: Vorgehen zur Untersuchung der Technologieoptionen

Die ökologischen Auswirkungen der verschiedenen untersuchten Technologieoptionen wurden in Anlehnung an die Ökobilanznormen ISO 14040/14044 (DIN EN ISO 14040, 2006) (DIN EN ISO 14044, 2006) bewertet. Die Methode der Ökobilanz ermöglicht eine systematische Analyse der Umweltwirkungen eines Produktes über seinen gesamten Lebensweg (DIN EN ISO 14040, 2006). Zunächst erfolgt eine Auswertung auf Technologieebene, um auf dieser Ebene Informationen für Entscheidungsprozesse zur Verfügung zu stellen. Die Ergebnisse auf Technologieebene werden im Technologieatlas dargestellt, der in einem gesonderten Berichtsband (Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, 2016) veröffentlicht ist. Zusätzlich werden Systemabbildungen durchgeführt, um die ökologischen Auswirkungen verschiedener Energiesysteme abzubilden. Die Beschreibung der Grundlagen der Systembetrachtungen erfolgt in Kapitel 2.3.5.

Die Bandbreite von Technologien zur regenerativen Energiebereitstellung, die heute schon zur Anwendung bereitstehen, ist groß. Im Rahmen des Vorhabens erfolgt hinsichtlich der Ökobilanzierung eine Konzentration auf diejenigen Energieinfrastrukturtechnologien und Energieträger, denen für eine Entwicklung hin zur Energie-Autarkie vom Projektteam eine besondere Bedeutung beigemessen wird. In enger Abstimmung mit beteiligten Stakeholdern wurde diese Auswahl entsprechend lokaler Gegebenheiten an die beiden Betrachtungsräume Baden-Württemberg und Metzingen angepasst. Berücksichtigt werden dabei, wie Abbildung 7 zeigt, die Themenkomplexe Energiebereitstellung im Hinblick auf

Strom- und Wärmeerzeugung sowie Energienachfrage mit den Bereichen Mobilität und Sanierung. Die Energiebereitstellung wird als die Umwandlung von Primärenergie entlang einer spezifischen Energieumwandlungskette und Bereitstellung in Form von Strom oder Wärme definiert (Umweltbundesamt, 2016). Die Sanierung ist im Folgenden als energetische Sanierung zu verstehen, das heißt, dass die Modernisierung eines Gebäudes zum Zwecke der Energieverbrauchsminimierung erfolgt. Im Bereich Mobilität erfolgt die Untersuchung von Kraftfahrzeugen zur Personen- und Warenbeförderung unter Berücksichtigung verschiedener Antriebstechnologien (Held, et al., 2011).



**Abbildung 7: Themenkomplexe der berücksichtigten Technologieoptionen**

Tabelle 2 und Tabelle 3 zeigen einen Überblick der im Projekt berücksichtigten Technologien. Dabei wird auf Seite der Energiebereitstellung in Technologien zur Bereitstellung von Wärme, zur Bereitstellung von Strom, Kraft-Wärme-Kopplung und Speicherung unterschieden. Bei der Energienachfrage werden sowohl die Sanierung als auch Mobilität berücksichtigt.

### 2.3.3 Energienachfrage- und Energiesystemmodellierung

Für die Erstellung von Szenarien unterschiedlicher Energie-Autarkiegrade für die beiden Bilanzräume, die Beispielkommune Metzingen und das Bundesland Baden-Württemberg, werden komplexe Simulationsmodelle genutzt, die auf einzelne Teilbereiche bzw. Fragestellungen spezialisiert sind. Beginnend von der Nachfrageseite (Mobilität, Strom, Wärme) über das Stromnetz und die Stromerzeugung bis hin zu einer integrierten Betrachtung des gesamten Energiesystems werden die Einzeleffekte sowie die Wechselwirkungen in den Teilbereichen analysiert. Dies erfolgt unter Hinzuziehung der Ergebnisse aus der Ökobilanzierung und Technologiecharakterisierung sowie aus der Akzeptanzforschung und den Umfrageergebnissen. Anschließend werden die Modelle integriert für die Szenarioanalysen genutzt und mit in den Partizipationsprozess eingebracht.

Zur Abbildung des Verkehrssektors werden ausgehend vom heutigen Fahrzeugbestand und den heutigen Fahrleistungen in Metzingen bzw. in Baden-Württemberg unterschiedliche Fahrzeugklassen in Kombination mit verschiedenen alternativen Antriebstechnologien definiert. Jede der Antriebsarten und jede Fahrzeugkategorie ist dabei durch individuelle Angaben zum spezifischen Verbrauch, den Emissionen, zur Lebensdauer, zu Investitionskosten u. a. charakterisiert.

Tabelle 2: Energiebereitstellung – Berücksichtigte Technologien

Energiebereitstellung		
Kategorien	Technologie	Aufbereitung
Bereitstellung von Wärme	Solare Kühlung	(Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, 2016)
	Abwasserwärmepumpen	(Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, 2016)
	Geothermie (oberflächennah)	(Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, 2016) u. Kapitel Ergebnisse
	Solarthermie	(Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, 2016)
Technologien zur Bereitstellung von Strom	Windkraft (onshore)	(Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, 2016) u. Kapitel Ergebnisse
	Laufwasserkraftwerk	(Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, 2016) u. Kapitel Ergebnisse
	Speicherwasserkraftwerk	(Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, 2016) u. Kapitel Ergebnisse
	Photovoltaik	(Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, 2016) u. Kapitel Ergebnisse
Technologien der Kraft-Wärme-Kopplung	Kraft-Wärme-Kopplung (Combined Heat and Power)	(Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, 2016) u. Kapitel Ergebnisse
	Biomasse KWK-Anlagen	(Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, 2016) u. Kapitel Ergebnisse
	Blockheizkraftwerk (BHKW)	(Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, 2016) u. Kapitel Ergebnisse
Speichertechnologien	Pumpspeicher	(Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, 2016) u. Kapitel Ergebnisse
	Lithium-Ionen-Batterien	(Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, 2016) u. Kapitel Ergebnisse
	Redox-Flow-Batterien	(Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, 2016) u. Kapitel Ergebnisse
	Power-to-Heat	(Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, 2016)
	Power-to-Gas	(Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, 2016)
	Blei-Batterien	(Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, 2016)
	Wärmespeicher	(Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, 2016)

**Tabelle 3: Energienachfrage – Berücksichtigte Technologien**

Energienachfrage			
Kategorie	Technologie	Antriebsarten	Aufbereitung
Sanierung	Gebäudesanierung, Sanierungskonzepte		(Baumann, et al., 2016b) u. Kapitel Modellierung
Mobilität	PKW	Benzin Diesel Hybrid (Benzin und Diesel) Plug-in Hybrid (Benzin und Diesel) BEV FC CNG	(Baumann, et al., 2016a) u. Kapitel Modellierung
	NFZ	Benzin Diesel Hybrid (Benzin und Diesel) Plug-in Hybrid (Benzin und Diesel) BEV FC CNG	(Baumann, et al., 2016a) u. Kapitel Modellierung
	Bus	Benzin Diesel Hybrid (Benzin und Diesel) Plug-in Hybrid (Benzin und Diesel) BEV FC CNG	(Baumann, et al., 2016a) & Kapitel Modellierung

Zur Analyse des Gebäudebestandes und dessen Heizwärmebedarf wurden in einem ersten Schritt relevante Merkmale des Gebäudebestandes identifiziert, zu denen unter anderem Gebäudetyp, Baualter, Geschößzahl, Sanierungszustand gehören. Anhand dieser charakteristischen Merkmale wurde der Gebäudebestand mithilfe der vom Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) entwickelten Gebäudetypologie eingeteilt (Blesl et al., 2010). Auf dieser Basis wurde der flächenspezifische Wärmebedarf der Gebäude ermittelt. Für die Ermittlung des Wärmebedarfs von allen Nicht-Wohngebäuden in Metzingen werden in einem nächsten Schritt aufgrund der inhomogenen Struktur und geringen Vergleichbarkeit mit Wohngebäuden Branchenkennzahlen, Beschäftigtenwerte und Realdaten angesetzt. Die Energieeinsparmöglichkeiten zur Minderung des Wärmebedarfs können durch verschiedene Maßnahmen erschlossen werden (z. B. Dämmung der Fassade, Ersatz der Fenster).

Die Ergebnisse der Analyse des Ist-Zustandes, der Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz für Metzingen und Baden-Württemberg, der Stromnetzmodellierung, der Charakterisierung der Technologieoptionen, der Cross-Impact-Bilanzanalyse, sowie die aus der Bürgerbeteiligung gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Energiesystemmodellierung ein. Für die Modellierung von Energiesystemen oder auch nur Teilen davon hat sich das Programm TIMES (The Integrated Markal Efom System) bewährt, das einen prozessanalytischen, dynamischen, optimierenden Energiesystemmodellgenerator darstellt. Er wurde innerhalb einer Arbeitsgruppe des Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP) der Internationalen Energieagentur (IEA) entwickelt (Remme, et al., 2001; ETSAP, et al., 2002). 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 Autarkie-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.

Im Rahmen des Vorhabens wurden mit dem Energiesystemmodellgenerator TIMES zwei Anwendungen entwickelt, zum einen ein Pan-Europäisches Energiesystemmodell mit besonderer Berücksichtigung von Baden-Württemberg (kurz TIMES PanEU-BW, siehe Abschnitt 3.4) und zum anderen ein Energiesystemmodell für Metzingen (kurz TEAM-Metzingen, siehe Abschnitt 4.4). Das **T**IMES **E**nergie-**A**utarkie **M**odell (TEAM) für Metzingen stellt dabei eine Anwendung des TIMES Modells mit dem Schwerpunkt auf der Betrachtung von denjenigen Prozessen dar, die für die Erreichung von Energie-Autarkie in einer Stadt oder in einem Quartier relevant sind.

Die spezifischen Charakteristika jeder Region eines TIMES Modells beziehen sich z. B. auf die unterschiedlichen Gebäudegrößen und die damit verbundenen Anlagengrößen zur Wärmebereitstellung. Hier wurde z. B. zur Abbildung des privaten Haushaltssektors der Wohnbestand in unterschiedliche Gebäudetypen eingeteilt, deren Nutzenergiebedarfe nach Licht, Warmwasser, Raumwärme, Kochen und Reststrom für Elektronik/Unterhaltung u. ä. im Modell abgebildet sind. Die Nachfrage nach einzelnen Nutzenergien wird dabei Gebäudebezogen definiert und entsprechend der Wohnsituation und den lokalen Gegebenheiten des untersuchten Bilanzraums modelliert. Der Bedarf nach Wohnraum in den einzelnen Gebäudekategorien ist eingeteilt in Bestandsgebäude, Neubauten sowie in Investitionsoptionen in Form von Sanierungspaketen für den Gebäudebestand.

### **2.3.4 Netzmodellierung**

Für die Netzmodellierung, eine der entscheidenden Aspekte bei der Energie-Autarkie, werden für die beiden Fallstudien zwei unterschiedliche Modelle entwickelt und eingesetzt. Für Baden-Württemberg kommt ein Modell zur Leistungsflussberechnung zum Einsatz, dem ein vereinfachter Ansatz nach dem Power Transfer Distribution Factor (PTDF) zugrunde liegt. Für Metzingen wurde ein Modell der Mittelspannungsebene nach dem Newton-Raphson-Verfahren entwickelt und für die Analysen genutzt.

#### **PTDF Stromnetzmodell für Baden-Württemberg**

Der hier für die Betrachtungen für das Bundesland Baden-Württemberg verwendeten Methode zur Leistungsflussberechnung für eine konkrete oder fiktive Netzsituation liegt ein vereinfachter Ansatz nach dem Power Transfer Distribution Factor (PTDF) Prinzip zugrunde. Ausgangspunkt jeder Leistungsflussberechnung nach dieser Methode ist eine detaillierte Berechnung beispielsweise nach dem Newton-Raphson-Verfahren. Um diesen konkreten Arbeitspunkt wird eine Linearisierung durchgeführt, um Netzsituationen nah an der Ausgangssituation vereinfacht und schnell berechnen zu können. Diese Methodik wird insbesondere bei großen Netzen oder tendenziellen Untersuchungen angewandt, um den

Einfluss einer bestimmten Entwicklung auf die Netzsituation bewerten zu können. Gleichung 1 zeigt die Berechnung der Leistungsflüsse nach dem PTDF-Verfahren.

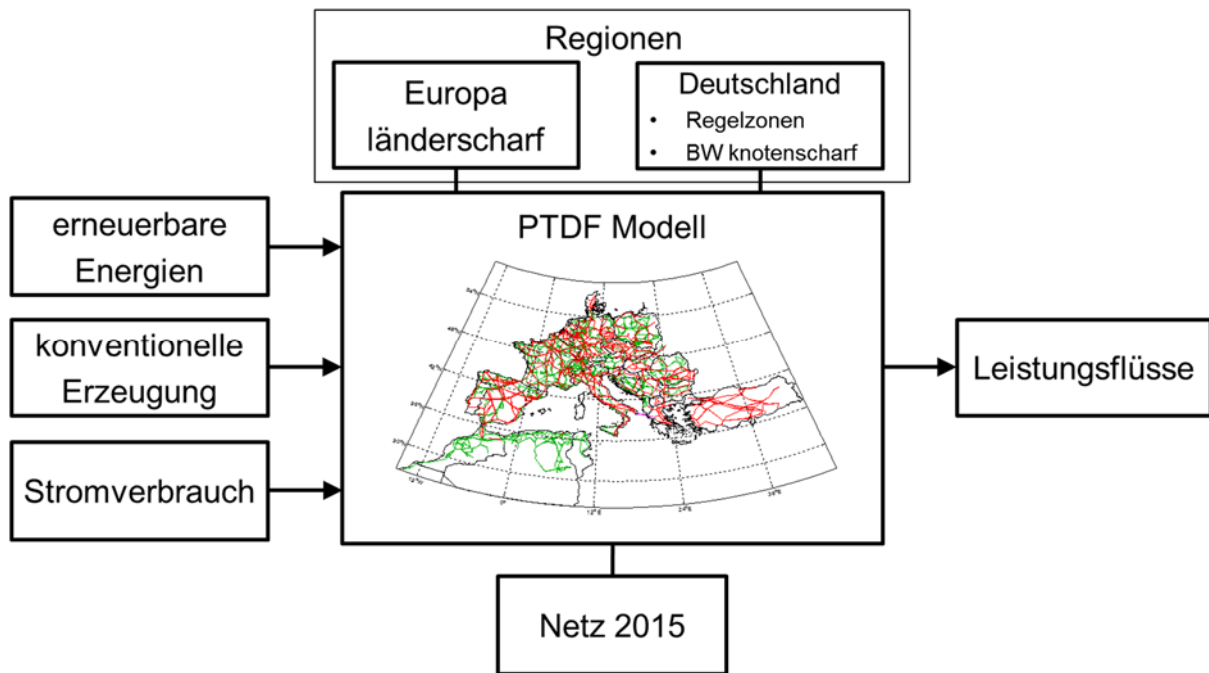
$$\Delta P_{flow} = PTDF \cdot \Delta P_{Knoten} \quad \text{Gleichung 1}$$

mit  $\Delta P_{flow}$  = Leistungsflussänderung

$PTDF$  = Matrix der Dimension |Leitungen| x |Knoten|

$\Delta P_{Knoten}$  = Austauschleistungsänderung

Dabei wird zunächst eine PTDF-Matrix basierend auf der detaillierten Leistungsflussberechnung berechnet, die die Linearfaktoren beinhaltet, mit welchen in einem zweiten Schritt durch einfache Multiplikation mit dem Vektor der Änderung der Austauschleistung ein neuer Leistungsfluss berechnet werden kann. Im Gegensatz zu detaillierten Leistungsflussberechnungen können beim PTDF-Ansatz keine Blindleistungsflüsse berechnet werden und die jeweilige Spannung wird zu 1 p.u. angenommen. Der vollständige Modellansatz ist in Abbildung 8 dargestellt.



**Abbildung 8: PTDF Stromnetzmodellansatz**

Für die Leistungsflussberechnung modellinhärente Annahmen sind zum einen das zugrunde liegende Netzmodell, sowie die geografische Auflösung der Berechnung. Dem IFK liegt eine PTDF-Matrix für eine konkrete Netzsituation des Jahres 2015 vor, die durch hohe Windeinspeisung in Höhe von 25 GW in Deutschland geprägt ist und einen verhältnismäßig hohen Stromtransport von Nord nach Süd aufweist. Im kontinentaleuropäischen Verbundnetz ist die vertikale Netzlast mit 205 GW außerdem relativ gering, was die Leistungsflusssituation weiter verschärft, da weniger regelbare Kraftwerke in Betrieb sind. Anhand dieses Szenarios wird untersucht, wie sich eine teilweise und vollständige Leistungs-Autarkie der baden-württembergischen Stromerzeugung auf die Leistungsflüsse in der Regelzone der



TransnetBW und der übrigen drei deutschen Regelzonen auswirkt. Letztere, sowie die im kontinental-europäischen Verbundsystem organisierten Länder, wurden in der PTDF-Berechnung als Regionen betrachtet, während die Regelzone der TransnetBW netzknotenscharf modelliert wurde. Da die Betrachtung auf einem realen Netzfall basiert, sind die Eingangszeitreihen auf der linken Seite in Abbildung 8 somit inhärent enthalten, und der Schaltzustand des Stromnetzes entspricht der realen Situation zu diesem Zeitpunkt.

Als Autarkieszenarien aus Sicht der Netzberechnung wurden als Teilautarkieszenario eine Lastdeckung der baden-württembergischen Stromnachfrage aus unterlagerten Netzebenen zu 50 % angenommen, als leistungsbezogenes Vollautarkieszenario eine Lastdeckung von 100 %. Dazu wurden die Lasten an den Knoten der TransnetBW-Regelzone jeweils um 50 % gesenkt bzw. im Vollautarkieszenario zu null gesetzt, um eine Eigenversorgung aus unterlagerten Netzebenen durch hohe Stromautarkiegrade mehrerer bzw. aller Verteilnetze in Baden-Württemberg zu unterstellen. Zu diesem Zeitpunkt findet dementsprechend ein um 50 % reduzierter Leistungsbezug bzw. kein Leistungsbezug aus dem Übertragungsnetz statt. Um die Leistungsbilanz im Marktgebiet dennoch ausgeglichen zu halten, muss die residuale Stromerzeugung um den gleichen Betrag reduziert werden. Dazu wurde in den übrigen drei deutschen Regelzonen konventionelle Erzeugungsleistung nach dem Merit-Order Ansatz herabgesetzt.

### **Stromnetzmodell für Metzingen**

Um eine Aussage treffen zu können, in welchem Maße dezentrale Erzeugung in das Verteilnetz von Metzingen integriert werden kann, müssen hierfür Netzberechnungen durchgeführt werden. Probleme können dann entstehen, wenn die Transportfähigkeit von Leitungen überschritten oder Spannungsgrenzen an Netzknoten verletzt werden. Das Netzgebiet umfasst neben Metzingen auch die Ortsteile Glems und Neuhausen. Im Rahmen der Stromnetzanalyse für Metzingen wurde unter Berücksichtigung der Spezifikationen der elektrischen Betriebsmittel ein Modell der Mittelspannungsebene erstellt (siehe Abbildung 9).

Grundlage der Netzanalyse ist eine Leistungsflussberechnung nach dem Newton-Raphson-Verfahren. Die Leistungsflussberechnung ermöglicht die Bestimmung der Stromflüsse und Spannungsverhältnisse im Netz. Hieraus ergeben sich die Leistungsflüsse über die Betriebsmittel. In den folgenden Untersuchungen wird das Netzberechnungsprogramm zur Analyse verschiedener Ausbauszenarien der dezentralen Stromerzeugung herangezogen. Das Verfahren wurde gemeinsam mit einer Visualisierung der wesentlichen Ergebnisse in MATLAB® implementiert. Das Vorgehen zur Analyse des bestehenden Verteilnetzes ist in Abbildung 10 dargestellt.

Zunächst wurde das betrachtete Verteilnetz anhand eines Maximallastfalls plausibilisiert, für welchen die notwendigen Daten von den Stadtwerken Metzingen zur Verfügung gestellt wurden bzw. Annahmen aus eigenen Erhebungen getroffen wurden. Bekannt sind die Leitungsimpedanzen sowie der Leitungsverlauf im Netzgebiet. Annahmen wurden bezüglich der Transformatoren getroffen, hierbei wurden standardisierte Transformatoren, sowohl für die Transformation von der 110 kV Ebene auf die Spannung im Verteilnetz von 10 kV, als auch von der Verteilnetzspannung auf 0,4 kV Niederspannung, angenommen. Die Aufteilung der Lasten ist ausgehend vom Maximallastfall von insgesamt 25 MW nachgefragter Leistung auf die einzelnen Netzknoten aufgeteilt, die Erzeugung durch PV-Anlagen anhand von Daten der Bundesnetzagentur zur installierten PV-Kapazität in Metzingen den Netzknoten zuge schlagen



Abbildung 9: Netzgebiet des 10 kV Netzes in Metzingen

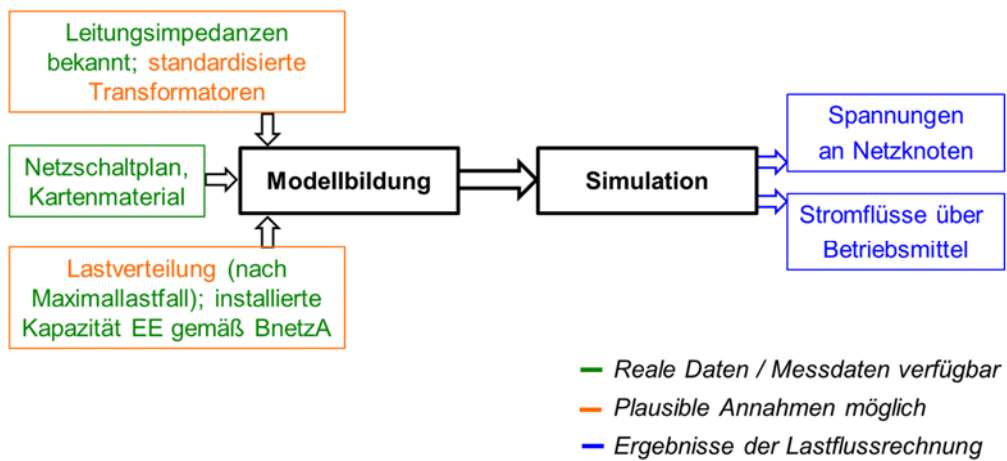


Abbildung 10: Vorgehen zur Netzanalyse

Die Ergebnisse der Leistungsflussberechnung bezüglich Leitungsauslastung und Spannungsverlauf für das bestehende Stromnetz in Metzingen sind in Abbildung 11 und Abbildung 12 dargestellt.

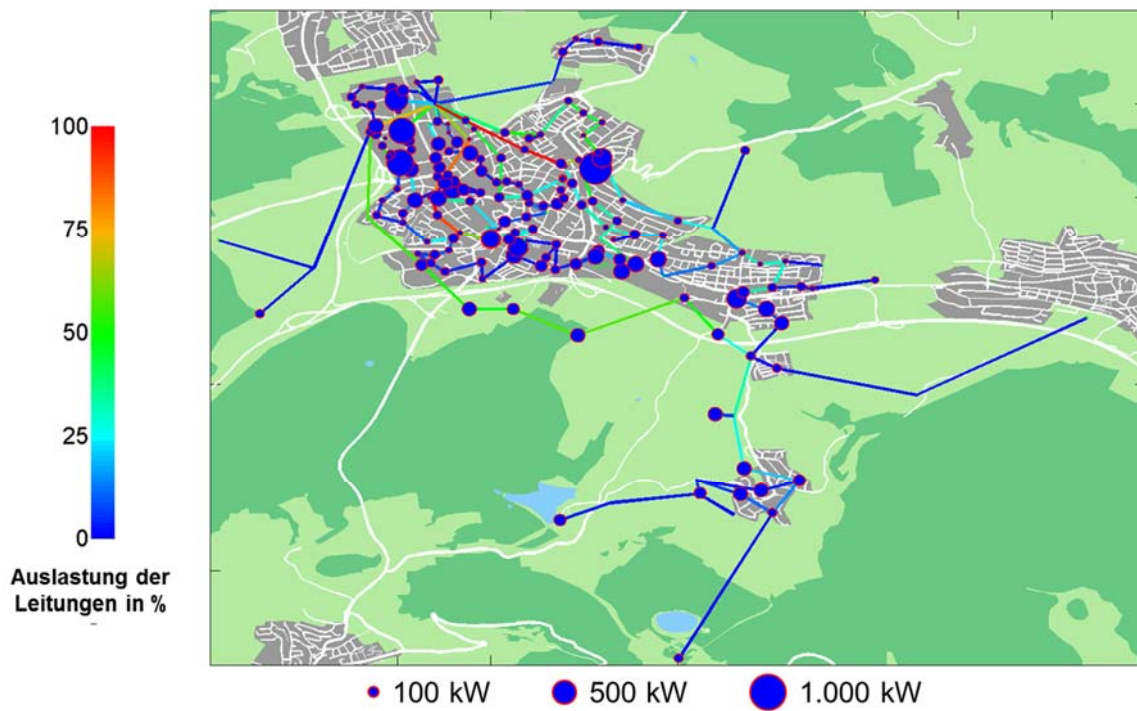


Abbildung 11: Leistungsflüsse bei Maximallast

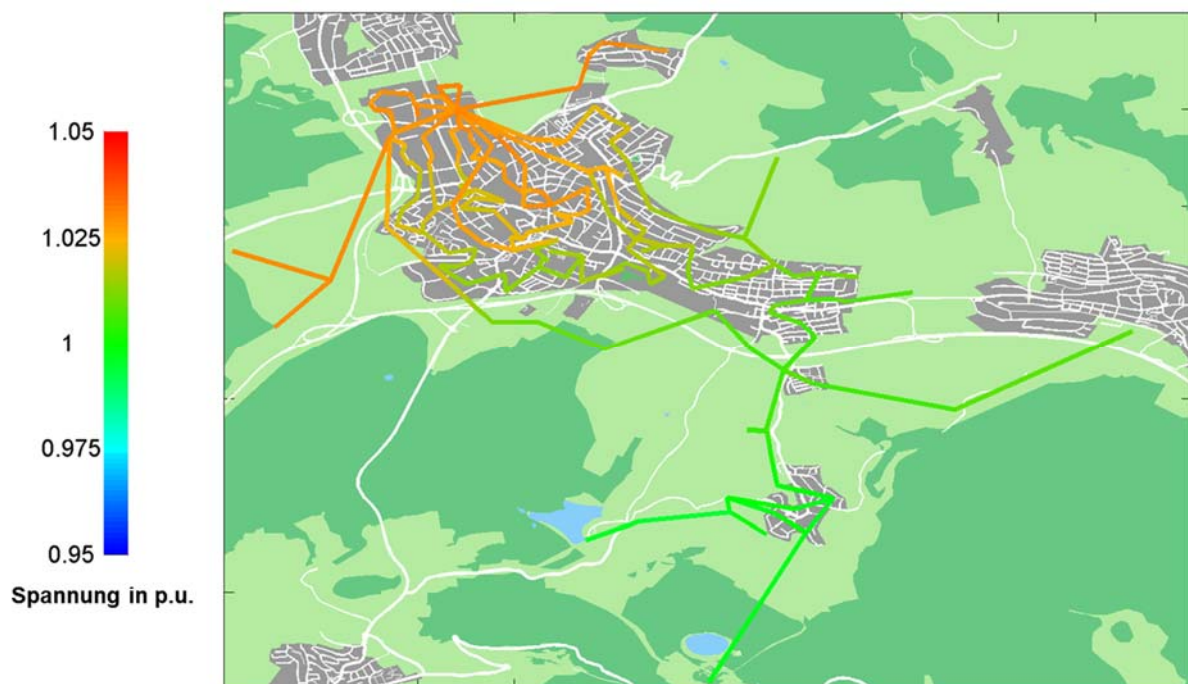
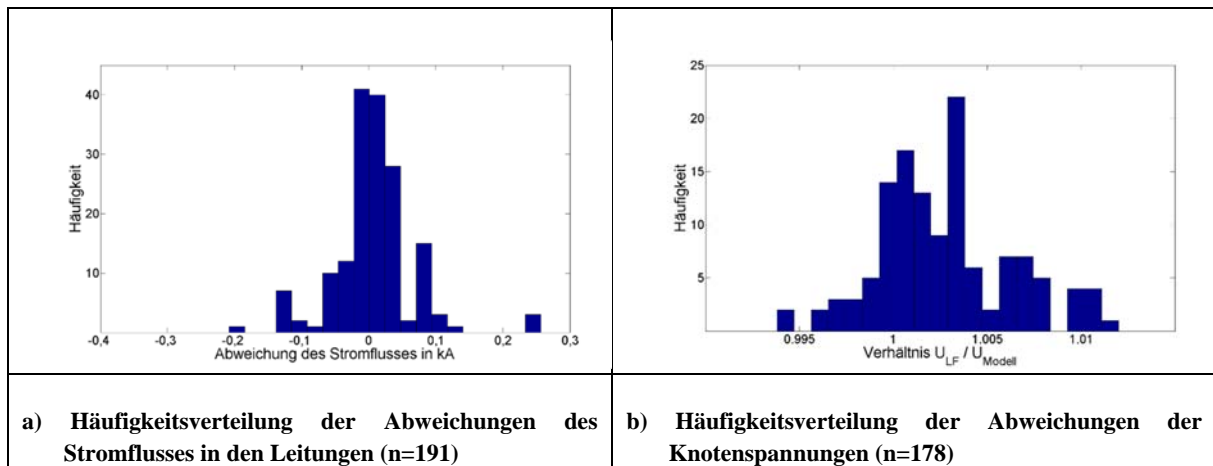


Abbildung 12: Spannungsverlauf bei Maximallast

Die Ergebnisse zeigen im Maximallastfall (25 MW) vergleichsweise geringe Auslastungen in den äußeren Netzbereichen, ebenso in den Wohnbezirken. Höhere Auslastungen werden in den Leitungen nahe am Transformator und zu den Industrie- und Dienstleistungsbereichen erreicht. Die Abweichungen der von den Stadtwerken Metzingen zur Verfügung gestellten Messdaten zu den Simulationsergebnissen sind in Abbildung 13 dargestellt.



**Abbildung 13: Abweichung der errechneten Stromflüsse und Spannungen zu den Messdaten**

Abbildung 13 zeigt, dass das Modell die tatsächlichen Leistungsflüsse im Vergleich zu den Daten zur Plausibilisierung tendenziell überschätzt. Allerdings treten Abweichungen mit kleinen Differenzen am häufigsten auf. Die mit dem aufgebauten Modell erzielten Ergebnisse können somit als plausibel betrachtet werden.

Bezüglich des Spannungsverlaufs im betrachteten Netzgebiet zeigen die Ergebnisse den erwarteten typischen Verlauf. Vom Netzanschlusspunkt ausgehend fällt die Spannung mit zunehmender Anzahl an Verbrauchern und über die Leitungslänge kontinuierlich ab, wobei die Spannung im betrachteten Maximallastfall nicht unter 1 p.u. abfällt. Wie Abbildung 13 b) zeigt, überschätzt das Modell auch die Knotenspannungen leicht, wobei die Abweichungen größtenteils unter 0,5 % und immer unter 1,2 % liegen, weshalb das Modell auch in Bezug auf die Spannungen als valide gelten kann.

### 2.3.5 LCA Ökologisches Modell

Abbildung 14 zeigt die Systemgrenzen der ökobilanziellen Modellierung von Energienachfrage und Energieangebot. Die beiden oberen Quadranten repräsentieren Strom und Wärme, deren öffentliche Versorgung im Ökobilanz-Systemmodell für die beiden betrachteten Bilanzräume Baden-Württemberg und Metzingen abgebildet wird (PE-International in Zusammenarbeit mit der Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Bauphysik, 2012).

Industriekraftwerke wurden von der Untersuchung ausgeschlossen, daher befindet sich die Eigen-Energieerzeugung durch Industriebetriebe außerhalb des Untersuchungsraumes. Die beiden unteren Quadranten Mobilität und Sanierung waren in diesem Vorhaben nicht Teil des Ökobilanz-Systemmodells, sondern wurden getrennt untersucht. Zukünftig ist eine Integration angedacht. Zwischen den verschiedenen Quadranten herrschen Wechselbeziehungen, wie zum Beispiel durch die Wärmeerzeugung aus elektrischer Energie oder der Strombedarf der Elektromobilität. Soweit relevant, wurden diese



Wechselbeziehungen berücksichtigt und die Modelle, auch bei den getrennten Untersuchungen, entsprechend adaptiert. Grundsätzlich übt auch der umgebende Bilanzraum auf das betrachtete Energiesystem durch Strom- und andere Energieträgerimporte einen Einfluss auf die Ergebnisse aus. Auch diese Importe, samt ihren jeweiligen Vorketten, wurden innerhalb der Ökobilanz abgebildet. Bei der ökobilanziellen Modellierung von Strom- und andere Energieträgerimporten wurden nur Nettoimporte berücksichtigt, welche aus jahresübergreifenden Import-/Exportbilanzen ermittelt wurden.

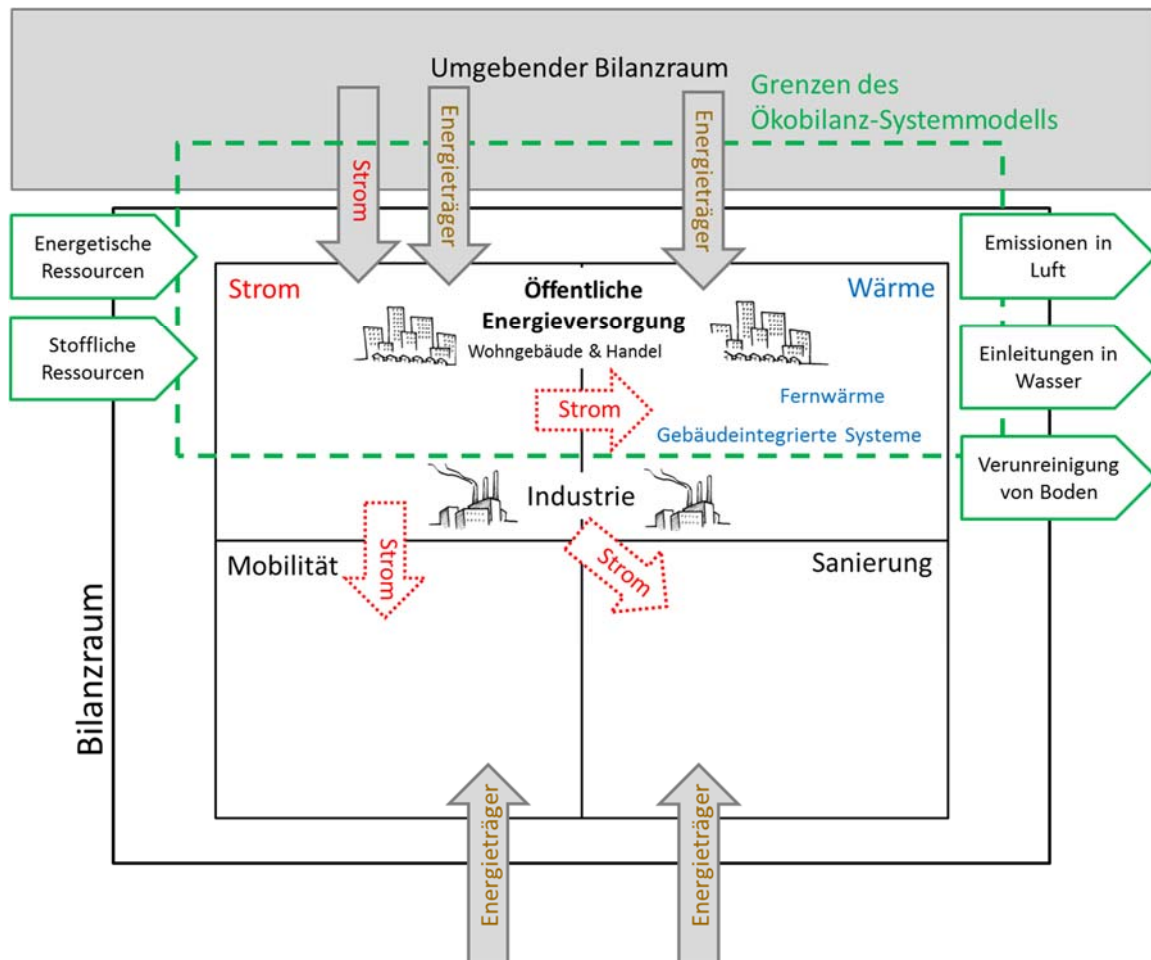


Abbildung 14: Darstellung der Systemgrenzen für das Ökobilanz-Systemmodell

### Energieangebot

Wie in Abbildung 6 dargestellt, erfolgt neben der ökobilanziellen Untersuchung auf Technologieebene für die Energiebereitstellung auch eine Betrachtung der Systemebene. Grundsätzlich wurden hierbei alle Technologien aus Tabelle 2, im Folgenden als Schwerpunkttechnologien bezeichnet, berücksichtigt. Um eine umfassende Systemaussage treffen zu können, wurden zudem weitere Technologien herangezogen. Diese sind, im Gegensatz zu den Schwerpunkttechnologien, keine Technologien, die im Sinne der autarken Versorgung relevant sind und werden zu großen Teilen auch nicht den Erneuerbaren Energien zugeordnet. Ihre Integration in das Ökobilanz-Systemmodell ist aber notwendig, um unter anderem die Referenzzustände abzubilden. So ist beispielsweise das Modul „Strom aus Kernenergie“ in das Ökobilanz-Systemmodell integriert. Abbildung 16 bietet einen Überblick über das Ökobilanz-Systemmodell.

Wie Tabelle 4 zeigt, ist das Ökobilanz-Systemmodell modular aufgebaut. Es untergliedert sich in die Bereitstellung von Wärme, Kälte und Strom sowie in Speichertechnologien.

**Tabelle 4: Modularer Aufbau des Ökobilanz-Systemmodells**

Kategorie	Berücksichtigte Technologien
Bereitstellung von Wärme	Schwerpunkttechnologien
	Weitere Technologien
Bereitstellung von Kälte	Schwerpunkttechnologien
Bereitstellung von Strom	Schwerpunkttechnologien
	Weitere Technologien
Stromspeichertechnologien	Schwerpunkttechnologien

Abbildung 15 zeigt die Schnittstelle zu den beiden mit dem Energiesystemmodellgenerator TIMES erstellten Modellen, TIMES PanEU-BW und TEAM (siehe Abschnitt 2.3.3). Die Ergebnisse der TIMES-Modelle, die auf Basis von Energieszenarien aus der Cross-Impact Bilanzanalyse (CIB) ermittelt werden, werden als Eingangsdaten für das Ökobilanz-Systemmodell genutzt.



**Abbildung 15: Darstellung der Systemmodellschnittstellen zur Übergabe der jeweiligen Eingangsdaten**

Entsprechend der im TIMES-Modell berechneten Anteile der Technologien zur Wärme- und Stromversorgung, wurden die Parameterwerte des generischen Ökobilanzmodells angepasst, um spezifische Umweltprofile für die jeweiligen Szenarien zu erstellen.

Im Rahmen der Energiesystemmodellierung, deren Ergebnisse dem Ökobilanz-Systemmodell als Eingangsgrößen dienen, wurde die Kältebereitstellung nicht detailliert ausgewertet. Daher wurde diese Kategorie auch im Ökobilanz-Energiemodell nicht ausgewertet. Zukünftig ist an dieser Stelle eine detailliertere Abbildung denkbar, wenn entsprechende Energiebilanzen aufgestellt und bereitgestellt werden können.

Für alle Technologien beinhalten die Ökobilanzmodelle entsprechend der verfügbaren Datenbasis möglichst umfassend den jeweiligen Lebenszyklus. Annahmen der Modellierung, z. B. die Lebensdauer von Komponenten, entsprechen dabei dem Stand der Technik und sind auf lokale Gegebenheiten, wie zum Beispiel der typischen Anzahl von Sonnenstunden, angepasst.

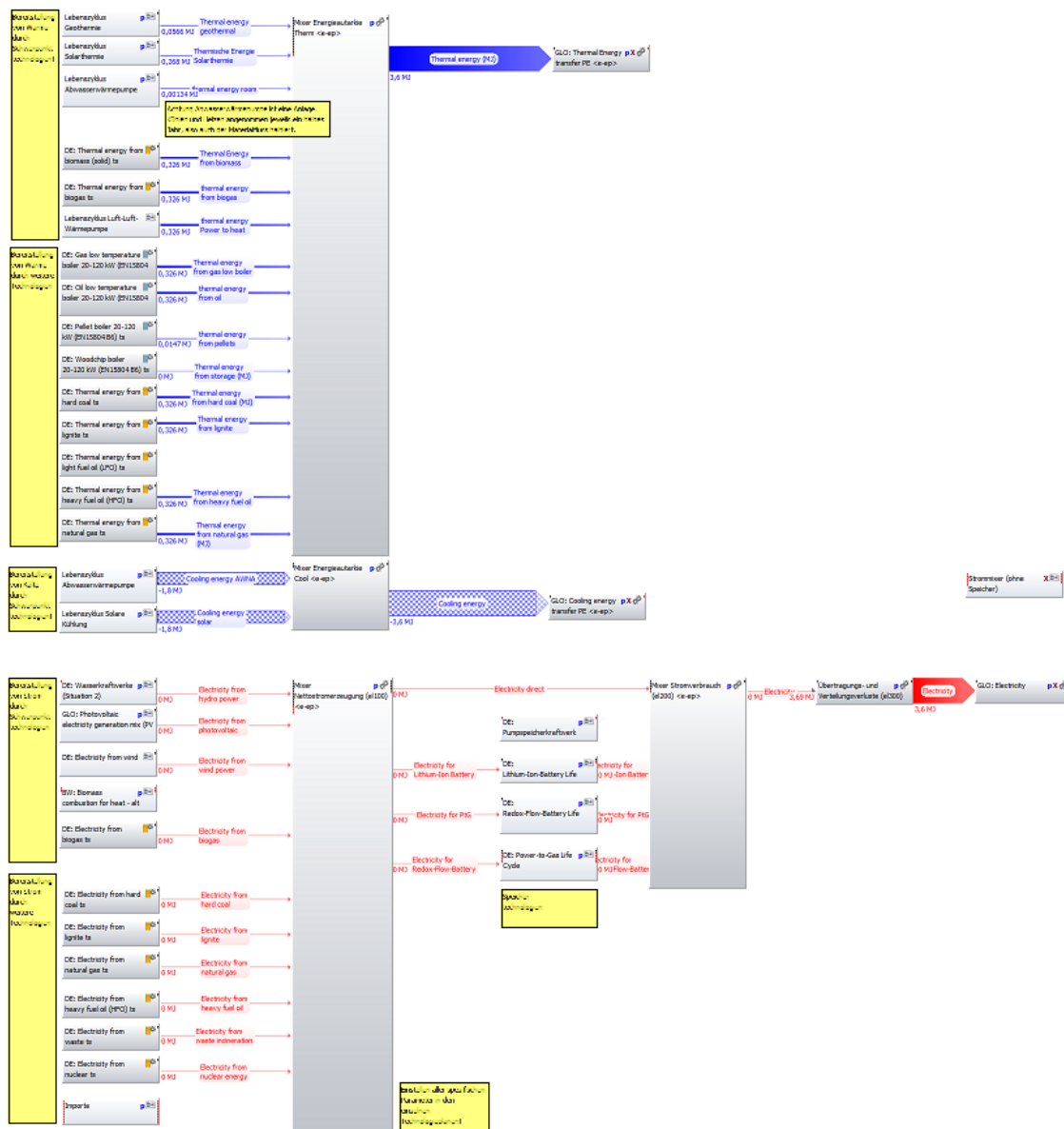


Abbildung 16: Überblick über das Ökobilanz-Systemmodell

Die Umweltanalyse wurde für die in Tabelle 5 dargestellten Umweltwirkungen durchgeführt. Der hinterlegte Bewertungsschlüssel dieser Kategorien basiert auf der international anerkannten Methode CML2001 vom Centrum voor Milieuwetenschappen (CML) in Leiden, Niederlande (Centre of Environmental Science – Leiden University (CML), 2001). Im Technologieatlas (Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, 2016) wird auf Technologieebene ein noch breiteres Spektrum an Wirkungskategorien untersucht, zudem erfolgt dort eine ausführlichere Erläuterung der einzelnen Wirkungskategorien.

**Tabelle 5: Beschreibung der betrachteten Umweltwirkungskategorien**

Kategorie	Beschreibung	Referenzeinheit	Potenzielle Auswirkungen
Umweltwirkungskategorien			
Treibhauspotenzial (GWP)	Maß für den Beitrag zum Treibhauseffekt (Reflexion von Wärmestrahlung durch Gase, die zu einer Erwärmung der Erdatmosphäre führen)	[kg CO <sub>2</sub> -Äquiv.]	Bildung von anthropogenen Treibhausgasen, die zu einer zunehmenden Erwärmung der Troposphäre, dem sogenannten Klimawandel, führen können.
Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP)	Maß für die Bildung von bodennahem Ozon (Sommersmog)	[kg Ethen-Äquiv.]	Bildung von Sommersmog, welcher zu Husten, Augenreizungen, Kopfschmerzen und Lungenfunktionsstörungen führen kann.
Andere Auswertungskategorien			
Primärenergiebedarf aus nicht erneuerbaren Quellen (unterer Heizwert) (PED)	Maß für den Verbrauch von nicht erneuerbaren (fossilen) Energieträgern	[MJ]	Verknappung fossiler energetischer Ressourcen.

Die Ergebnisse des Ökobilanz-Systemmodells werden als Umweltwirkungen bezogen auf 1 kWh Strom oder Wärme, die durch das jeweils abgebildete System bereitgestellt wird, dargestellt. Somit basiert das Umweltprofil jeweils auf der Menge an Ressourcen und Emissionen, die während Produktion, Betrieb und Lebensende der Strom- und Wärmeherzeugungstechnologien verbraucht wird bzw. entsteht. Der Technologiemix der jeweiligen Szenarien ergibt sich, wie in Abbildung 15 dargestellt, aus dem TIMES-Modell. In der Darstellung wird unterschieden in „Nutzungsphase“ und „Herstellung und Entsorgung“. Dadurch kann, neben den Anteilen der Emissionen, die direkt durch die Energiebereitstellung verursacht werden, wie beispielsweise Verbrennungsemissionen in Kohlekraftwerken, auch dargestellt werden, welche indirekten Emissionen auf die Strom- und Wärmeversorgung (beispielsweise durch die Produktionsaufwendungen für PV-Anlagen) zurückzuführen sind. Bei der ebenso berücksichtigten Auswertungskategorie Primärenergiebedarf wird in diesem Zusammenhang auch der Begriff der „grauen Energie“ verwendet (Deutscher Bundestag, 2015). Grundsätzlich werden bei den Auswertungen alle Emissionen berücksichtigt, die zu der jeweiligen Umweltwirkungskategorie beitragen. Somit sind z. B. für das Treibhauspotenzial (GWP) nicht nur CO<sub>2</sub>-Emissionen, sondern auch Methan oder andere klimawirksame Emissionen relevant.

### Energienachfrage

Der Fokus des Endberichts bei der Darstellung der Ökobilanzergebnisse liegt auf dem Energieangebot. Die ökobilanzielle Abbildung der Energienachfrage wird, wie bereits angeführt, in tieferer Detailgröße in den beiden Methodenbändern Sanierung (Baumann, et al., 2016b) und Verkehr (Baumann, et al., 2016a) beschrieben.



### 3 Fallstudie Baden-Württemberg

#### 3.1 Analyse der Ist-Situation

Der Endenergieverbrauch in Baden-Württemberg belief sich im Jahr 2012 auf 1.026 PJ (285 TWh). Wesentliche energienachfragende Sektoren waren der Verkehr und die privaten Haushalte mit jeweils einem Anteil von rund 30 % am Endenergieverbrauch (Abbildung 17). Der geringste Verbrauchsanteil entfiel in 2012 in Baden-Württemberg auf den Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) mit 16,9 %. Von mittlerer Bedeutung in Bezug auf den Endenergieverbrauch war die Industrie mit einem Anteil von 22,6 %.

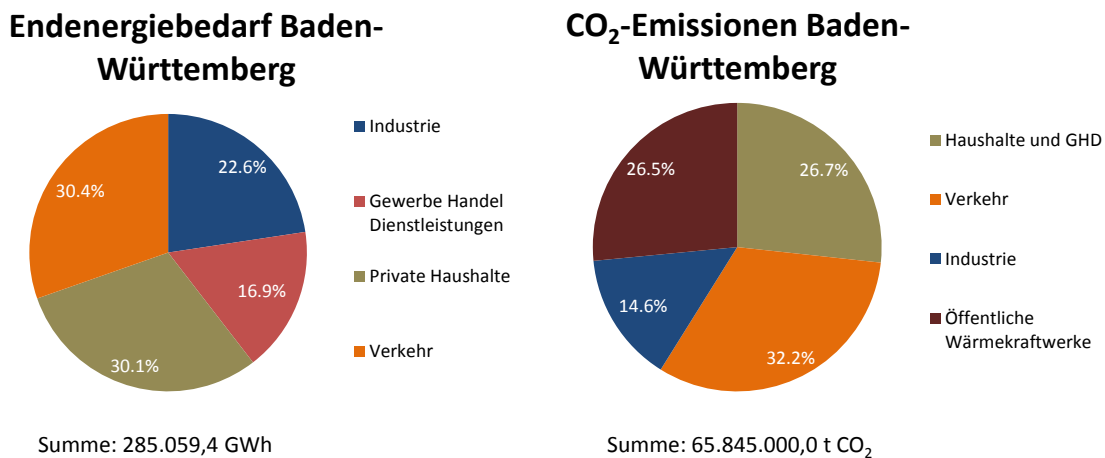


Abbildung 17: Anteile der quellenbezogenen Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz in Baden-Württemberg im Jahr 2012

Hinsichtlich der Ist-Situation bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen wurde die Fallunterscheidung zwischen einer quellen- und einer verursacherbezogenen Emissionsbilanz vorgenommen (Fahl et al., 2012; Stuttgart, et al., 2010). Im Falle der Quellenbilanz werden die Emissionen betrachtet, die am Ort der Entstehung, d. h. am Standort der Emissionsquelle (z. B. Standort des Verkehrsgeschehens), anfallen (siehe Abbildung 17 für Baden-Württemberg). Unberücksichtigt bleiben dabei die mit dem Importstrom verbundenen Emissionen. Hingegen sind die Emissionen, die bei der Erzeugung von Strom für den Export entstehen, in vollem Umfang einbezogen. Im Falle der Verursacherbilanz werden hingegen alle Emissionen den verursachenden bzw. verbrauchenden Sektoren zugerechnet

Nach der Quellenbilanz sind im Jahr 2012 in Baden-Württemberg 65,8 Mio. t CO<sub>2</sub> emittiert worden. Bezogen auf das Basisjahr 1990 mit 73,8 Mio. t bedeutet dies eine Minderung der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen um 10,7 %. Hauptverursacher der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Baden-Württemberg im Jahr 2012 war der Verkehr mit rund einem Drittel (32,2 %), gefolgt von den Sektoren Haushalte und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen sowie den Kraftwerksbereich mit nahezu gleichen Anteilen (26,7 % bzw. 26,5 %). Der Industriesektor weist mit einem Anteil von 14,6 % die geringste Bedeutung hinsichtlich der baden-württembergischen CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 2012 auf.

Baden-Württemberg weist relativ geringe Reserven und Ressourcen an fossilen Energieträgern auf. Zudem ist die Nutzung heimischer erneuerbarer Energien – mit Ausnahme der Wasserkraft und der Bioenergien – erst in jüngerer Vergangenheit in den Fokus gerückt. Hieraus folgt, dass Baden-Württemberg derzeit (2012) zu einem hohen Anteil von Importen an Kohlen, Rohöl und Mineralölprodukten, Gasen

und Kernbrennstoffen sowie auch Strom abhängig ist. Der im Basisjahr 2012 resultierende bilanzielle Primärenergie-Autarkiegrad ergibt sich aus den lokal gewonnenen Energien (aus Solarthermie, Umwelt- und Erdwärme, Photovoltaik, Wasserkraft, Klärgas usw.) bezogen auf den Primärenergieverbrauch in 2012. Für 2012 resultiert für Baden-Württemberg ein Primärenergie-Autarkiegrad von 12,2 %. Stromseitig war der Bilanzraum Baden-Württemberg in 2012 zu 81,7 % bilanziell autark. Ein Großteil der Stromeigengewinnung ist auf die in Baden-Württemberg installierten Steinkohle- und Kernkraftwerke (15,3 bzw. 20,7 TWh Nettostromerzeugung) und zu einem kleineren Teil mit 13,4 TWh auf die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien zurückzuführen (Wasserkraft 4,7 TWh, Photovoltaik 4,1 TWh, Windenergie 0,7 TWh) zurückzuführen.

### **3.2 Stakeholder Interviews**

Die hier dargestellten Ergebnisse aus Stakeholder Interviews sollen einen Einblick in die Perspektiven unterschiedlicher zentraler Akteure in Baden-Württemberg im Bereich der Energie-Autarkie geben. Selbstverständlich mag es Perspektiven auf dieses Thema geben, die im Folgenden nicht oder nur teilweise abgebildet sind. Bei der Auswahl der Befragten wurde jedoch darauf geachtet, das Meinungsspektrum in seiner Gänze abzudecken, um die Meinungsvielfalt sowie Unterschiede und Gemeinsamkeiten umfassend darstellen zu können. In diesem Kapitel fließen dabei die Ergebnisse aus den Interviews in Baden-Württemberg allgemein, sowie in Metzingen im speziellen ein. Diese wurden in einem Kapitel zusammengefasst, da die Auswertung der Interviews nicht in erster Linie akteursbezogen, sondern thematisch erfolgte.

#### **3.2.1 Empirisches Vorgehen**

Ziel der Interviewstudie war es, ein umfassendes Bild der Sichtweise zentraler Stakeholder in Baden-Württemberg sowie Metzingen auf das Thema Energie-Autarkie zu bekommen. Dabei lagen die folgenden Forschungsfragen zugrunde:

- Wie definieren die verschiedenen Stakeholder für sich den Begriff der Energie-Autarkie?
- Welche Rolle spielt Energie-Autarkie für die verschiedenen Stakeholder?
- Was sind aus Sicht der Stakeholder die zentralen Akteure in diesem Bereich?

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurden im Zeitraum zwischen Mai 2014 und August 2015 15 Interviews mit Vertreterinnen oder Vertretern zentraler Stakeholderorganisationen durchgeführt. Darunter waren Interviews mit Vertreterinnen bzw. Vertretern der Landesgruppen einschlägiger Verbände aus den Bereichen Energiewirtschaft und Umweltschutz, entsprechender Landesbehörden, kleinerer und größerer Energieversorger sowie eines Bioenergiedorfes. Die Interviewdurchführung orientierte sich an der offenen Variante der 3CM Methode (Conceptual Content Cognitive Map) zur strukturierten Erhebung kognitiver Repräsentationen eines bestimmten sozialen, technischen und/oder natürlichen Phänomens bei Individuen bzw. Stakeholdern (Kearney, et al., 1997). Bei einem kleinen Sample und explorativem Vorgehen bietet sich die Erhebung im Rahmen eines teilstrukturierten Interviews an. Die 3CM Methode besteht dabei aus den folgenden drei Schritten:

1. *Offene Themendarstellung*: Der Interviewer fordert den Befragten mittels einer möglichst offenen Eingangsfrage auf, seine Perspektive auf das entsprechende Thema darzulegen.

2. *Sammlung zentraler Aspekte:* Der Interviewer notiert währenddessen die genannten zentralen Aspekte auf Kärtchen. Er präsentiert diese dem Befragten und bittet ihn, ggf. weitere Kärtchen hinzuzufügen, falls aus Sicht des Befragten noch weitere zentrale Aspekte fehlen.
3. *Strukturierung der zentralen Aspekte:* In einem letzten Schritt bittet der Interviewer den Befragten, die Aspekte zu gruppieren (und ggf. Gruppenbezeichnung vergeben) und in Beziehung zueinander zu setzen, bis sich ein umfassendes Bild dessen Sichtweise auf das entsprechende Thema ergibt. Der Befragte soll dabei die Anordnung der Kärtchen fortlaufend kommentieren und erklären, sodass seine Gedankengänge nachvollziehbar werden.

Mit Hilfe der 3CM Methode wurden die mentalen Modelle<sup>4</sup> der Interviewten hinsichtlich Energie-Autarkie erhoben und visuell dargestellt, sodass ein umfassendes und valides Bild deren Sichtweise auf das Thema gewonnen werden konnte.

### 3.2.2 Ergebnisse der Interviews

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die zentralen Ergebnisse aus den Interviews. Die einzelnen mentalen Modelle der Befragten befinden sich im Anhang und geben noch einen zusätzlichen tieferen Einblick in die Argumentationslogiken der einzelnen Befragten.

**Der Autarkiebegriff:** Für die Befragten hat der Energie-Autarkie-Begriff unterschiedliche Bedeutungen. Manche assoziieren damit allein lastgerechte Autarkie, d. h. energiebezogene Insellösungen, manche definieren Energie-Autarkie eher im Sinne bilanzieller Autarkie. Es zeigt sich in jedem Fall, dass kein allgemeingültiger Autarkiebegriff existiert. In ihren Argumentationen schwanken viele Befragte implizit zwischen den beiden Autarkiebegriffen. Es bestehen darüber hinaus ganz unterschiedliche Vorstellungen darüber, wo Systemgrenzen zu ziehen wären: Darf Strom von außerhalb der kommunalen Grenze importiert werden? Spricht eine interkommunale Zusammenarbeit in diesem Bereich gegen den Autarkiebegriff? Soll der Begriff der Energie-Autarkie allein die Bereiche Strom und Wärme umfassen? Muss auch der Mobilitätsbereich miteinbezogen werden? Ist gar auch graue Energie mit zu berücksichtigen? Soll sich Energie-Autarkie allein auf erneuerbare Energien beziehen oder spielen auch konventionelle Energieträger eine Rolle? Der Begriff „Autarkie“ ist aus Sicht einiger der Befragten in der Öffentlichkeit positiv belegt. So sei es für die Bürger wichtig, dass ihr Strom aus der eigenen Region kommt.

**Ablehnung lastgerechter Autarkie:** Alle Befragten lehnen lastgerechte Autarkie als nicht erstrebenswert ab. Sie tun dies teilweise aus unterschiedlichen Gründen. Einige argumentieren, dass lastgerechte Autarkie aus Sicht des Gesamtenergiesystems nicht sinnvoll sei, da Synergie- und Skaleneffekte, die mit wachsender Systemgröße auftreten, verschenkt würden. Autarkiebestrebungen würden außerdem zu einer Entsolidarisierung des Gemeinwesens beitragen. Darüber hinaus wird immer wieder betont, dass kleinere, unabhängige Einheiten das Gesamtsystem zwar resilienter machen würden, diese autarken Einheiten jedoch selbst anfälliger seien. So haben einige Befragte große Bedenken, ob überhaupt ein angemessenes Niveau der Versorgungszuverlässigkeit in lastgerecht autarken Kommunen gewährleistet werden könne. Manche Befragte bezeichnen darüber hinaus lastgerechte Autarkie – abgesehen von kleinen

---

<sup>4</sup> Mentale Modelle sind gedankliche Repräsentationen von bereichsspezifischen Konzepten und deren Beziehungen (Miles und Huberman 1994, S. 134; Huff 1990, S. 15-16).

Einzelfällen – als utopisch, da sie, bezieht man neben Wärme und Strom auch Mobilität und graue Energie mit ein, auf dem Niveau moderner Gesellschaften praktisch unmöglich sei. Eine strenge Definition der lastgerechten Autarkie stehe auch im Widerspruch mit dem sozialen Frieden in der Gesellschaft. So würde ein weiterer Zubau mit Wasser- und/oder Windkraftanlagen, um einen hohen Autarkiegrad zu erlangen, mittelfristig keine Akzeptanz in der Bevölkerung erhalten. Hier stellt sich wiederum die Frage der Systemgrenzen von Autarkiebestrebungen. Für die meisten Befragten ist die lastgerechte Autarkie lokaler Einheiten sowohl aus volkswirtschaftlicher Sicht nicht ökonomisch als auch aus der Perspektive der autarken Einheiten. Bestrebungen zur lastgerechten Autarkie würden enorme Kosten verursachen, die nicht tragbar wären.

**Keine offiziellen Positionen zum Thema Energie-Autarkie:** Laut den Befragten hat keine der Organisationen oder Institutionen, die sie vertreten, bisher eine offizielle Position zum Thema Energie-Autarkie entwickelt. Dies hängt in allen Fällen damit zusammen, dass Autarkiebestrebungen kein Organisationsziel bzw. keinen Organisationsauftrag darstellen. Das Thema würde zwar diskutiert, es sei jedoch nicht von so hoher Bedeutung, dass dazu offizielle Positionen oder Stellungnahmen entwickelt werden müssten.

**Bilanzielle Autarkie als Nebenprodukt:** Anknüpfend an die beiden vorherigen Punkte ist festzustellen, dass für keine der Organisationen oder Institutionen der Befragten bilanzielle Autarkie ein Ziel an sich darstellt. Bilanzielle Autarkie ist stets nur von Bedeutung in Zusammenhang mit anderen Zielen. D. h., bilanzielle Autarkie wird eher als Mittel zum Zweck betrachtet als Zweck an sich zu sein. So ergibt sich aus den Bestrebungen einiger Akteure, den Anteil der energetischen Eigenversorgung zu erhöhen, für die Organisationen mancher Befragten die Möglichkeit, neue Geschäftsfelder zu erschließen, indem sie die entsprechenden Akteure bei ihren Autarkiebestrebungen unterstützen. Für andere Befragte ist bilanzielle Autarkie ein Nebenprodukt ihrer Bestrebungen zum Ausbau erneuerbarer Energien oder ihrem Beitrag zur Energiewende. Da erneuerbare Energien laut den entsprechenden Befragten einen dezentralen Charakter aufweisen, kann deren weiterer Ausbau auf lokaler Ebene quasi nebenbei zu bilanzieller Autarkie in den Bereichen Strom oder auch Wärme führen. Der Ausbau erneuerbarer Energien und die damit einhergehende Dezentralisierung ist jedoch das Primärziel, bilanzielle Autarkie das Nebenprodukt, das nicht direkt angestrebt, jedoch auch nicht negativ beurteilt wird. Die Organisationen oder Institutionen anderer Befragten zielen wiederum auf eine Erhöhung der energetischen Eigenversorgung aus wirtschaftlichen Gründen ab. Auch hier ist bilanzielle Autarkie ein Nebenprodukt, das allenfalls als motivierende Zielmarke eingesetzt wird.

**Unklare Systemgrenzen:** Hinsichtlich der Energie-Autarkie-Thematik wurde von allen Befragten eine Differenzierung in die Bereiche Strom und Wärme vorgenommen. Viele Befragte erwähnten zusätzlich den Mobilitätsbereich, während nur wenige graue Energie als weiteres Element von Energie-Autarkie in Betracht zogen. Die Befragten sind sich weitgehend einig, dass bilanzielle Autarkie am ehesten im Strombereich und mit gewissen Abstrichen im Wärmebereich zu erreichen sei. Bezieht man Mobilität und graue Energie in die Bilanzierung mit ein, so wird bilanzielle Autarkie nur noch schwer zu verwirklichen bzw. im Fall der grauen Energie unmöglich. Lastgerechte Autarkie sei unter Einbezug des Mobilitätsbereichs so gut wie nicht zu realisieren.

**Zentrale Rolle politischer Rahmensetzung:** Außer den politischen Organen auf kommunaler, Landes- und Bundesebene, die durch ihre Entscheidungen den Rahmen für die Entwicklung des Energiesystems setzen, nennen die Befragten keinen anderen Akteur durchgehend als zentrale Figur im Bereich der

Energie-Autarkie. Manche Befragte erwarten aufgrund der zunehmenden Dezentralisierung des Energiesystems sowie des wachsenden Anteils der Eigenversorgung lokaler Einheiten eine Stärkung kleiner, kommunaler Energieversorger (insbesondere Stadtwerke) und eine damit einhergehende Schwächung der großen Energiekonzerne. Dadurch, dass dezentrale Einheiten die Komplexität der Energieströme steigern, erwarten manche Befragte darüber hinaus eine wachsende Bedeutung der Übertragungs- und insbesondere der Verteilnetzbetreiber. Hier wird der Regulierungsbedarf in den kommenden Jahren stark zunehmen. Andere Befragte wiederum sehen keine einschneidende Schwächung der Position der großen Energiekonzerne, sofern diese in der Lage wären, ihre Geschäftsfelder in Bereiche wie Energieeffizienzdienstleistungen oder Betrieb und Wartung von Speichern auszudehnen. In diesem Zusammenhang wird auch das Thema der Stabilität politischer Rahmensetzungen als ein zentraler Aspekt genannt, um Akteuren eine Planungssicherheit für ihre Investitionen zu geben.

**Bedeutung von Energiesparmaßnahmen:** Einige der Befragten weisen auf das Energiesparen als wichtigen Aspekt zur Erreichung der Ziele der Energiewende (und damit auch zum Klimaschutz). Diesem Aspekt würde noch zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Die Themen Sensibilisierung und Anreize seien mindestens gleichwertig anzusehen wie technische Maßnahmen. Allerdings seien hier noch keine durchschlagenden Erfolge erzielt worden. So hätten bspw. selbst die „Energietische“, in denen sich Unternehmensvertreter gemeinsame Ziele setzen und Maßnahmen beschließen, nicht den erwarteten Erfolg gehabt. Die derzeit gute wirtschaftliche Auftragslage und die niedrigen Energiepreise hätten womöglich einen gegensätzlichen Einfluss auf Bemühungen zum Energiesparen und Effizienzerhöhung.

### 3.2.3 Vergleich mit den Ergebnissen der Literaturstudie

An dieser Stelle sollen nun die Erkenntnisse der Literaturstudie mit den Ergebnissen der Interviewstudie verglichen werden, wobei sich viele Parallelen zeigen, auf die im Weiteren nun näher eingegangen wird.

- **Begriffsdefinition:** Die Befragten nehmen in ihren Ausführungen implizit auf die beiden grundlegenden Konzepte der lastgerechten und bilanziellen Autarkie Bezug, obwohl diese beiden Begriffe meist nicht explizit genannt werden. Es scheint allerdings kein allgemeines Begriffsverständnis zu geben.
- **Bedeutung von technologischen Innovationen:** Die meisten Befragten heben die Bedeutung von technologischen Innovationen wie Speichertechnologien, intelligente Netze, Power-to-Heat, Power-to-Gas etc. für etwaige Autarkiebemühungen – egal ob lastgerecht oder bilanziell – hervor. Autarkiebestrebungen sind stark von der technischen Machbarkeit und Umsetzung bestimmt.
- **Akzeptanz und Nutzenverteilung:** Nicht nur die technische Machbarkeit, sondern auch die Akzeptanz seitens der Bürgerinnen und Bürger ist ein zentraler Parameter der Umsetzbarkeit von Autarkievorstellungen. Der für Energie-Autarkie notwendige Ausbau von erneuerbaren Energien erzeugt stets auch „Verlierer“, deren subjektiv wahrgenommene Lebensqualität durch Biogas- oder Windkraftanlagen in ihrem Wohnumfeld eingeschränkt wird. Einige Befragte berichten von den Schwierigkeiten, solche Konflikte einvernehmlich zu lösen.
- **Maßstab:** Wenn überhaupt, erachten die Befragten Autarkiebestrebungen allenfalls auf kleinteiliger lokaler Ebene für sinnvoll und/oder machbar.

- **Treibstoffe und Mobilität:** Während bilanzielle und sogar lastgerechte Autarkiebestrebungen im Bereich der Wärme- und Stromversorgung unter bestimmten Umständen für die Befragten noch machbar erscheinen, ist dies im Mobilitätsbereich eher unwahrscheinlich.
- **Wirtschaft:** Sind energieintensive Unternehmen in einer Kommune angesiedelt, so erschwert dies laut den Befragten Energie-Autarkiebestrebungen, da dadurch die benötigte Energie stark anwächst.
- **Suffizienz:** Im Rahmen der Literaturstudie wurde bereits festgestellt, dass der Begriff der Suffizienz in den Diskussionen um Energie-Autarkie nur geringe Beachtung findet, obwohl ein „Weniger“ an Verbrauch Autarkiebestrebungen erscheinen ließe. Auch die Befragten erwähnen den Begriff der Suffizienz, wenn überhaupt, nur am Rande. Energieeffizienz scheint dagegen in Zusammenhang mit Autarkie eine ungleich größere Rolle zu spielen.

### 3.2.4 Fazit

Abschließend soll nochmals auf die eingangs erwähnten Fragestellungen zur a) Definition des Autarkiebegriffs, b) Rolle des Autarkiebegriffs und c) Bedeutung zentraler Akteure aus Perspektive der befragten Stakeholder eingegangen werden.

Ad a) Der Begriff der Energie-Autarkie wird uneinheitlich verwendet und erscheint nicht klar definiert. Es fällt schwer abzugrenzen, was gemeint ist, wenn von Energie-Autarkie gesprochen wird und welche Systemgrenzen zu ziehen sind.

Ad b) Autarkiebestrebungen sind keinem der Befragten ein zentrales Anliegen. Lastgerechte Autarkie wird durchweg als nicht sinnvoll bzw. erstrebenswert erachtet. Bilanzielle Autarkie erscheint dagegen in einem positiveren Licht. Sie stellt jedoch auch kein Primärziel dar. Manche Befragten betrachten sie als positiven Nebeneffekt bei der Verwirklichung ihrer Ziele (z. B. Ausbau erneuerbarer Energien, Energiewende).

Ad c) Hinsichtlich Energie-Autarkiebemühungen existiert kein Akteur, den alle Befragten als zentrale treibende Kraft identifizieren. Manche betrachten Kommunen (Stichwort „Bioenergiedörfer“) und Stadtwerke als zentrale Akteure, andere wollen diesen wiederum keine herausragende Rolle zugestehen. Allein die politischen Institutionen, die für die politisch-regulatorische Rahmensetzung im Energiebereich zuständig sind (Bundes- und Landesregierung), werden von allen Befragten als zentrale Akteure betrachtet, obwohl diese selbst keine Energie-Autarkieziele verfolgen. Sie sind jedoch entscheidend dafür, was im Energiebereich wirtschaftlich sowie erlaubt und damit letztendlich möglich ist.

## 3.3 Szenarioerstellung mittels Cross-Impact-Bilanzanalyse (CIB)

### 3.3.1 Auswahl der Szenarioelemente für die CIB

Um die Langfristszenarien für Baden-Württemberg zu erstellen, wurde die Cross-Impact-Bilanzanalyse (CIB) (Abschnitt 2.3.1) angewandt. Dazu wurden in einem ersten Schritt die wichtigsten Einflussgrößen auf den Energie-Autarkiegrad des Landes erhoben und ihr momentaner Zustand, sowie mögliche Entwicklungsvarianten bis zum Zieljahr 2050 bestimmt. In einem zweiten Schritt wurden dann die Wech-

selwirkungen zwischen den berücksichtigten Szenariodeskriptoren und ihren Entwicklungsvarianten erhoben. Schließlich wurde die daraus resultierende Cross-Impact-Matrix auf ihre konsistenten Deskriptorkombinationen hin ausgewertet und die zu berechnenden Szenarien bestimmt.

Die Auswahl der zu berücksichtigenden Szenarioelemente begann mit Experteninterviews im Projektteam, sowie durch neun leitfadengestützte Interviews mit Vertretern von Stadtwerken, Verbänden, Netzbetreibern, Energieversorgern und Politik. Darauf aufbauend wurde eine Liste mit den wichtigsten Nennungen erstellt, die allen genannten Personen mit der Bitte um Ergänzungen zugesandt wurde. Alle Szenariodeskriptoren der daraus resultierenden Liste wurden danach durch eine Umfrage unter allen Beteiligten nach ihrer Wichtigkeit (0-10) geordnet, um die Zahl der in die CIB eingehenden Faktoren auf maximal 20 zu beschränken. Da von den beteiligten Instituten diese zum Teil von mehreren Experten ausgefüllt wurde, von den Stakeholdern allerdings meist alleine, wurde die Wichtigkeit einmal mit jeweils einer Stimme pro Institution (ungewichtet, siehe Tabelle 6) und einmal pro beteiligtem Experten (gewichtet) ausgewertet.

**Tabelle 6: Umfrageergebnisse Wichtigkeit der Deskriptoren Baden-Württemberg**

<i>Deskriptor</i>	<i>Wichtigkeit</i>
<b>Autarkiegrad Wärme</b>	8,8
<b>Ausbau Erneuerbare Energien</b>	8,7
<b>Autarkiegrad Strom</b>	8,3
<b>Ausbau Verteilnetz</b>	8,2
<b>Energetische Rohstoffpreise</b>	7,7
<b>Anteil Eigenerzeugung Strom u. Wärme</b>	6,8
<b>Autarkiegrad Mobilität</b>	6,7
<b>CO2-Preise</b>	6,7
<b>Entwicklung Demand Side Management</b>	6,3
<b>Gesetzgebung Wärme</b>	6,2
<b>Mögliche Standorte für Windkraft</b>	6,2
<b>Sanierungsraten und -tiefe</b>	6,0
<b>Biomasseimporte (ja/nein)</b>	5,8
<b>Struktur des ÖPNV</b>	5,7
<b>EU-Entwicklung</b>	5,7
<b>Mobilitätsverhalten (Modal Split)</b>	5,5
<b>Freiflächen PV</b>	5,3
<b>Wirtschaftswachstum BW</b>	4,8
<b>Demographische Entwicklung</b>	4,2
<i>Landschaftsverbrauch</i>	4,2
<i>Gesetzgebung Mobilität</i>	4,2
<i>Globale Entwicklung</i>	4,0
<i>Einkommensentwicklung</i>	3,8

Sowohl in der gewichteten, als auch in der ungewichteten Auswertung wurden die Deskriptoren „Einkommensverteilung“ und „Globale Entwicklung“ als am unwichtigsten eingeschätzt. „Gesetzgebung Mobilität“, „Landschaftsverbrauch“ und „Demographische Entwicklung“ landeten in der ungewichteten Auswertung mit 4,2 Punkten auf dem drittletzten Platz; deshalb wurde hier auf die gewichtete Auswertung zurückgegriffen um den letzten zu streichenden Deskriptor „Landschaftsverbrauch“ zu bestimmen. Dafür sprach auch, dass dieser als Modellergebnis trotzdem z.T. in den finalen Szenarien thematisiert werden kann.

Nach der Auswahl der wichtigsten Szenariodeskriptoren wurden für diese Szenarioessays erstellt, die den aktuellen Zustand des Deskriptors, sowie dessen wichtigste Entwicklungsmöglichkeiten bis zum Jahr 2050 skizzieren. Sie durchliefen dabei eine Korrekturschleife, in die alle Projektpartner eingebunden waren. Die vollständigen Deskriptoressays sind im Anhang zu finden. In diesem Prozess kam es zu geringfügigen Änderungen der bisherigen Deskriptorbezeichnungen:

- Der wichtigste Einfluss der Mobilitätsgesetzgebung auf die Energiebilanz wurde in der Vorgabe der Biospritbeimischung gesehen, welche aber auch von der technischen Entwicklung dieser Kraftstoffe abhängig ist; der Deskriptor wurde dementsprechend umbenannt.
- Beim Verbrauch der Raumwärme ist der Altbau gegenüber dem Neubau auch 2050 der klar dominierende Faktor. Daher wurde dieser Deskriptor implizit in den Deskriptor Sanierungsrate eingefügt, in dem Sanierungsraten weit über dem momentanen Stand als Variante auftauchen, die z. B. auch durch gesetzliche Vorgaben forciert werden könnten. Auf Wunsch der Modellierer wurde dafür noch ein eigener Deskriptor zur Gesetzgebung im Strommarkt ergänzt.
- Das Potenzial von Demand Side Management lässt sich erst in einem Smart-Grid sinnvoll erschließen, deshalb wurde dieser Deskriptor als Option in den Deskriptor „Ausbau des Verteilnetzes“ integriert.

### **3.3.2 Erhebung der Cross-Impacts**

Um die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Szenariodeskriptoren und ihren Varianten zu bestimmen wurde die Wirkung jeder Variante auf alle anderen Varianten bewertet. Die Realisierung einer Deskriptorvariante wurde dazu in Hinblick auf ihre Wirkung auf die Realisierung einer Variante eines anderen Deskriptors als stark fördernd (+3) / fördernd (+2) / schwach fördernd (+1) / ohne klaren Einfluss (0) / schwach hindernd (-1) / hindernd (-2) oder stark hindernd bewertet (-3) werden. An der Bewertung konnten alle Projektmitglieder sowie die Interviewten externen Experten teilnehmen, aus der letzten Gruppe konnte jedoch nur eine Person für diesen Prozess gewonnen werden. Diese Bewertung wurde zunächst in einem Workshop von jedem Teilnehmer einzeln durchgeführt, alle stark widersprüchlichen Bewertungen – bei denen es nicht nur über die Stärke eines Impacts unterschiedliche Ansichten gab, sondern auch über die Wirkungsrichtung – wurden in einem zweiten Workshop diskutiert, bis eine gemeinsame Bewertung gefunden war. Gab es nur unterschiedliche Bewertungen in Bezug auf die Stärke der Wirkung, wurden diese gemittelt. Dafür wurde die Summe der Bewertungen aller Einschätzungen gebildet; da die CIM von insgesamt sechs Experten bewertet wurde gibt die daraus resultierende Cross-Impact-Matrix gibt eine Einschätzung aller Cross-Impacts zwischen den Deskriptorvarianten wieder, die dort mit -18 (stark hindern) bis +18 (stark fördernd) abgebildet sind (Abbildung 18). Die gemeinsam diskutierten Cross-Impacts wurden analog mit 6 multipliziert.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	
	A1 A2 A3	B1 B2	C1 C2 C3 C4 C5	D1 D2 D3 D4 D5	E1 E2 E3 E4 E5	F1 F2 F3	G1 G2 G3	H1 H2 H3	I1 I2 I3	J1 J2 J3	K1 K2	L1 L2 L3	M1 M2 M3	N1 N2 N3	O1 O2 O3	P1 P2 P3	Q1 Q2 Q3	R1 R2 R3	S1 S2	
A Ausbau Verteilnetz																				
A1 Klassischer Netzausbau																				
A2 Stand der Technik																				
A3 Smart Grid Ansatz																				
B Ausbau Erneuerbare Energien																				
B1 80% bis 2000																				
B2 90% bis 2050																				
C Ausbaueffizienz																				
C1 100% Biomasse																				
C2 100% Biomasse																				
C3 33% iestg. Stromerzeugung																				
C4 66% iestg. Stromerzeugung																				
C5 100% iestg. Stromerzeugung																				
D Ausbaueffizienz Wärme																				
D1 50% bienn. Wärmeautarkie																				
D2 100% bienn. Wärmeautarkie																				
D3 33% iestg. Wärmeautarkie																				
D4 66% iestg. Wärmeautarkie																				
D5 100% iestg. Wärmeautarkie																				
E Ausbaueffizienz Mobilität																				
E1 50% bienn. Mobilitätsautarkie																				
E2 100% bienn. Mobilitätsautarkie																				
E3 33% iestg. Mobilitätsautarkie																				
E4 66% iestg. Mobilitätsautarkie																				
E5 100% iestg. Mobilitätsautarkie																				
F Gesetzgebung Strommarkt																				
F1 Energy-Only-Market																				
F2 Kapazitätsmarkt																				
F3 Strategische Reserve																				
G Entwicklung Bioraffinerie																				
G1 Geringe Biomischung																				
G2 Mittlere Biomischung																				
G3 Starke Biomischung / Substitution																				
H Struktur des ÖPNV																				
H1 Rückgang																				
H2 Konstanter Anteil																				
H3 Ausweitung																				
I CO2-Preis																				
I1 Niedriger Preis																				
I2 Mittlerer Preis																				
I3 Hoher Preis																				
J Sauerstoffrate und -höhe																				
J1 Schwache Effizienzentwicklung																				
J2 Moderate Effizienzentwicklung																				
J3 Starke Effizienzentwicklung																				
K Mobilitätsverhalten / Modal Split																				
K1 Rückgang MV / sinkende Personenkilometer																				
K2 Konstanter MV / steigende Personenkilometer																				
L Eigenzeugung Strom und Wärme																				
L1 Umfassende Eigenzeugung																				
L2 Keine Eigenzeugung																				
L3 Keine Produktion																				
M Ausbau Photovoltaik																				
M1 Geringer Ausbaupfad																				
M2 Mittlerer Ausbaupfad																				
M3 Starker Ausbaupfad																				
N Ausbau Windkraft																				
N1 Geringer Ausbaupfad																				
N2 Mittlerer Ausbaupfad																				
N3 Starker Ausbaupfad																				
O Biomasseimporte																				
O1 Keine Importe																				
O2 Biogene Importe																				
O3 Biogene Importe																				
P EU-Integration																				
P1 Niedrige Preis																				
P2 Mittlerer Preis																				
P3 Hoher Preis																				
Q EU-Integration																				
Q1 EU-Finanzsicherung																				
Q2 Nobility Care																				
Q3 EU-Unterstützung																				
R Wirtschaftswachstum																				
R1 Schwache Entwicklung																				
R2 Moderate Entwicklung																				
R3 Starke Entwicklung																				
S Bevölkerungsentwicklung																				
S1 Sinkende Bevölkerungsentwicklung																				
S2 Sinkende Bevölkerungsentwicklung																				
S3 Sinkende Bevölkerungsentwicklung																				

Abbildung 18: Cross-Impact-Matrix Baden-Württemberg

### 3.3.3 Szenarioauswahl

Die Auswertung der Cross-Impact-Matrix ergab 22 vollkonsistente Szenarien, die allerdings einige Vakanzen in Bezug auf die Deskriptorvarianten aufweisen. Klassischer Netzausbau, höhere Autarkiegrade, ein hoher CO<sub>2</sub>-Preis, ein geringer Sanierungsgrad, sowie geringe Ausbaupfade für Wind und Photovoltaik sind in diesen Szenarien ebenso wie ein starkes Wirtschaftswachstum nicht vertreten. Die Verteilung der Deskriptorvarianten in den vollkonsistenten Szenarien ist in Abbildung 19 abgebildet.

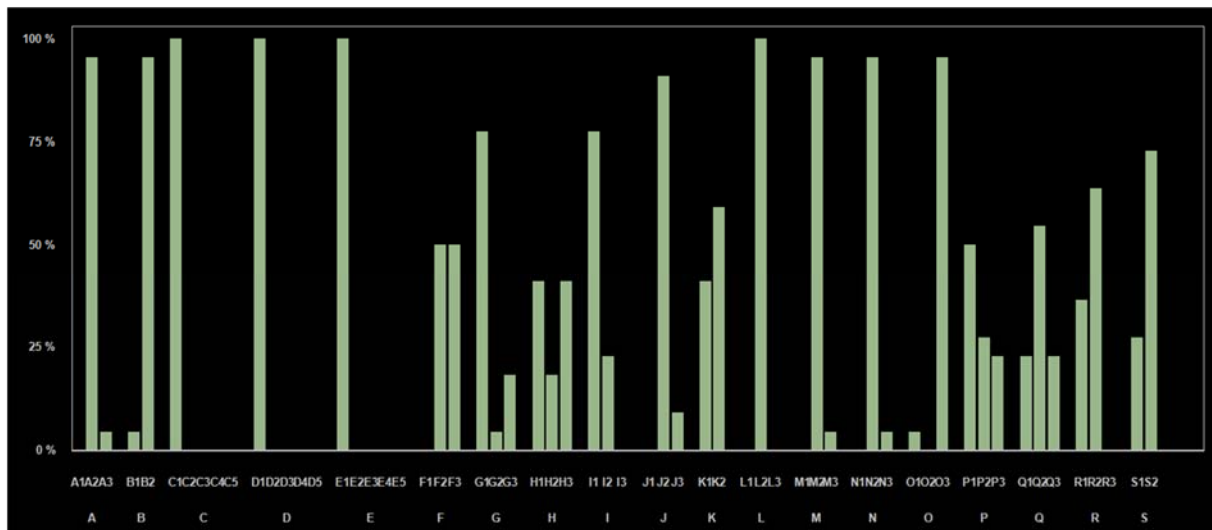


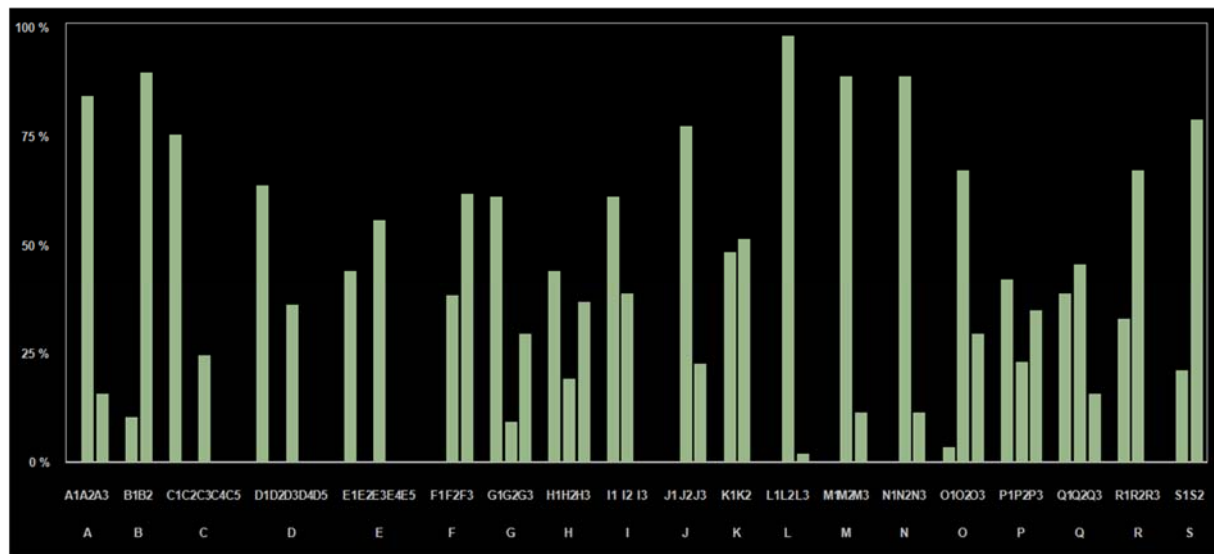
Abbildung 19: Häufigkeiten der Deskriptorvarianten bei den 22 vollkonsistenten Szenarien

Dieses Ergebnis bedeutet, dass die befragten Experten davon ausgehen, dass sich diese Entwicklungen ohne zusätzliche Impulse unter der Voraussetzung einer mindestens 50 prozentigen bilanziellen Energie-Autarkie (dem geringsten vorausgesetzten Autarkiegrad) in den Bereichen Strom, Wärme und Mobilität eher nicht realisieren werden. Alle vollkonsistenten Szenarien sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Da für die Analyse aber auch höhere Autarkiegrade von Interesse sind wurden diese im Folgenden über zwei Wege realisiert: zum einen wurden auch leicht inkonsistente Szenarien analysiert, zum anderen wurden Varianten, die von besonderem Interesse sind, fest gesetzt und dann das am wenigsten inkonsistente Szenario mit dieser Ausprägung ausgewählt.

Schon bei sehr leichter zugelassener Inkonsistenz (bis zum Inkonsistenzwert von 2 (IK 2) bei einem Wertebereich der Cross-Impacts von -18 bis +18) verschwinden viele der angesprochenen Vakanzen (Abbildung 20). Allerdings erscheinen auch unter diesen Umständen die sehr hohen Autarkiegrade für Strom, Wärme und Mobilität nicht ohne zusätzliche Impulse plausibel. Solche zusätzlichen Impulse könnten einerseits aus der Entwicklung eines Deskriptors über den angenommenen Bereich entstehen (z. B. noch höhere Öl- oder CO<sub>2</sub>-Preise), andererseits über Einflüsse, die nicht in den Deskriptoren abgebildet sind (wie z. B. verstärkte politische Initiative).





**Abbildung 20: Häufigkeiten der Deskriptorvarianten bei den 204 leicht inkonsistenten Szenarien**

Unter diesen Szenarien finden sich 46, die eine 33 %ige lastgerechte Autarkie für alle drei Bereiche (Strom, Wärme und Mobilität) – und damit eine schwieriger zu verwirklichende Form der Energie-Autarkie als in den vollkonsistenten Szenarien – aufweisen. Unter diesen erfüllen allerdings nur drei das Landesziel einer 80 %-igen Deckung des Energiebedarfes aus Erneuerbaren Energien und bieten sich damit zur Auswahl für ein zu berechnendes Szenario mit schwach lastgerechten Formen der Energie-Autarkie an (Tabelle 8).

Höhere Autarkiegrade als die niedrigsten bilanziellen und lastgerechten Autarkiestufen erscheinen auch mit höheren Zugeständnissen an die Inkonsistenz ohne weitere Impulse nicht als plausibel. Da insbesondere eine komplette bilanzielle, sowie eine komplette lastgerechte Energie-Autarkie Baden-Württembergs im Fokus des Projektes standen, wurden diese in der Analyse fest gesetzt und die jeweils konsistentesten Szenarien mit dieser Kombination bestimmt. Für die sektorübergreifende 100 %ige bilanzielle Energie-Autarkie finden sich so 6 Szenarien (Tabelle 9) mit nahezu identischem Inkonsistenzwert (28-30), für die sektorübergreifende 100 %-ige lastgerechte Energie-Autarkie 10 Szenarien (Tabelle 10) mit sehr ähnlichen Inkonsistenzwerten (48-50). Das bedeutet, dass im Fall der bilanziellen Autarkie die stark hindernde Wirkung von 2 Deskriptoren, im Fall der lastgerechten Autarkie die stark hindernde Wirkung von 3 Faktoren überwunden werden muss, um diese Autarkiegrade als plausibel erscheinen zu lassen

**Tabelle 8: Szenarien mit 33-%iger lastgerechter Energie-Autarkie für Strom, Wärme und Mobilität für Baden-Württemberg**

Szenario Nr. 1	Szenario Nr. 2	Szenario Nr. 3
A Ausbau Verteilnetz: A3 Smart Grid Ansatz		
B Ausbau Erneuerbare Energien: B1 80% bis 2050		
C Autarkiegrad Strom: C3 33% lastg. Stromautarkie		
D Autarkiegrad Wärme: D3 33% lastg. Wärmeautarkie		
E Autarkiegrad Mobilität: E3 33% lastg. Mobilitätsautarkie		
F Gesetzgebung Strommarkt: F3 Strategische Reserve		
G Entwicklung Biokraftstoffe: G3 Starke Beimischung / Substitution		
H Struktur des ÖPNV: H1 Rückgang	H Struktur des ÖPNV: H3 Anstieg	
I CO2-Preise: I2 Mittlerer Preispfad		
J Sanierungsrate und -tiefe: J3 Starke Effizienzentwicklung		
K Mobilitätsverhalten / Modal Split: K1 Rückgang MIV / sinkende Personenkilometer	K Mobilitätsverhalten / Modal Split: K2 Konstanter MIV /steigende Personenkilometer	
L Eigenerzeugung Strom und Wärme: L2 Teilweise Privilegierung		
M Ausbau Photovoltaik: M2 Mittlerer Ausbaupfad	M Ausbau Photovoltaik: M3 Starker Ausbaupfad	
N Ausbau Windkraft: L3 Starker Ausbaupfad		
O Biomasseimporte: O2 Bilanzierte Importe		
P Energetische Rohstoffpreise: P2 Mittlerer Preispfad		
Q EU-Integration: Q1 EU Renaissance		
R Wirtschaftswachstum: R1 Schwache Entwicklung	R Wirtschaftswachstum: R2 Moderate Entwicklung	
S Bevölkerungsentwicklung: S2 Schwacher Bevölkerungsrückgang		

**Tabelle 9: Szenarien mit sektorübergreifender 100-%iger bilanzieller Energie-Autarkie für Baden-Württemberg**

Szenario Nr. 1	Szenario Nr. 2	Szenario Nr. 3	Szenario Nr. 4	Szenario Nr. 5	Szenario Nr. 6
A Ausbau Verteilnetz: A3 Smart Grid Ansatz					
B Ausbau Erneuerbare Energien: B1 80% bis 2050					
C Autarkiegrad Strom: C2 100% bilanz. Stromautarkie					
D Autarkiegrad Wärme: D2 100% bilanz. Wärmeautarkie					
E Autarkiegrad Mobilität: E2 100% bilanz. Mobilitätsautarkie					
F Gesetzgebung Strommarkt: F2 Kapazitätsmarkt			F Gesetzgebung Strommarkt: F3 Strategische Reserve		
G Entwicklung Biokraftstoffe: G1 Geringe Beimischung					
H Struktur des ÖPNV: H1 Rückgang	H Struktur des ÖPNV: H2 Konstanter Anteil	H Struktur des ÖPNV: H1 Rückgang	H Struktur des ÖPNV: H2 Konstanter Anteil	H Struktur des ÖPNV: H1 Rückgang	
I CO2-Preise: I1 Niedriger Preispfad					
J Sanierungsrate und -tiefe: J3 Starke Effizienzentwicklung					
K Mobilitätsverhalten / Modal Split: K1 Rückgang MIV / sinkende Personenkilometer					
L Eigenerzeugung Strom und Wärme: L2 Teilweise Privilegierung					
M Ausbau Photovoltaik: M3 Starker Ausbaupfad					
N Ausbau Windkraft: L3 Starker Ausbaupfad					
O Biomasseimporte: O3 Bilanzneutrale Importe					
P Energetische Rohstoffpreise: P2 Mittlerer Preispfad	P Energetische Rohstoffpreise: P3 Hoher Preispfad	P Energetische Rohstoffpreise: P2 Mittlerer Preispfad	P Energetische Rohstoffpreise: P3 Hoher Preispfad	P Energetische Rohstoffpreise: P2 Mittlerer Preispfad	
Q EU-Integration: Q2 Nobody Cares				Q EU-Integration: Q3 EU under threat	
R Wirtschaftswachstum: R1 Schwache Entwicklung					
S Bevölkerungsentwicklung: S2 Schwacher Bevölkerungsrückgang				S Bevölkerungsentwicklung: S1 Stärkerer Bevölkerungsrückgang	

**Tabelle 10: Szenarien mit sektorübergreifender 100-%iger lastgerechter Energie-Autarkie für Baden-Württemberg**

Szenario Nr. 1	Szenario Nr. 2	Szenario Nr. 5	Szenario Nr. 6	Szenario Nr. 3	Szenario Nr. 4	Szenario Nr. 9	Szenario Nr. 10	Szenario Nr. 7	Szenario Nr. 8
A Ausbau Verteilnetz: A3 Smart Grid Ansatz									
B Ausbau Erneuerbare Energien: B1 80% bis 2050									
C Autarkiegrad Strom: C5 100% lastg. Stromautarkie									
D Autarkiegrad Wärme: D5 100% lastg. Wärmeautarkie									
E Autarkiegrad Mobilität: E5 100% lastg. Mobilitätsautarkie									
F Gesetzgebung Strommarkt: F2 Kapazitätsmarkt							F Gesetzgebung Strommarkt: F3 Strategische Reserve		
G Entwicklung Biokraftstoffe: G1 Geringe Beimischung					G Entwicklung Biokraftstoffe: G2 Mittlere Beimischung			G Entwicklung Biokraftstoffe: G1 Geringe Beimischung	
H Struktur des ÖPNV: H2 Konstanter Anteil		H Struktur des ÖPNV: H1 Rückgang		H Struktur des ÖPNV: H2 Konstanter Anteil		H Struktur des ÖPNV: H1 Rückgang		H Struktur des ÖPNV: H2 Konstanter Anteil	
I CO2-Preise: I2 Mittlerer Preispfad									
J Sanierungsrate und -tiefe: J3 Starke Effizienzentwicklung									
K Mobilitätsverhalten / Modal Split: K1 Rückgang MIV / sinkende Personenkilometer									
L Eigenerzeugung Strom und Wärme: L1 Umfassende Privilegierung	L Eigenerzeugung Strom und Wärme: L2 Teilweise Privilegierung	L Eigenerzeugung Strom und Wärme: L1 Umfassende Privilegierung	L Eigenerzeugung Strom und Wärme: L2 Teilweise Privilegierung	L Eigenerzeugung Strom und Wärme: L1 Umfassende Privilegierung	L Eigenerzeugung Strom und Wärme: L2 Teilweise Privilegierung	L Eigenerzeugung Strom und Wärme: L1 Umfassende Privilegierung	L Eigenerzeugung Strom und Wärme: L2 Teilweise Privilegierung	L Eigenerzeugung Strom und Wärme: L1 Umfassende Privilegierung	L Eigenerzeugung Strom und Wärme: L1 Umfassende Privilegierung
M Ausbau Photovoltaik: M3 Starker Ausbaupfad									
N Ausbau Windkraft: L3 Starker Ausbaupfad									
O Biomasseimporte: O3 Bilanzneutrale Importe									
P Energetische Rohstoffpreise: P2 Mittlerer Preispfad									
Q EU-Integration: Q2 Nobody Cares									
R Wirtschaftswachstum: R1 Schwache Entwicklung									
S Bevölkerungsentwicklung: S2 Schwacher Bevölkerungsrückgang									

Da auf Grund der Vielzahl der konsistenten Szenarien nicht alle quantitativ berechnet werden konnten, wurden ein vollkonsistentes Szenario sowie zwei extreme Autarkieszenarien ausgewählt.

**Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW)**

Als Basisszenario wurde für die Analysen für Baden-Württemberg eine Entwicklung mit mittleren Energiepreisen und einer Renaissance der EU-Integration und entsprechend einer Einhaltung der Vorgaben des Emissionshandelssystems der Europäischen Union (EU ETS) ausgewählt. Durch diese Rahmenbedingungen werden die Entwicklung des Smart-Grids und der Ausbau der Windkraft und Photovoltaik in Deutschland sowie in Baden-Württemberg unterstützt. Gleichzeitig bremst der Impuls der starken Europäischen Integration Autarkiebestrebungen, da er die Entwicklung eines transeuropäischen Stromverbundes vorantreibt. Durch den prominenten Stellenwert von Umwelt- und Klimaschutzmaßnahmen in einer sich stärker integrierenden EU wird das Wirtschaftswachstum moderat bleiben. Zusammen mit den mittleren Rohstoffpreisen bremst diese Entwicklung nicht das Wachstum des motorisierten Individualverkehrs und der zurückgelegten Personenkilometer.

**Autarkieszenarien**

Neben dem Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW) werden für Baden-Württemberg zwei Autarkieszenarien näher betrachtet, das Szenario Strom-autarkes Baden-Württemberg (SABW) und das Szenario Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW). Beide Autarkieszenarien setzen auf den Annahmen des Basisszenarios, dem Szenario mit ETS-Zielen (ETSBW), auf. Damit sind die in den Autarkieszenarien resultierenden Effekte alleine auf die unterstellten Autarkiebestrebungen zurückzuführen. Vom Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW) ausgehend, wurde hier einmal die maximal erreichbare

Strom-Autarkie (*Strom-autarkes Baden-Württemberg*) sowie die maximal erreichbare Primärenergie-Autarkie (*Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg*) über alle Bereiche errechnet.

Im Szenario **Strom-autarkes Baden-Württemberg (SABW)** wurde auf die Kostenoptimierung verzichtet und dafür die Autarkie im Strombereich maximiert. Die Berechnung des bilanziellen Strom-Autarkiegrades erfolgt nach Gleichung 2 bzw. Gleichung 3. Dabei wird der Quotient aus lokal erzeugtem Strom und lokal verbrauchtem Strom gebildet. Überschüssige Stromproduktion, die anschließend über Exporte an die benachbarten Länder geliefert wird, wirkt sich somit positiv auf die Höhe des bilanziellen Strom-Autarkiegrades aus.

$$\begin{aligned} \text{Elektrischer Autarkiegrad (bilanziell)} & \qquad \qquad \qquad \text{Gleichung 2} \\ & = \frac{\text{Netto Stromerzeugung}_{\text{Bilanzraum}}}{\text{Netto Stromverbrauch}_{\text{Bilanzraum}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Elektrischer Autarkiegrad (bilanziell)} & \qquad \qquad \qquad \text{Gleichung 3} \\ & = \frac{\text{Netto Stromerzeugung}_{\text{Bilanzraum}}}{\text{Eigenverbrauch}_{\text{Nettostromerzeugung}} + \text{Stromimporte}} \end{aligned}$$

Bedingung ist dabei, dass spätestens in 2050 der 100 %-ige Strom-Autarkiegrad für Baden-Württemberg erreicht wird.

Im Szenario **Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW)** wird analog zum anderen Autarkieszenario (SABW) die Primärenergie-Autarkie maximiert. Dies schließt somit neben den Stromanwendungen nun ebenfalls die Wärme und die Mobilitätsbedarfe in die Berechnung der Importunabhängigkeit ein. Gleichung 5 zeigt die dazugehörige Nebenbedingung für das Energiesystemmodell TIMES PanEU-BW.

$$\begin{aligned} \text{Primärenergie – Autarkiegrad (bilanziell)} & \qquad \qquad \qquad \text{Gleichung 4} \\ & = \frac{\text{Primärenergiegewinnung}_{\text{Bilanzraum}}}{\text{Primärenergieverbrauch}_{\text{Bilanzraum}}} \end{aligned}$$

Allen drei Szenarien gemeinsam sind dabei ein gemeinsamer sozioökonomischer Rahmendatenkranz (Tabelle 11) sowie die Annahme hinsichtlich des Ausstiegs aus der Nutzung der Kernenergie bis zum Jahr 2022. Der Rahmendatensatz umfasst die langfristige demographische Entwicklung, die gesamtwirtschaftliche und sektorale Entwicklung, die Entwicklung der Verkehrsleistung im Personen- und Güterverkehr sowie die Entwicklung der Preise für importierte Energieträger gemäß der vorgestellten Szenarienphilosophie.

Abbildung 21 zeigt die in dieser Studie angenommene mittlere Energieträgerpreisentwicklung für Deutschland (gemäß Energy Technology Perspectives (ETP) 2015). Für die Modellregion Baden-Württemberg werden zusätzlich Liefer- und Verteilkosten berücksichtigt. Bezüglich der längerfristigen Verfügbarkeit von Erdöl und Erdgas wird davon ausgegangen, dass physisch und politisch bedingte Verknappungen nicht auftreten. Allerdings steigen die realen Erdöl- und Erdgaspreise nach einem Rückgang langfristig wieder.



Tabelle 11: Sozioökonomische und verkehrswirtschaftliche Rahmenannahmen für Baden-Württemberg bis zum Jahr 2050

		2012	2020	2030	2040	2050
<b>Entwicklung der Bevölkerung und des Bruttoinlandsprodukts (BIP) in Baden-Württemberg</b>						
<b>Bevölkerung</b>	Mio.	10,57	10,72	10,59	10,36	10,06
<b>Bruttoinlandsprodukt real</b>	Mrd. € <sub>10</sub>	403,2	450,8	523,6	594,9	670,0
<b>Verkehrsnachfrage 2010</b>						
<b>Personenverkehr</b>	Mrd. Pkm	120,6	125,6	127,0	125,0	120,8
<b>Güterverkehr</b>	Mrd. tkm	75,5	86,3	98,9	107,9	113,2

Quellen: IER et al (2010), Blesl (2014), eigene Berechnungen

### Energieträgerpreis

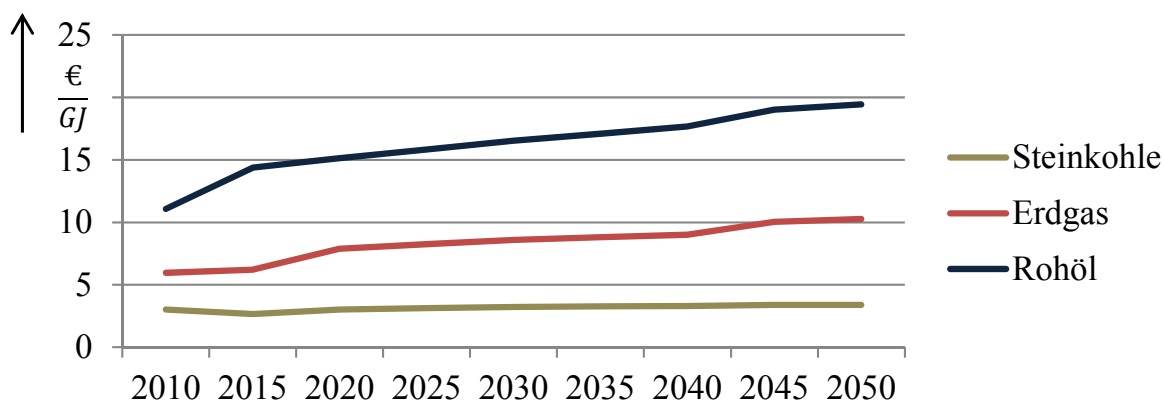


Abbildung 21: Energieträgerpreisentwicklung für fossile Energieträger in Deutschland, frei Grenze (ETP 2015)

Da im Rahmen dieser Untersuchung Deutschland und Baden-Württemberg nicht isoliert betrachtet werden, sondern auch das gesamte europäische Energiesystem in die Analyse miteinbezogen wird, ist auch für die EU-28 ein gemeinsamer sozioökonomischer Datensatz unterstellt.

### 3.4 Energiesystemmodellierung mit TIMES PanEU-BW

Das Pan-Europäische TIMES Energiesystemmodell mit besonderer Berücksichtigung von Baden-Württemberg (kurz TIMES PanEU-BW) (Abschnitt 2.3.3) ist ein 31 Regionen umfassendes Energiesystemmodell (Blesl et al., 2010), welches alle Staaten der EU-28 sowie die Schweiz, Norwegen und separat Baden-Württemberg beinhaltet. Der Modellierungszeitraum erstreckt sich von 2010 bis 2050, wobei die Modellierung in Stützjahren mit einer Länge von 5 Jahren erfolgt. Jedes Stützjahr ist durch 12 Zeitsegmente unterteilt (3 Tageszeitsegmente – Tag, Nacht und Spitzenlast – sowie 4 Jahreszeitsegmente – Sommer, Herbst, Winter und Frühjahr), anhand derer jahreszeitlich verschiedene Zustandsgrößen bzw. Last- und Nachfrageverteilungen abgebildet werden. Zielfunktion des Modells ist eine zeitintegrale Minimierung der gesamten diskontierten Systemkosten für den Zeithorizont 2010 bis 2050. Dabei ist im

Modell ein vollständiger Wettbewerb zwischen verschiedenen Technologien bzw. Energieumwandlungspfaden unterstellt. Des Weiteren gehen die Rahmenbedingungen bezüglich der Energiesteuern und Subventionen mit in die Kalkulation ein, ebenso wie typische Gewinnmargen bei den Energiesektoren, so dass im Zuge der einzelnen Stufen der Energiebereitstellungskette die Preise ansteigen (NEEDS working paper RS2, 2006).

Als Energiesystemmodell enthält TIMES PanEU-BW für die einzelnen Regionen alle an der Energieversorgung und -nachfrage beteiligten Sektoren, wie beispielsweise den Rohstoffbereitstellungssektor, die öffentliche und industrielle Strom- und Wärmeerzeugung, die Industrie, den Gewerbe-, Handel-, Dienstleistungssektor, die Haushalte und den Transportsektor. Sowohl die Treibhausgasemissionen ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) als auch Schadstoffemissionen ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , NMVOC,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ) sind in TIMES PanEU-BW erfasst. Durch seine regionale Auflösung erlaubt TIMES PanEU-BW die Berücksichtigung regionspezifischer Besonderheiten, wie z. B. unterschiedliche Kraftwerksstrukturen des Bestandes, regional verschiedene Ausbaupotenziale für Erneuerbare Energien sowie Potenziale zur Speicherung von  $\text{CO}_2$ . Im Modell ist ein interregionaler Stromhandel implementiert, so dass Stromexporte und -importe unter Berücksichtigung bestehender Kuppelleitungskapazitäten entsprechend ENTSO-E endogen im Modell berechnet werden.

Der im Rahmen dieser Studie angewandte integrierte Planungsansatz bietet somit den Vorteil, z. B. gegenüber den sonst üblichen „Spreadsheet“-Modellen, dass damit alle sektoralen und regionalen Rückkopplungen berücksichtigt werden können, ohne dass an den Koppelstellen der einzelnen Module Informationen verloren gehen. Dies ermöglicht unter vorgegebenen energie- und klimapolitischen Rahmenbedingungen jeweils die Ermittlung ökonomisch optimaler und aufeinander abgestimmter Handlungsstrategien in einzelnen Sektoren und Regionen. Angesichts der zunehmenden Liberalisierung der Energiemärkte auf der einen Seite und der Fragestellung hinsichtlich der Energie-Autarkie auf der anderen Seite erscheint dies von besonderer Bedeutung, da die jeweiligen wettbewerblichen Konkurrenzbeziehungen unbedingt zu erfassen sind. Eine Betrachtung, die sich aus einzelnen sektoralen oder regionalen Überlegungen oder aus gesonderten Analysen der verschiedenen Energieträger zusammensetzt, kann diesem Aspekt nicht gerecht werden.

### **3.4.1 Endenergieverbrauch in Baden-Württemberg**

Der Endenergieverbrauch weist im Basisszenario, dem Szenario mit ETS-Zielen (ETSBW), in Baden-Württemberg einen kontinuierlichen Rückgang auf, zu dem alle Sektoren beitragen (Abbildung 22). Die absolut gesehen stärksten Reduktionen verzeichnet bis zum Jahr 2050 der Verkehrssektor, in dem der Verbrauch bezogen auf das Jahr 2012 auch im Basisszenario, dem Szenario mit ETS-Zielen (ETSBW), um nahezu 100 PJ (>30%) sinkt. Auch der Industriesektor verzeichnet im Basisszenario, dem Szenario mit ETS-Zielen (ETSBW), über den gesamten Betrachtungszeitraum einen stetig sinkenden Endenergieverbrauch. Durch den Einsatz von Technologien mit geringerer Energieintensität werden somit Mehrverbräuche, die sich aus der teilweise steigenden Nachfrage nach Produktionsgütern in der Industrie bzw. aus der zunehmenden Verkehrsnachfrage, insbesondere im Güterverkehr, ergeben, überkompensiert.

Auch im Haushaltssektor ergibt sich ein deutlicher Rückgang des Endenergieverbrauchs im Basisszenario, dem Szenario mit ETS-Zielen (ETSBW). Dieser beruht vor allem auf dem abnehmenden Endenergieverbrauch zur Raumwärmebereitstellung, der sich durch den in der Energieeinsparverordnung

(EnEV) festgeschriebenen verstärkten Wärmeschutz für Neu- und Altbauten ergibt. Die Raumwärmebereitstellung mit geringerem spezifischem Energieverbrauch trägt auch im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) dazu bei, dass der Endenergieverbrauch sinkt.

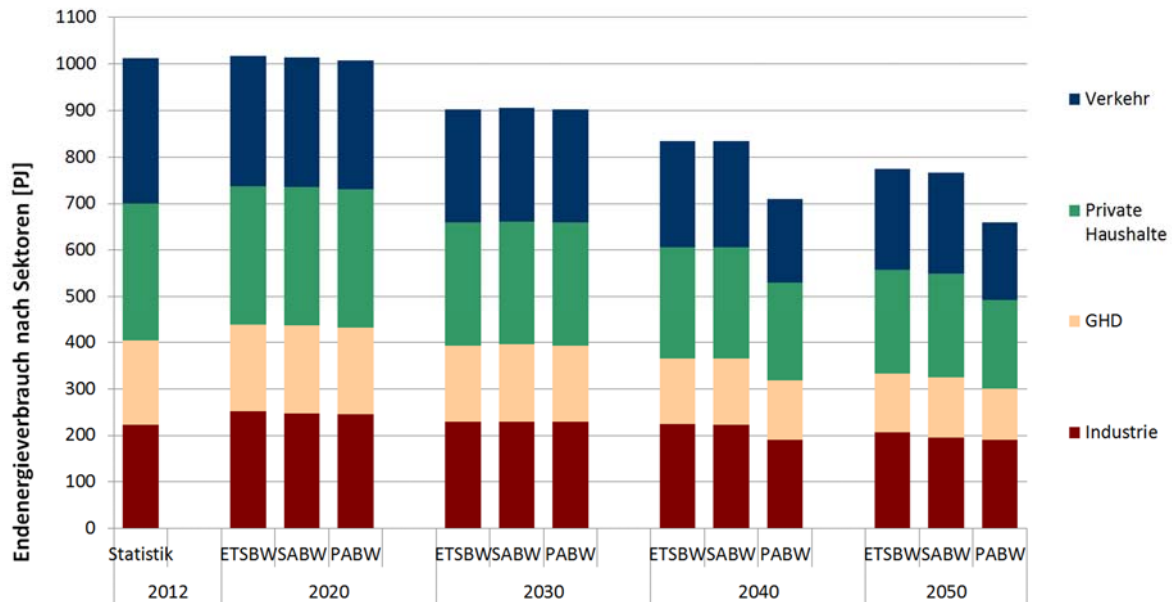


Abbildung 22: Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Sektoren in Baden-Württemberg von 2012 bis 2050 (Vergleich der Autarkieszenarien (SABW, PABW) mit dem Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW))

Die Szenarien mit Berücksichtigung der Autarkiebestrebungen zeichnen sich gegenüber dem Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW) durch einen insgesamt reduzierten Endenergieverbrauch aus, wenn dies im Falle des Szenarios Strom-autarkes Baden-Württemberg (SABW) auch nur ganz minimale Unterschiede sind. Effekte zeigen sich hier in einem leicht niedrigeren Endenergieverbrauch der Industrie sowie einem leicht höheren Endenergieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD). Demgegenüber ist im Szenario Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW) der Endenergieverbrauch aller Sektoren nach 2030 deutlich niedriger als im Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW). Die Reduktionen liegen im Jahr 2050 zwischen 8 % (Industrie) und 23 % (Verkehr) bzw. bei 15,2 bis 50,0 PJ. Das um insgesamt rund 115 PJ niedrigere Endenergieverbrauchsniveau in Baden-Württemberg trägt dazu bei, dem Ziel der Primärenergie-Autarkie nahe zu kommen. Neben der Durchführung von Energieeinsparmaßnahmen, z. B. Wärmedämmung der Gebäude, führt auch die verstärkte Nutzung von energieeffizienteren Technologien, z. B. Elektromobilität, zu diesem Verbrauchsrückgang im Szenario Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW).

Der Blick auf den Endenergieverbrauch nach Energieträgern (Abbildung 23) verdeutlicht, dass der Absatz der fossilen Energieträger Kohle, Öl und Gas im Basisszenario, dem Szenario mit ETS-Zielen (ETSBW), kontinuierlich abnimmt. Der Einsatz von Kohle zur Wärmeerzeugung in Haushalten und im GHD-Sektor läuft bis zum Jahr 2030 vollständig aus, in der Industrie verringert sich der Kohleverbrauch zwischen 2010 und 2050 im Basisszenario, dem Szenario mit ETS-Zielen (ETSBW), nur geringfügig.

Der Ölverbrauch und der Gasverbrauch zur Wärmeerzeugung in Haushalten und im GHD-Sektor sowie für Industrieanwendungen sinken ebenfalls deutlich, sodass im Basisszenario, dem Szenario mit ETS-

Zielen (ETSBW), im Jahr 2050 mit 86 % nahezu der gesamte endenergetische Verbrauch an Mineralölprodukten auf den Verkehrssektor entfällt (Ausgangswert 2012 67%). Der Verbrauchsrückgang verläuft nahezu parallel zum gesamten Endenergieverbrauchsrückgang.

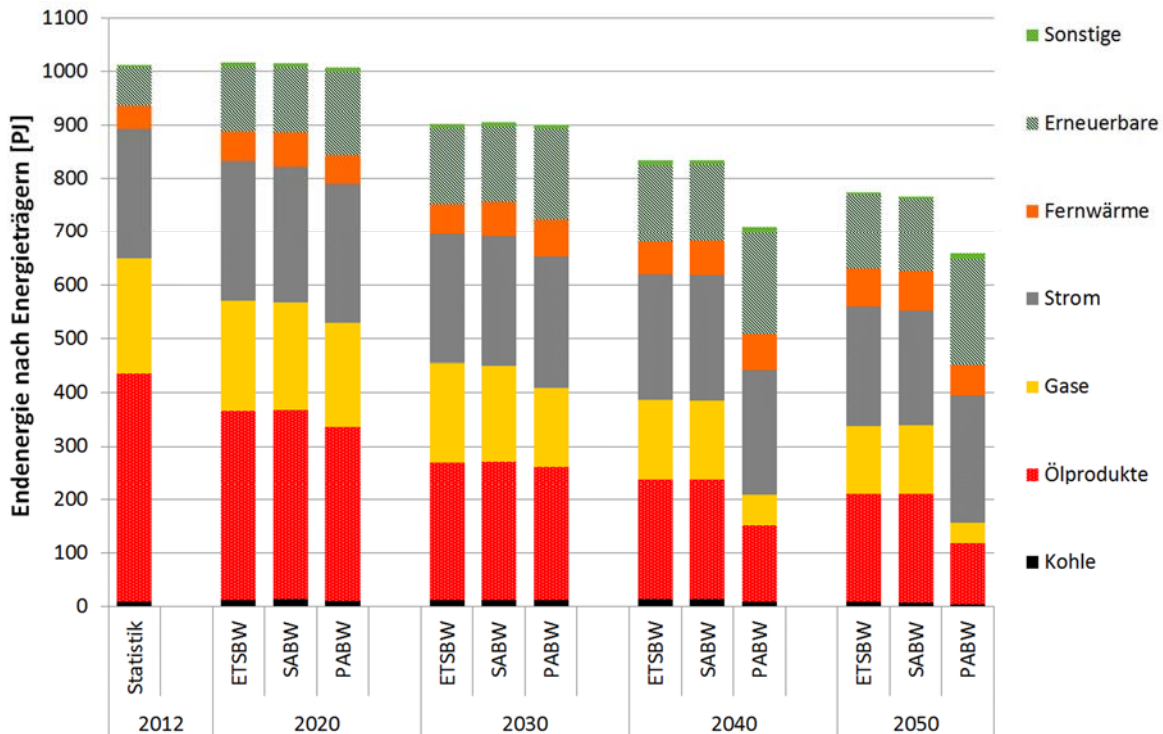


Abbildung 23: Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern in Baden-Württemberg von 2012 bis 2050 (Vergleich der Autarkieszenarien (SABW, PABW) mit dem Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW))

Der Stromanteil am Endenergieverbrauch nimmt im Basisszenario, dem Szenario mit ETS-Zielen (ETSBW), im Zeitverlauf zu, da Stromanwendungen wie Wärmepumpen oder Elektrofahrzeuge aufgrund der zunehmenden Dekarbonisierung der Stromerzeugung an Attraktivität zur CO<sub>2</sub>-Vermeidung gewinnen. Zusätzlich zur Möglichkeit, Strom als CO<sub>2</sub>-armen Energieträger einzusetzen, erlaubt der, im Vergleich zu fossilen Energieträgern, im Durchschnitt höhere Wirkungsgrad der strombetriebenen Verbraucher einen zusätzlichen Beitrag zur Endenergieverbrauchsreduktion.

In der Raumwärmebereitstellung gewinnt auch die Fernwärme zunehmend an Bedeutung. Trotz rückläufigen Endenergieverbrauchs und einer rückläufigen Raumwärmenachfrage steigt ihr Absatz bis zum Jahr 2050 im Basisszenario, dem Szenario mit ETS-Zielen (ETSBW), um 62 % bezogen auf 2012.

Den stärksten relativen Zuwachs aller Energieträger am Endenergieverbrauch verzeichnen im Basisszenario, dem Szenario mit ETS-Zielen (ETSBW), jedoch die Erneuerbaren Energien. Darunter fallen sowohl Solarwärme, Umgebungswärme und Biomasse zur Raumwärmeerzeugung, Biomasse zur Prozesswärmeerzeugung in der Industrie sowie der Einsatz von Biokraftstoffen im Verkehr. Den größten Anteil am direkten Endenergieeinsatz Erneuerbarer Energien haben feste Biomassen und erneuerbarer Müll, Umgebungswärme sowie nach 2030 in zunehmendem Maße Biokraftstoffe. Im Jahr 2050 beträgt der Anteil dieser Energieträger im Basisszenario, dem Szenario mit ETS-Zielen (ETSBW), 18 %. Solarthermie und Biogas spielen im Vergleich dazu eine weniger bedeutende Rolle. Getrieben wird der verstärkte

Einsatz von Erneuerbaren Energien als Endenergieträger von den ständig schärfer werdenden Reduktionsvorgaben für den Ausstoß von Treibhausgasen.

Im Vergleich zum Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW) zeigen sich im Szenario Strom-autarkes Baden-Württemberg (SABW) beim Endenergieverbrauch nach Energieträgern wiederum nur leichte Veränderungen. Gekoppelt an die Stromerzeugung steigt die Fernwärmenutzung geringfügig an (+4 PJ in 2050) und auch die Nutzung von Erdgas wird leicht gesteigert (+2 PJ). Demgegenüber wird der Stromverbrauch reduziert (- 10 PJ), um die Strom-Autarkiebestrebungen zu unterstützen, und auch die direkte Nutzung erneuerbarer Energien durch die Endverbraucher sinkt (- 4 PJ), um zusätzliche Flächen bzw. Mengen für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien zur Verfügung zu haben.

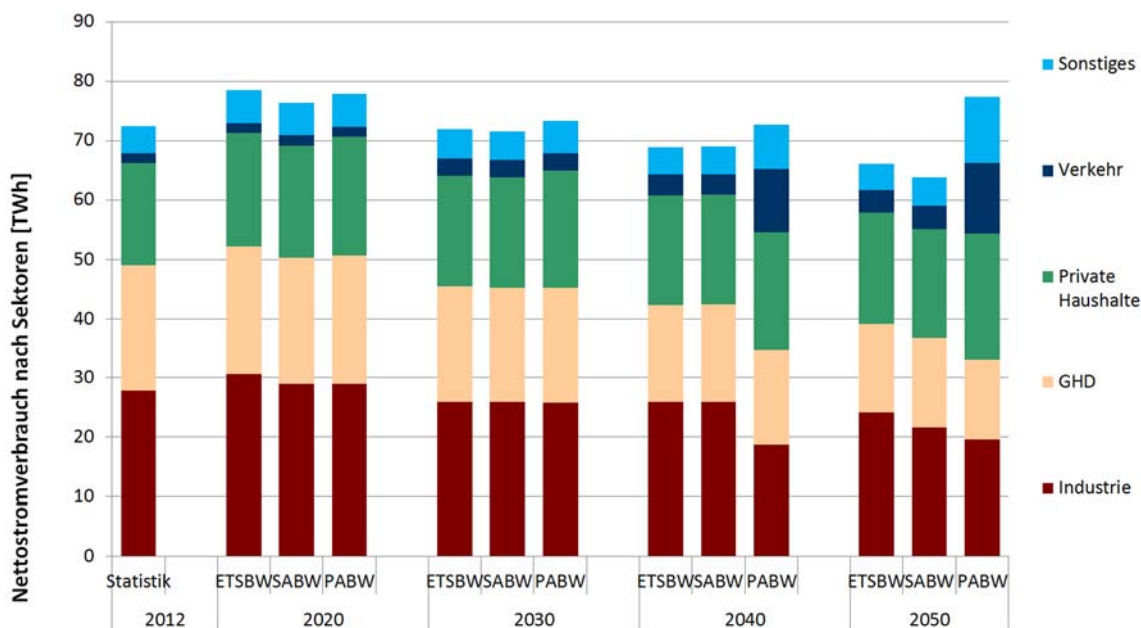
Der um bis zu 115 PJ verringerte Endenergieverbrauch des Szenarios Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW) im Vergleich zum Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW) äußert sich in einer geringeren Nutzung der Importenergieträger Mineralöle, Gase und Kohlen, die im Jahr 2050 mit 156,8 PJ nur noch einen Anteil von 23,8 % am Endenergieverbrauch in Baden-Württemberg aufweisen gegenüber 43,5 % im Basisszenario mit ETS-Zielen. Die Nutzung der Mineralölprodukte beschränkt sich auf einzelne Anwendungen im Verkehr, z. B. Luftverkehr oder Binnenschifffahrt, und in der Industrie, z. B. Chemische Industrie, die jeweils nur schwierig durch Alternativen substituierbar erscheinen. Das Verbrauchsniveau der Gase liegt nur noch bei 18,5 % des heutigen Wertes, auch hier zum Teil der Industrie, aber auch in anderen Wärmeanwendungen. Gestärkt wird vorübergehend die Nutzung der Fernwärme sowie über den gesamten Betrachtungszeitraum des Stroms und der erneuerbaren Energien. Während beim Strom der Zuwachs im Jahr 2050 im Szenario Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW) gegenüber dem Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW) bei 7,3 % (+16,2 PJ) liegt, sind bei den erneuerbaren Energien sowohl prozentual mit +40,1 % als auch absolut mit +56,3 PJ die Wachstumsraten deutlich höher. Hier erfolgt im Szenario Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW) insbesondere eine wesentlich stärkere Nutzung der Umweltwärme und der Solarthermie, die im Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW) kein starkes Wachstum aufweisen. Den Veränderungen beim Strombedarf liegen zwei gegenläufige Tendenzen zu Grunde. Während auch hier der rückläufige Heizenergiebedarf für einen Verbrauchsrückgang von Elektroheizungen sorgt, zeigen elektrisch betriebene Kälteanlagen, Wärmepumpen und die Elektromobilität eine gegenläufige, verbrauchsfördernde Tendenz.

### **3.4.2 Stromerzeugung und Kapazitäten in Baden-Württemberg**

Im Basisszenario, dem Szenario mit ETS-Zielen (ETSBW), steigt in Baden-Württemberg zwischen den Jahren 2012 und 2020 der Nettostromverbrauch anfangs an. Ausgehend von 72,5 TWh (2012) werden im Jahr 2020 im Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW) 78,6 TWh (+8,4%) Strom netto verbraucht (Abbildung 24). Anschließend zeichnet sich das Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW) durch einen gleichmäßigen Stromverbrauchsrückgang auf 66,1 TWh (-8,8 % gegenüber 2012) bis zum Jahr 2050 aus. Dieser Rückgang wird von den Sektoren Industrie, GHD und Haushalten getragen und durch einen leichten Ausbau der Elektromobilität nicht kompensiert.

Bei Berücksichtigung der Autarkiebestrebungen zeigen sich in der absoluten Höhe des Stromverbrauchs zwischen den betrachteten Szenarien deutliche Unterschiede. Während im Szenario Strom-autarkes Baden-Württemberg (SABW) das Stromverbrauchsniveau insgesamt und auch die sektoralen Stromverbräuche leicht niedriger liegen im Vergleich zum Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW), erfolgt im

Szenario Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW) im Zeitverlauf eine zunehmende Erhöhung des Stromeinsatzes. Dies ist auf die Entwicklung in zwei Sektoren zurückzuführen. Sowohl bei den privaten Haushalten als auch im Verkehr werden verstärkt Technologien genutzt, die Strom einsetzen, um fossile Energieträger, die importiert werden müssten, ersetzen zu können. Bei den privaten Haushalten sind dies Wärmepumpen und elektrisch betriebene Kälteanlagen, im Verkehr die Elektromobilität und Brennstoffzellenantriebe. Letztere werden über Wasserstoff betrieben, der über Elektrolyse bereitgestellt wird. Es ergibt sich ein Strommehrverbrauch von bis zu +17% (Szenario Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW) gegenüber Basisszenario mit ETS-Ziel (ETSBW)) durch Autarkiebestrebungen im Jahr 2050.



**Abbildung 24: Entwicklung des Nettostromverbrauchs nach Sektoren in Baden-Württemberg von 2012 bis 2050 (Vergleich der Autarkieszenarien (SABW, PABW) mit dem Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW))**

Die Nettostrombereitstellung in Baden-Württemberg fällt im Basisszenario, dem Szenario mit ETS-Zielen (ETSBW), entsprechend der Verbrauchsentwicklung bis 2050 auf 66,1 TWh ab (Abbildung 25). Der Ausstieg aus der Kernenergie führt zu einer weiteren Zunahme der Stromimportabhängigkeit in Baden-Württemberg. Dies bedeutet eine Zunahme des Importstromanteils von 24,4 % (2012) auf 32,1 % im Jahr 2020 im Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW). Danach bleiben die Nettostromimporte im Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW) bis 2050 ausgeprägt hoch.

Ohne eine Vorgabe hinsichtlich eines Mindestanteils der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien werden in Baden-Württemberg im Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW) Anteile von 38,5 % (2030) bis 47,5 % (2050) erreicht. Die überwiegende Rolle spielt dabei die Photovoltaik, gefolgt von der Wasserkraft, der Biomasse und der Windkraft. Der Ausbau der erneuerbaren Energien fängt damit einen Teil der in Baden-Württemberg durch den Kernenergieausstieg entfallenden Strommengen auf. Die verbleibenden Restmengen werden im Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW) vor allem anfangs durch Stromimporte gedeckt.

Die fossil basierte Stromerzeugung behält im Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW) weitestgehend ihre heutige Bedeutung bis zum Jahr 2030 bei. Ausgehend von 18,4 TWh im Jahr 2012 ergibt sich 2030



eine Nettostromerzeugung aus Steinkohle, Heizöl und Erdgas von 19,1 TWh. Im Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW) ist die Stromerzeugung aus Steinkohle trotz der neugebauten Kohlekraftwerke in Mannheim und Karlsruhe danach rückläufig und im Jahr 2050 nahezu kein Bestandteil des Erzeugungsmixes mehr, während im gleichen Zeitraum die Stromerzeugung aus Erdgas an Bedeutung gewinnt.

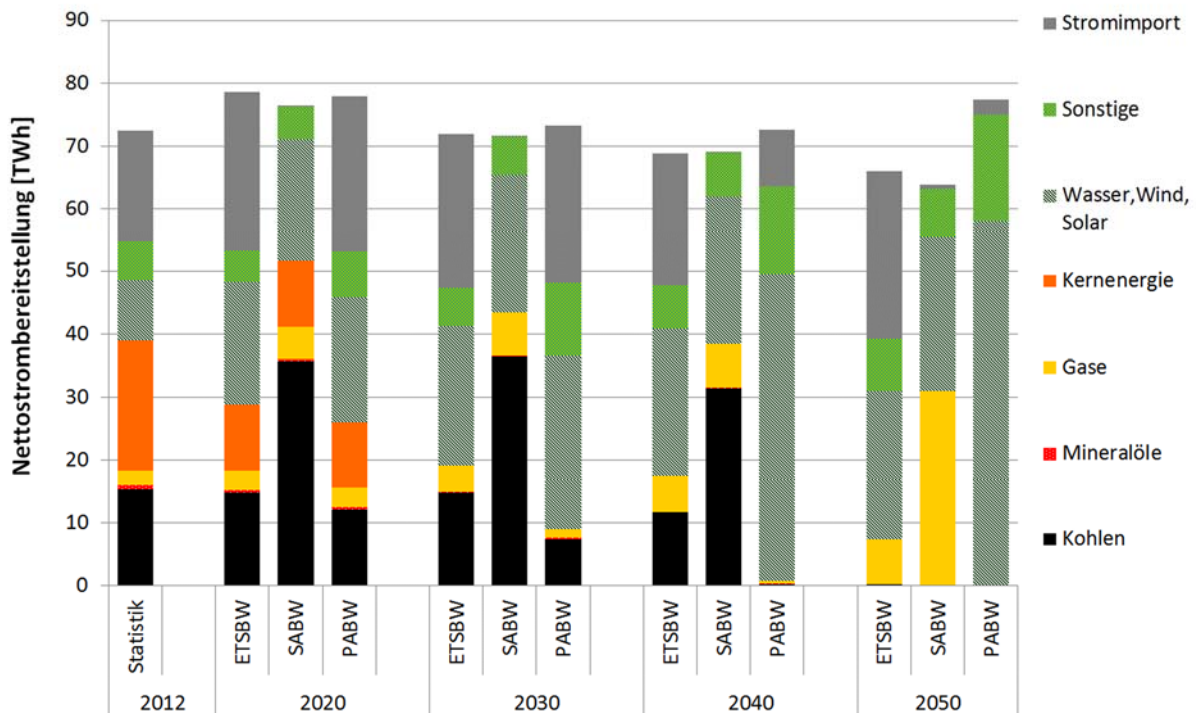


Abbildung 25: Entwicklung der Nettostrombereitstellung nach Energieträgern in Baden-Württemberg von 2012 bis 2050 (Vergleich der Autarkieszenarien (SABW, PABW) mit dem Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW))

Dieser Wandel ist zum einen bedingt durch die zu erfüllenden Treibhausgasminderungsvorgaben aus dem Europäischen Emissionshandelssystem (EU-ETS), zum anderen wird die fossile Stromerzeugung auch durch den Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien verdrängt.

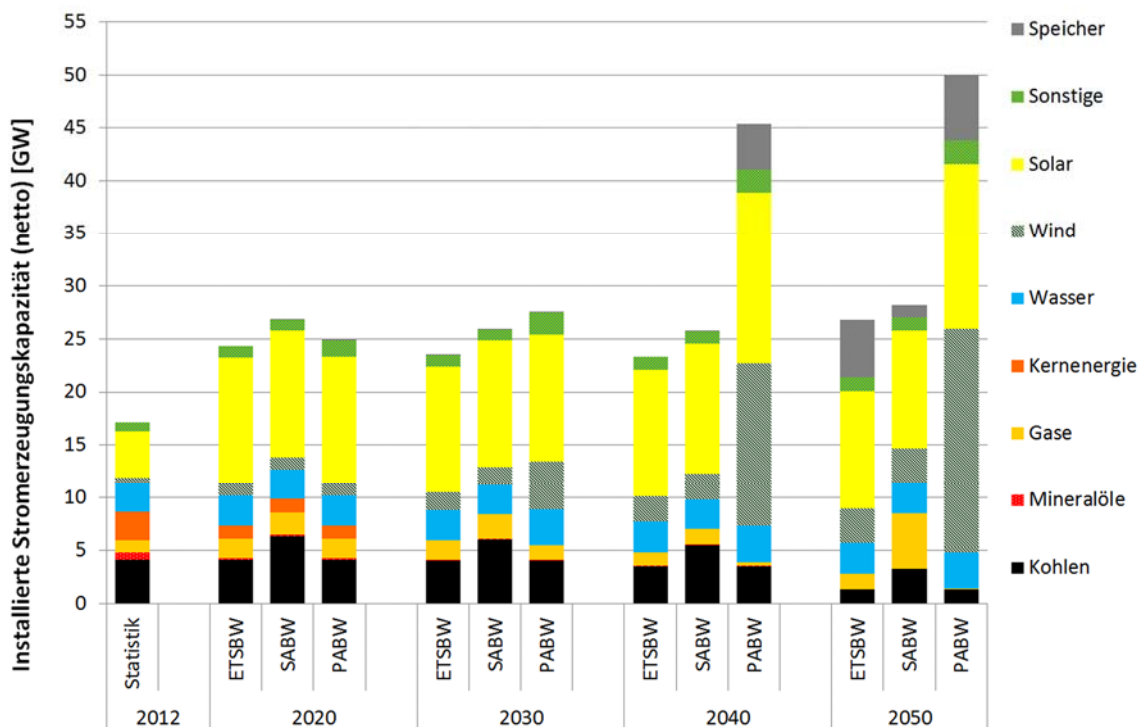
Der Anteil der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) an der Strombereitstellung steigt im Basisszenario, dem Szenario mit ETS-Zielen (ETSBW), bis 2020 auf 13,7 %. Im weiteren Verlauf setzt sich dieser Anstieg bis 2050 auf 18,0 % weiter fort. Daraus ergeben sich KWK-Strommengen in Höhe von etwa 11 bis 13 TWh in den Jahren 2020 bis 2050. Einer weiter verstärkten Nutzung von KWK-Anlagen zur kombinierten Strom- und Wärmeerzeugung steht wärmeseitig der reduzierte Fernwärmebedarf in den Verbrauchssektoren durch verbesserte Wärmedämmmaßnahmen an Gebäuden sowie der kostenintensive Leitungsbau zur Erschließung neuer Fernwärmeversorgungsgebiete entgegen.

Hinsichtlich der Auswirkungen der Autarkiebestrebungen zeigen sich im Szenario Strom-autarkes Baden-Württemberg (SABW) bei gegenüber dem Basisszenario mit ETS-Zielen nahezu unverändertem Niveau der Strombereitstellung vor allem strukturelle Verschiebungen zwischen dem Stromimport und der heimischen Stromerzeugung aus Steinkohle und aus Erdgas. Der Stromimport würde schon kurzfristig auf ein sehr niedriges Niveau zurückzufahren und durch die Stromerzeugung aus bestehenden und neu zubauenden Steinkohlekraftwerken zu ersetzen sein. Zum Ende des Betrachtungszeitraumes wird die Stromerzeugung aus Steinkohle durch die Stromerzeugung aus Erdgas substituiert, um dann den

schärfer werdenden Anforderungen des Europäischen Emissionshandelssystems (EU-ETS) gerecht werden zu können bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der Strom-Autarkie für Baden-Württemberg. Die Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien ist durch die Vorgaben des Szenarios Strom-autarkes Baden-Württemberg (SABW) gegenüber dem Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW) nahezu unbeeinflusst.

Anders verhält sich dies im Szenario Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW). Hier erfolgt ein sehr starker Ausbau der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien bis auf 72,9 TWh, was einem Anteil von 94,3 % an der Nettostrombereitstellung in Baden-Württemberg im Jahr 2050 entspricht. Aus Wasserkraft werden dann 9,5 TWh erzeugt, aus der Windkraft 34,0 TWh und über die Photovoltaik 14,5 TWh. Zudem wird auch die Nutzung der Geothermie zur Stromerzeugung ausgebaut, wodurch 6,0 TWh bereitgestellt werden können. Die weiteren Beiträge werden von sonstigen Energieträgern, z. B. Müll oder Stromspeichern, und über den Stromimport erbracht. Die Erhöhung der Primärenergie-Autarkie in Baden-Württemberg erfolgt hier zu Lasten der Erreichung einer möglichen Strom-Autarkie. Zuvor trägt der Stromimport noch über das Jahr 2030 hinaus im erheblichen Ausmaß zur Nettostrombereitstellung für Baden-Württemberg bei.

Die installierte Kraftwerksnettoleistung steigt im Basisszenario, dem Szenario mit ETS-Zielen (ETSBW), bedingt durch den starken Ausbau der Photovoltaik, von insgesamt 17,2 GW (2012) auf 24,4 GW in 2020 (Abbildung 26).



**Abbildung 26: Entwicklung der Installierten Nettoleistung der Stromerzeugung nach Energieträgern in Baden-Württemberg von 2012 bis 2050 (Vergleich der Autarkieszenarien (SABW, PABW) mit dem Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW))**

Im weiteren Zeitverlauf zeigt sich im Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW) ein moderater Ausbau der Windkraft auf 3,2 GW in 2050, bei geringfügigem Rückgang der Photovoltaikkapazitäten von 12 GW (2020) auf 11,2 GW (2050). Analog zur nach 2040 rückläufigen Stromerzeugung aus Steinkohle



werden hier keine weiteren Kapazitäten zugebaut. Die bestehenden Kapazitäten können im Energiesystem jedoch weiterhin Reserveleistung zur Verfügung stellen. Ohne Berücksichtigung der Stromspeicher ergibt sich im Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW) im Jahr 2050 eine in Baden-Württemberg installierte Nettoleistung in Höhe von 21,4 GW.

Die Berücksichtigung der Autarkiebestrebungen führt im Szenario Strom-autarkes Baden-Württemberg (SABW) hinsichtlich der installierten Leistungen gegenüber dem Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW) nur zu geringen Auswirkungen. Einflüsse zeigen sich hier nahezu ausnahmslos bei den Steinkohlekraftwerken (+2,2 GW in 2020 bzw. + 1,9 GW in 2050) sowie den Gaskraftwerken (+0,3 GW in 2020 bzw. +3,6 GW in 2050).

Das Szenario Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW) weist dagegen nach 2020 eine deutliche Steigerung der installierten Leistung auf. Ohne Berücksichtigung der Stromspeicher erfolgt hier ein Anstieg auf 43,8 GW bzw. eine Steigerung auf 255 % des Ausgangsniveaus im Jahr 2012. Treiber der starken Zunahme der Kraftwerksleistung im Szenario Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW) ist der Ausbau der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien, welche im Allgemeinen gegenüber fossilen Kraftwerken durch eine geringere jährliche Verfügbarkeit gekennzeichnet sind. Es erfolgt der Ausbau von Windkraftanlagen auf 21,1 GW bis 2050 sowie der Ausbau der Photovoltaik auf 15,6 GW bis 2050. Diese zwei Technologien stellen damit zusammen ca. 84 % der in 2050 in Baden-Württemberg installierten Erzeugungsleistung ohne bzw. rund 73 % bei Berücksichtigung der Stromspeicher. Im Szenario Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW) mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien an der installierten Nettoleistung dienen primär Wasserkraft, Biomasse- und Geothermiekraftwerke und Stromspeicher sowie noch in Betrieb befindliche Steinkohle- und Gaskraftwerke der Leistungsbereitstellung bei schwankender Einspeisung.

### **3.4.3 Primärenergieverbrauch in Baden-Württemberg**

Hinsichtlich des Primärenergieverbrauchs in Baden-Württemberg ist im Basisszenario, dem Szenario mit ETS-Zielen (ETSBW), ein kontinuierlicher Rückgang sichtbar (Abbildung 27). Ausgehend von 1.393 PJ in 2012 sinkt der Primärenergieverbrauch auf 1.135 PJ in 2030 sowie 897 PJ in 2050. Getragen wird dieser Rückgang einerseits durch den Ausstieg aus der Kernenergienutzung (Primärenergiefaktor 3) und durch die Umstellung auf erneuerbare Energien in der Stromerzeugung (Primärenergiefaktor 1 für Wasserkraft, Windkraft, Biomasse und Photovoltaik) sowie durch den allgemein rückläufigen Endenergieverbrauch durch die Nutzung effizienterer Technologien und Prozesse.

In den beiden Szenarien, die die Autarkiebestrebungen simulieren, sind im Niveau vergleichbare Entwicklungen zum Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW) zu konstatieren. Lediglich in der Struktur des Primärenergieverbrauchs zeigen sich im Szenarienvergleich Unterschiede. So dominieren im Jahr 2050 im Szenario Strom-autarkes Baden-Württemberg (SABW) die Mineralöle, die Gase und die Erneuerbaren Energien beim Primärenergieverbrauch. Eine noch stärkere Nutzung erfahren die Erneuerbaren Energien im Szenario Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW) zu Lasten des Primärenergieverbrauchs der Importenergieträger Mineralöle und Gase. Die Erneuerbaren Energien insgesamt tragen hier mit bis zu 74 % zum Primärenergieverbrauch in Baden-Württemberg bei. Weitaus ausgeglichener ist die Primärenergieverbrauchsstruktur im Jahr 2050 im Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW). Die Erneuerbaren Energien als bedeutendste Gruppe von Primärenergieträgern weisen einen Anteil von 40,4 % auf, gefolgt von den Mineralölen mit 25,5 %, den Gasen mit 22,0 % und dem Stromimport mit 10,8 %.

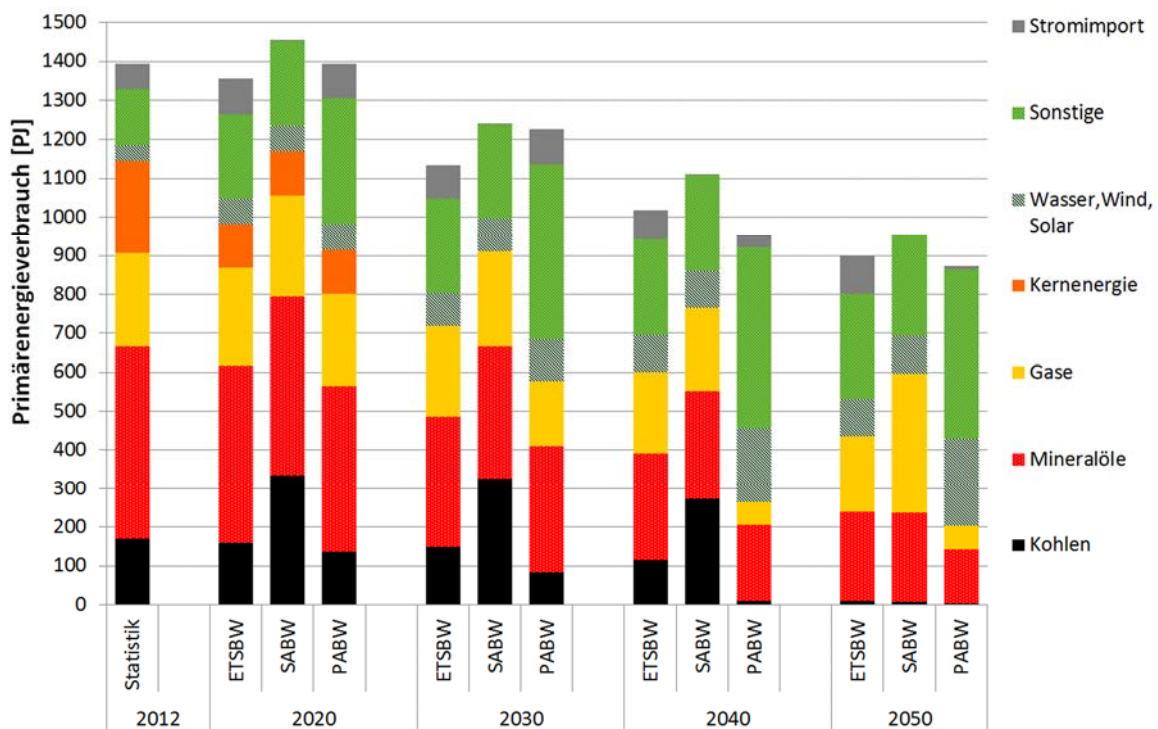


Abbildung 27: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs nach Energieträgern in Baden-Württemberg von 2012 bis 2050 (Vergleich der Autarkieszenarien (SABW, PABW) mit dem Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW))

Nach der detaillierten Betrachtung der energetischen Ergebnisse der verschiedenen Szenarien liefert Tabelle 12 eine Übersicht der für Baden-Württemberg erzielten Strom-Autarkiegrade und Primärenergie-Autarkiegrade.

Tabelle 12: Vergleich der Autarkiegrade der drei für Baden-Württemberg analysierten Szenarien

	2012	2020	2030	2040	2050
<b>ETSBW-Szenario: Stromautarkiegrad</b>	81,7 %	66,3 %	64,0 %	67,6 %	57,1 %
<b>ETSBW-Szenario: Primärenergieautarkiegrad</b>	12,2 %	19,0 %	27,0 %	31,5 %	38,8 %
<b>SABW-Szenario: Stromautarkiegrad</b>	81,7 %	100,0 %	99,9 %	99,9 %	99,0 %
<b>SABW-Szenario: Primärenergieautarkiegrad</b>	12,2 %	17,8 %	24,7 %	29,1 %	35,6 %
<b>PABW-Szenario: Stromautarkiegrad</b>	81,7 %	66,5 %	63,7 %	86,4 %	96,7 %
<b>PABW-Szenario: Primärenergieautarkiegrad</b>	12,2 %	26,2 %	43,6 %	66,9 %	74,7 %

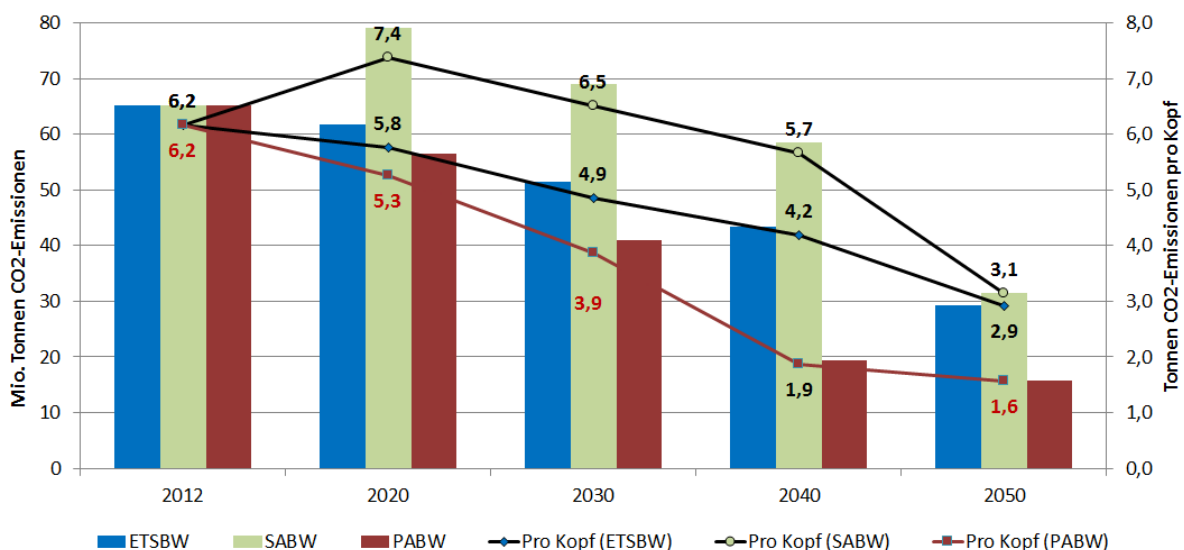
Zu erkennen ist dabei, dass ein hoher Strom-Autarkiegrad nicht automatisch auch einen hohen Primärenergie-Autarkiegrad zur Folge hat, da der Strombereich zwar einen relevanten Bestandteil des Energiesystems darstellt, die alleinige Betrachtung der Strom-Autarkie wie im Szenario Strom-autarkes Ba-

den-Württemberg (SABW) aber nicht gewährleistet, dass dies mit der Nutzung heimischer Energiequellen einhergeht. Anders herum führt eine Fokussierung auf die Primärenergie-Autarkie wie im Szenario Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW) dazu, dass auch im Strombereich ein hoher Anteil der Strombereitstellung aus heimischen Erneuerbaren Energiequellen erfolgt. Teilweise wird jedoch auch eine Verringerung des Strom-Autarkiegrades in Kauf genommen, um eine weitere Erhöhung des Primärenergie-Autarkiegrades erreichen zu können. Dies zeigt die Bedeutung einer generelleren Betrachtung der Autarkie thematik inklusive der Bereiche Wärme und Mobilität.

### 3.4.4 CO<sub>2</sub>-Emissionen und Systemkosten in Baden-Württemberg

Gemäß den Annahmen für die Szenarioanalysen ist für alle drei betrachteten Szenarien ein europaweites Klimaschutzregime unterstellt. Hier haben die im Emissionshandel eingeschlossenen Sektoren eine Reduktion ihrer Treibhausgase gegenüber 1990 um 30 % bis 2020 und um 80 % bis 2050 zu erreichen. Die Verteilung der Emissionsreduktionen auf die EU-Mitgliedsstaaten ist dabei ebenso offen wie die Aufteilung der Minderungspflichten zwischen den Sektoren.

In Baden-Württemberg nehmen die CO<sub>2</sub>-Emissionen in allen drei betrachteten Szenarien kontinuierlich ab. Je nach Szenario liegt der Rückgang gegenüber 1990 zwischen 16,3 % (Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW)) und 23,5 % (Szenario Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW)) in 2020 und zwischen 60,2 % (Szenario mit ETS-Zielen (ETSBW)) und 78,6 % (Szenario Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW)) in 2050 (Abbildung 28).

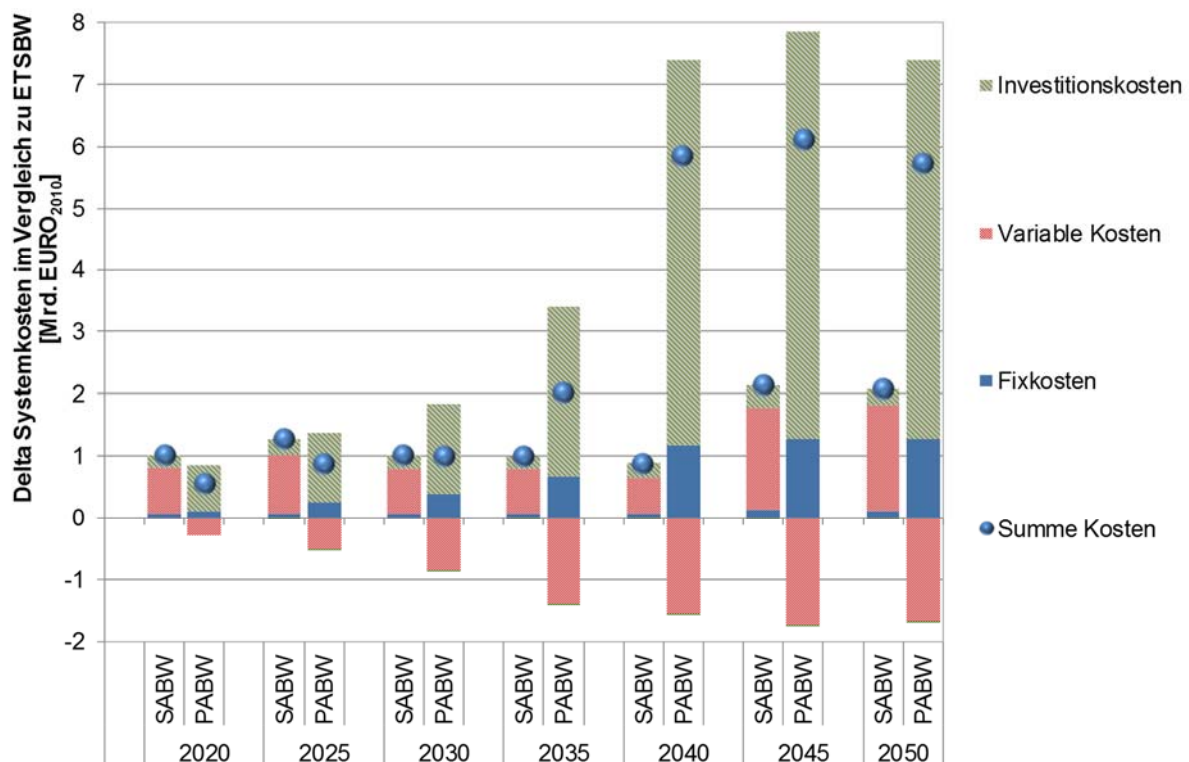


**Abbildung 28: Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Baden-Württemberg von 2012 bis 2050 (Vergleich der Autarkieszenarien (SABW, PABW) mit dem Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW))**

Das Szenario Strom-autarkes Baden-Württemberg (SABW) zeigt eine zwischenzeitliche Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Baden-Württemberg durch die verstärkte heimische Stromerzeugung in Steinkohle- und Gaskraftwerken. Dies erfolgt jedoch in Einklang mit den Vorgaben des Europäischen Emissionshandelssystems (EU-ETS), so dass die höheren Emissionen in Baden-Württemberg durch eine Minderung an anderer Stelle innerhalb Europas ausgeglichen werden. Mit der Umstellung der fossilen Stromerzeugung auf Gas- statt auf Kohlekraftwerke zum Ende des Betrachtungszeitraums gleichen sich die

CO<sub>2</sub>-Emissionen des Szenarios Strom-autarkes Baden-Württemberg (SABW) dem Niveau des Basis-szenarios mit ETS-Zielen (ETSBW) an. Über den gesamten Betrachtungszeitraum am niedrigsten liegen im Vergleich der drei Szenarien die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Szenarios Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg. Hier werden fossile, CO<sub>2</sub>-behaftete Importenergieträger durch heimische Erneuerbare Energien ersetzt, so dass das Emissionsniveau auf 15,8 Mio. t CO<sub>2</sub> in 2050 sinkt. Die resultierende Minderung um 78,6 % gegenüber dem Basisjahr 1990 liegt im Bereich der für Deutschland geforderten Minderungsziele von 80 bis 95 % Minderung bis zum Jahr 2050.

Die in dieser Untersuchung ausgewiesenen Systemkosten repräsentieren die in einem Zeitraum und in einer Region für das gesamte Energiesystem aufzubringenden Kosten, welche sowohl Kapitalkosten für Anlagen der Energieumwandlung und des Energietransportes als auch Kosten für Wartung und Betrieb der Anlagen sowie Brennstoff- und Zertifikatskosten umfassen. In Abbildung 29 dargestellt wird jeweils die Systemkostendifferenz eines Szenarios im Vergleich zum Basisszenario, dem Szenario mit ETS-Zielen (ETSBW), so dass negative Kostendifferenzen als Kostenreduktion bzw. Kostenentlastung interpretiert werden können und positive Kostendifferenzen als Mehrkosten bzw. Kostenbelastungen zur Erreichung bestimmter Autarkiegrade.



**Abbildung 29: Jährliche Differenzkosten der Autarkieszenarien (SABW, PABW) gegenüber dem Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW) in Baden-Württemberg**

Hinsichtlich der kostenseitigen Auswirkungen der Autarkiebestrebungen können im Szenario Strom-autarkes Baden-Württemberg (SABW) geringfügigere Kostensteigerungen zum Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW) beobachtet werden, die aber auch bis zu 2,1 Mrd. €<sub>2010</sub> pro Jahr, d. h. bis zu 200 €<sub>2010</sub> pro Kopf und Jahr, erreichen. Die Einsparungen durch den verringerten Stromimport werden überkompensiert durch zu tätige Investitionen in neue Kraftwerke sowie insbesondere durch den zu finanzierenden Brennstoffeinsatz in den in Baden-Württemberg installierten Kraftwerken. Kumuliert über den

gesamten Betrachtungszeitraum weist das Szenario Strom-autarkes Baden-Württemberg (SABW) gegenüber dem Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW) (nicht-abdiskontierte) Zusatzbelastungen von rund 46 Mrd. €<sub>2010</sub> auf.

Die kostenseitigen Auswirkungen sind im Szenario Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW) im Vergleich zum Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW) deutlich ausgeprägter. Die notwendige Investition in neue Technologien und Anwendungen im Bundesland Baden-Württemberg und die damit verbundenen höheren fixen Betriebskosten können durch die Einsparungen bei den Kosten für die zu importierenden Brennstoffen nicht kompensiert werden. Die Zusatzkosten belaufen sich auf bis zu 6,1 Mrd. €<sub>2010</sub> pro Jahr, d. h. bis zu 580 €<sub>2010</sub> pro Kopf und Jahr. Kumuliert über den gesamten Betrachtungszeitraum weist das Szenario Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW) gegenüber dem Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW) (nicht-abdiskontierte) Zusatzbelastungen von nahezu 100 Mrd. €<sub>2010</sub> auf.

### 3.5 Stromnetzberechnungen

In einem ersten Schritt wurden das oben beschriebene Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW) und ausgehend davon die oben beschriebenen Autarkieszenarien (SABW bzw. PABW) mit dem PTFD Stromnetzmodellansatz (Abschnitt 2.3.4) modelliert und berechnet. Abbildung 30 zeigt die Stromerzeugung (links) und die resultierenden Leistungsflüsse (rechts) im Ausgangszustand im Jahr 2012. Dargestellt ist in den Kreisdiagrammen auf der linken Kreisebene die zu diesem Zeitpunkt am Netz befindliche Erzeugungsleistung, auf der rechten Halbebene die Stromnachfrage in der jeweiligen Regelzone. Sind die Radien gleich groß, bedeutet dies, dass die Last einer Regelzone durch deren stromerzeugende Anlagen bilanziell gedeckt werden kann. Die rechte Bildhälfte zeigt die Auslastung der einzelnen Leitungen in Baden-Württemberg. Grün gekennzeichnete Leitungen können als dabei tendenziell als unkritisch betrachtet werden, Leitungen mit einer Auslastung über 50 % weisen hingegen auf kritische Betriebszustände hin. Zu hohe Auslastungen können die Einhaltung des (n-1)-Kriteriums gefährden, wonach ein sicherer Betrieb des Netzes auch bei Ausfall eines Betriebsmittels, beispielsweise einer Leitung, gegeben sein muss. Exakte Aussagen zum Einfluss einzelner Leitungsauslastungen auf die Netzsicherheit können jedoch nur (n-1)-Sicherheitsrechnungen liefern.

Die Stromerzeugung ist im Ausgangszustand, wie in Abschnitt 2.3.4 beschrieben, geprägt durch eine hohe Einspeisung von Strom aus Windenergieanlagen im Norden Deutschlands. Die residuale Lastdeckung wird zum großen Teil durch Kernkraftwerke im Süden und Westen, sowie Braunkohlekraftwerke im Westen und Osten erbracht. Gleichzeitig ist die Last in der TransnetBW Regelzone und in der Amprion Regelzone größer als die jeweilige innerhalb der Regelzone erbrachte Leistung, weshalb Strom importiert wird. Die Situation in der TenneT Regelzone stellt sich als ausgeglichen dar, wogegen die Stromerzeugung in der 50Hertz Regelzone die Last übersteigt. Diese Last- und Erzeugungssituation ist charakteristisch für eine durch hohe Einspeisung aus erneuerbaren Energien-Anlagen geprägten Netzzustand.

Für Baden-Württemberg ergibt sich damit ein Import von Strom, der hier hauptsächlich aus der Regelzone der TenneT stattfindet. Die beiden Leitungen im nord-östlichen Baden-Württemberg sind dementsprechend durch eine hohe Auslastung gekennzeichnet. Weiterhin findet ein Stromexport in die Schweiz und Österreich statt, weshalb die Grenzkuppelleitungen entsprechend hohe Auslastungen zeigen. Die TransnetBW Regezone tritt in dieser Netzsituation somit auch als Transitzone für den deutschen Stromexport in die südlichen Nachbarländer auf.

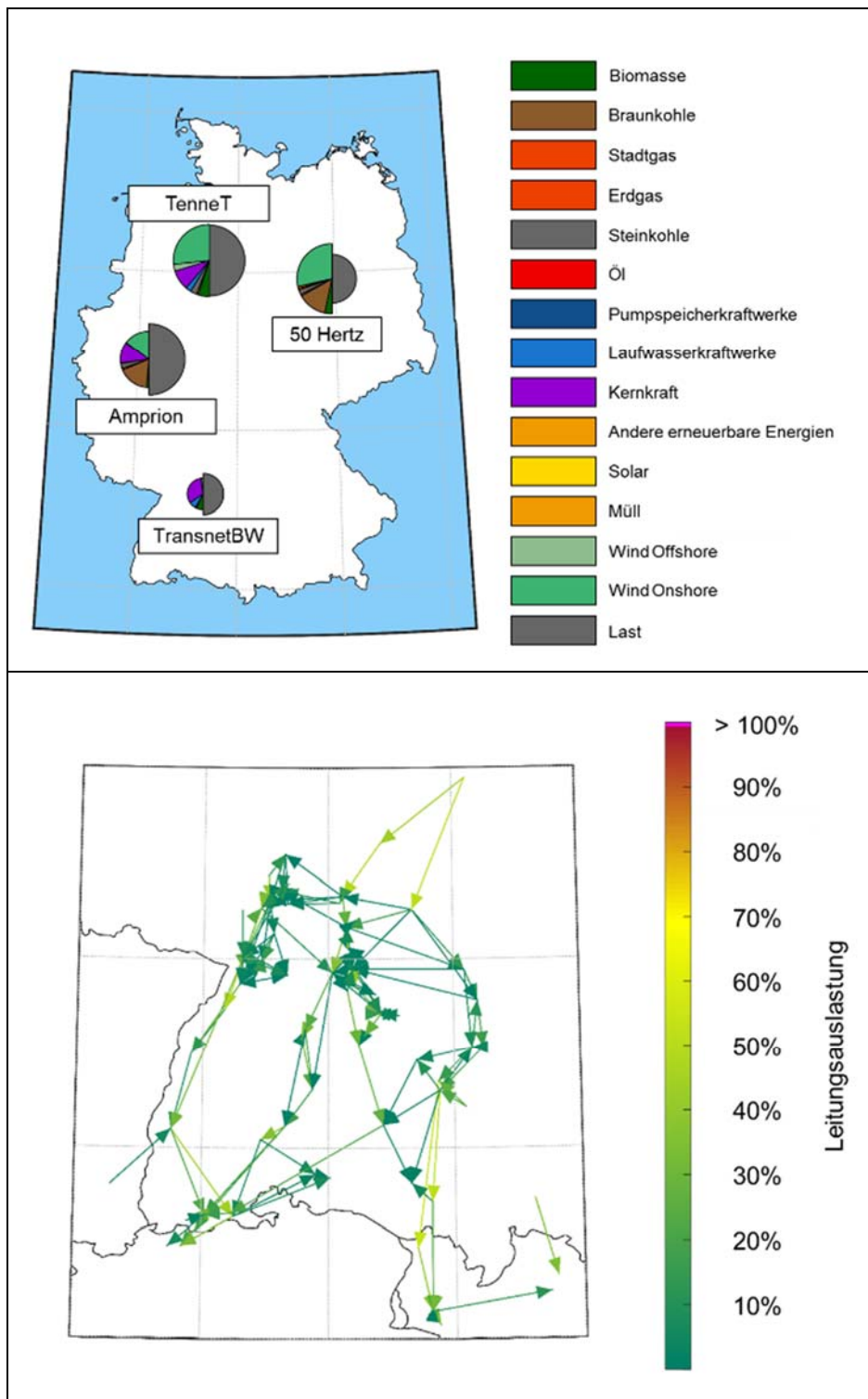
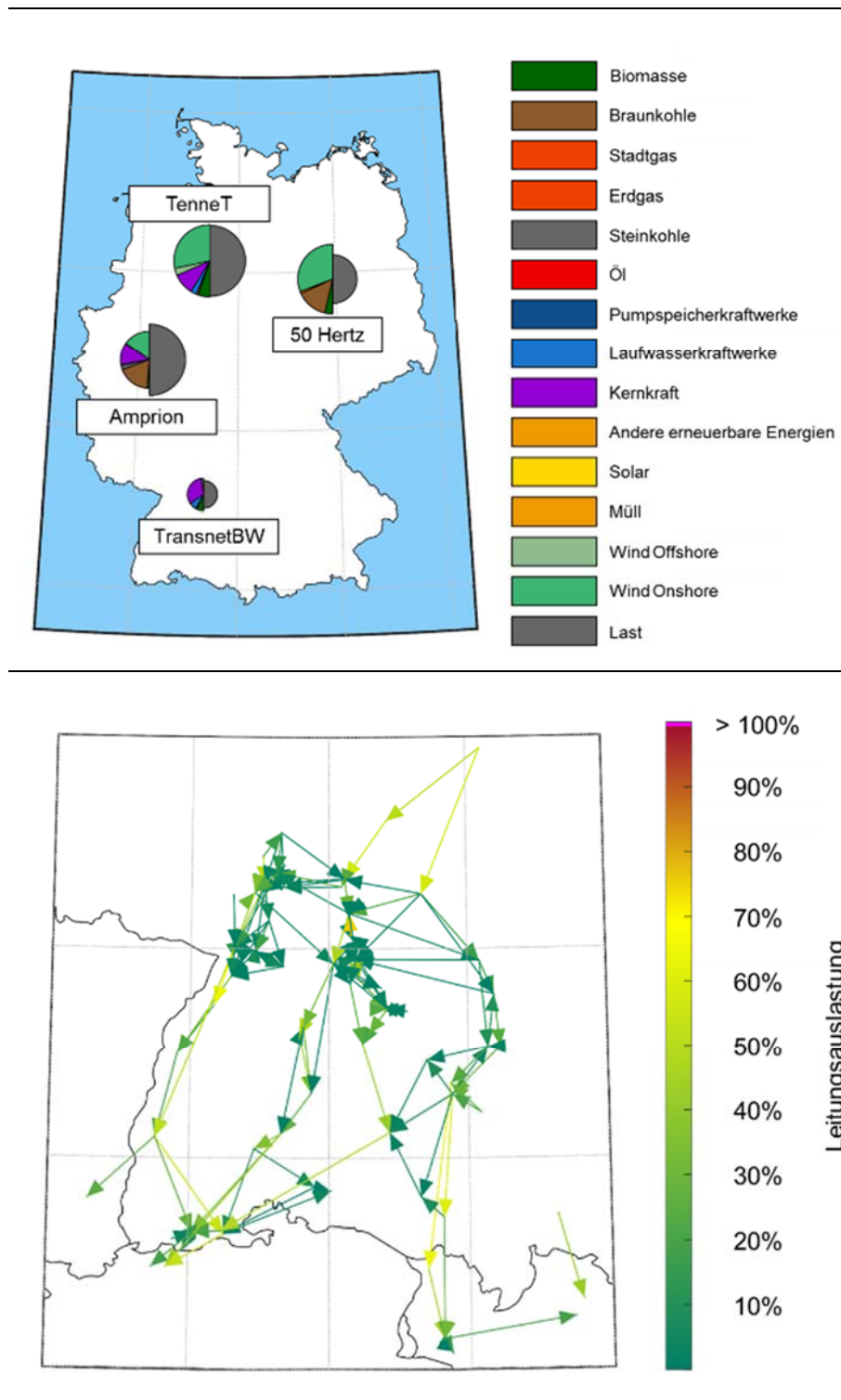


Abbildung 30: Stromerzeugung und Leistungsflüsse im Ausgangszustand 2012



Abbildung 31 zeigt die Stromerzeugungs- und Leistungsflusssituation für das fiktive Leistungsautarkieszenario 50 % Teilautarkie, Abbildung 32 bei 100 % Vollautarkie.



**Abbildung 31: Stromerzeugung und Leistungsflüsse bei 50 % Leistungsautarkie**

Unter der Annahme hoher Stromautarkiegrade in Baden-Württemberg verändern sich die Erzeugungssituation im deutschen Marktgebiet und damit auch die Leistungsflüsse zwischen bzw. innerhalb der Regelzonen. Die um 50 % reduzierte Last in der Regelzone der TransnetBW ist in Abbildung 31 oben

zu erkennen. Entsprechend wurde die Stromerzeugung durch in der Merit-Order teuer platzierter Kraftwerke im Szenario verringert. Dabei handelt es sich um Gas-, Öl-, Steinkohle- und Braunkohlekraftwerke vornehmlich in den Regelzonen von TenneT, Amprion und 50Hertz. Dadurch erhöhen sich die Leitungsauslastungen auf den bereits im Grundszenario stark ausgelasteten Leitungen teilweise erheblich und nehmen Werte von bis zu 70 % an. Die verringerte Nachfrage in Baden-Württemberg bewirkt einen erhöhten Transit in die Nachbarländer bei gleichzeitig steigendem Stromimport aus der TenneT Regelzone. Bemerkenswert ist zudem die vormals Strom importierende Grenzkuppelleitung nach Frankreich, die nun bei erhöhter Auslastung Strom exportiert.

Die Situation verschärft sich abermals bei Betrachtung einer Leistungsautarkie von 100 %, wie dies auch im Szenario Strom-autarkes Baden-Württemberg (SABW) unterstellt wurde, dargestellt in Abbildung 32.

Bei Betrachtung der Stromerzeugung in diesem Szenario ist zu erkennen, dass in Baden-Württemberg kein Strom mehr aus der Hochspannungsebene bezogen wird und sich die konventionelle Erzeugung deutschlandweit weiter reduziert. Hinsichtlich der Leistungsflüsse ergeben sich nun zunehmend unzulässige Leitungsauslastungen innerhalb der TransnetBW Regelzone und im Vergleich zum Teilautarkieszenario zusätzlich ein Stromexport in die Amprion Regelzone.

Somit sind aus Sicht der Stromübertragung im Übertragungsnetz bezüglich großer Autarkiebestrebungen ohne zusätzlichen Netzausbau und bei unverändertem Kraftwerkspark sicherheitstechnische Probleme im Netzbetrieb nicht ausgeschlossen. Die Ergebnisse haben jedoch lediglich tendenzielle Aussagekraft, da solch hohe Autarkiegrade mittelfristig nicht zu erwarten sind und den Untersuchungen der aktuelle Kraftwerkspark sowie die heutige Netztopologie zugrunde liegen. Außerdem könnten die Pumpspeicherwerke, die in das Netz der TransnetBW einspeisen, zusätzlich ihre Leistung reduzieren, um die Netzsituation zu entschärfen. Sollten die Veränderungen in der elektrischen Energieversorgung jedoch in die Richtung gehen, dass großflächige Gebiete in Baden-Württemberg stromautark werden könnten, muss dies in den Planungen zum zukünftigen Netzausbau zwingend berücksichtigt werden. Dies gilt auch, wenn die Stromautarkie nur gelegentlich auftritt, da für den Netzbetrieb die momentane Situation entscheidend ist.

### **3.6 Ökologisches Gesamtmodell für Baden-Württemberg**

Zunächst werden die ökobilanziellen Ergebnisse des Energiesystems Baden-Württemberg in Hinblick auf die Stromversorgung dargestellt. In Abbildung 33 wird das Treibhauspotenzial (GWP) zur Bereitstellung von 1 kWh Strom der untersuchten Szenarien für Baden-Württemberg verglichen.



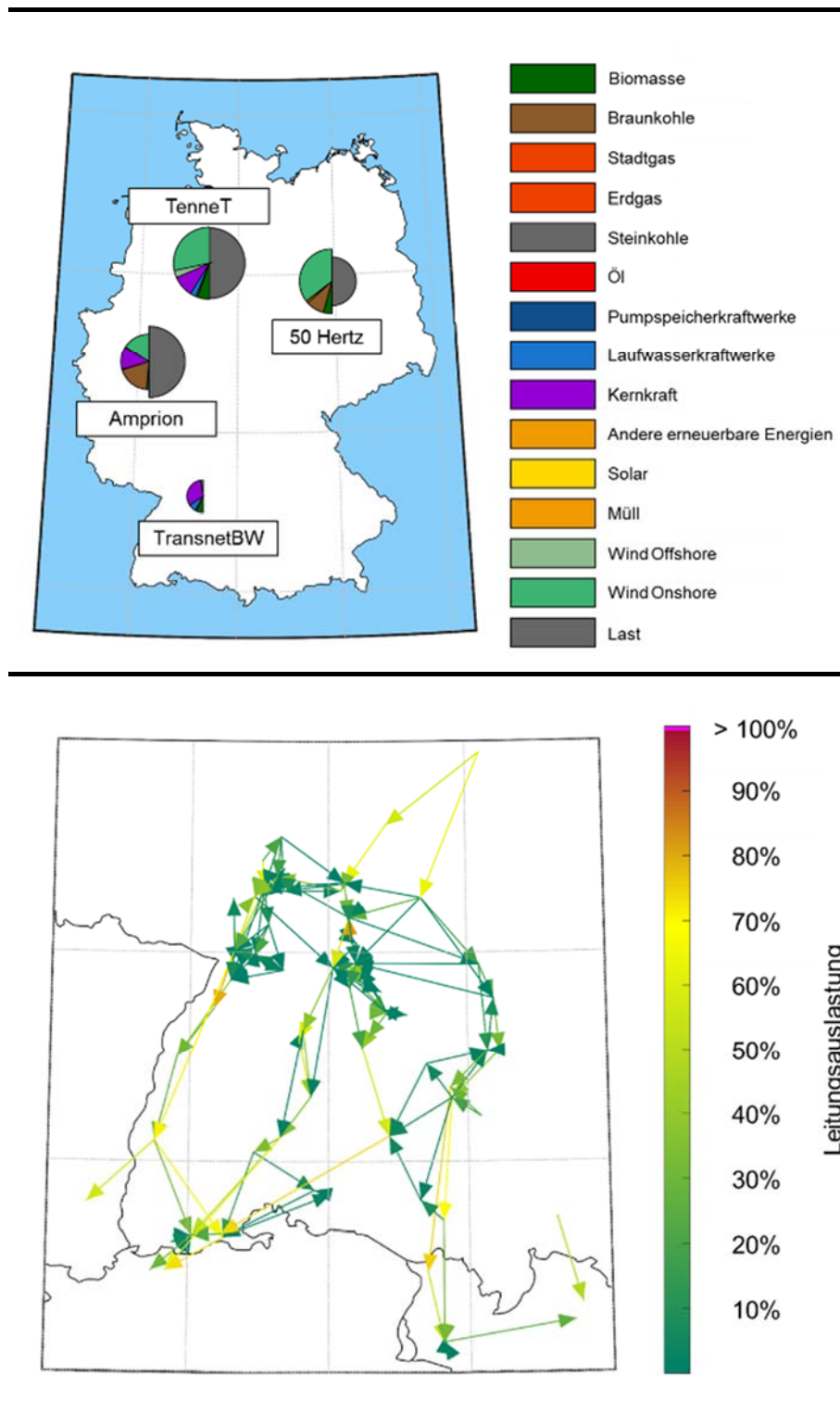
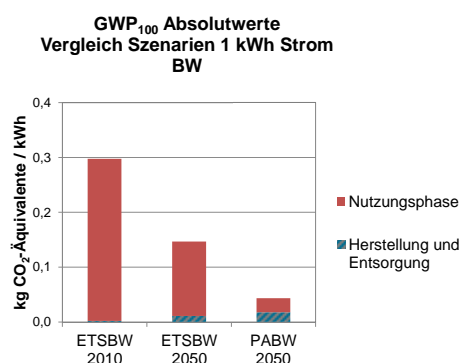


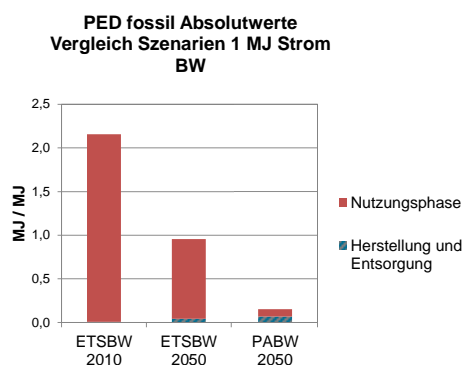
Abbildung 32: Stromerzeugung und Leistungsflüsse bei 100 % Leistungsautarkie



**Abbildung 33: Vergleich der Szenarien für Baden-Württemberg für die Bereitstellung von 1 kWh Strom in der Wirkungskategorie Treibhauspotenzial (GWP)**

Es wird deutlich, dass sich die Umweltwirkungen, die auf die Bereitstellung von 1 kWh Strom zurückzuführen sind, im Vergleich zum betrachteten Referenzzustand 2010 (ETSBW 2010) in den untersuchten Szenarien deutlich verringern. Durch die Erhöhung des Autarkiegrades werden durch die Stromerzeugung im Vergleich zum Referenzzustand ETSBW 2010 bis zu 86 % weniger klimawirksame Emissionen emittiert. Die Relevanz der Herstellung und Entsorgung steigt stark an. Bis zu 40 % des Umweltprofils ist bei den Autarkieszenarien Baden-Württembergs auf die Herstellung und Entsorgung zurückzuführen. Zukünftig kann eine Dynamisierung der Hintergrundmodelle dazu beitragen, die notwendigen Vorketten noch besser in die Betrachtung zu integrieren. Gerade bei höherer Relevanz von Herstellung und Entsorgung ist eine noch spezifischere Abbildung der dort anzusetzenden Strommixe zielführend.

Abbildung 34 zeigt den Vergleich des fossilen Primärenergiebedarfs (PED) der Szenarien. Es zeigt sich, dass mit steigendem Autarkiegrad der Verbrauch fossiler Energieträger um bis zu 90 % reduziert werden kann. Zudem werden die Herstellung und Entsorgung analog zur Wirkungskategorie Treibhauspotenzial (GWP) immer dominanter. Das Szenario Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW) erreicht in 2050 einen Faktor eines Einsatzes von 0,15 MJ fossiler Energie für die Gewinnung von 1 MJ Endenergie in Form von Strom.



**Abbildung 34: Vergleich der Szenarien für Baden-Württemberg für die Bereitstellung von 1 kWh Strom in der Kategorie fossiler Primärenergiebedarf (PED)**

Neben der Untersuchung von Treibhauspotenzial (GWP) und fossilem Primärenergiebedarf (PED) ist auch die Darstellung weiterer Umweltwirkungskategorien relevant für die Energiesystemanalyse. Im Technologieatlas wird für die untersuchten Schwerpunkttechnologien ein breiteres Spektrum an Umweltprofilen analysiert (Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, 2016). Bei-

spielhaft wird in Abbildung 35 das Photochemische Oxidantienbildungspotenzial (POCP) dargestellt, das den Beitrag von lokalen Emissionen, z. B. NO<sub>x</sub> oder CO, zur Bildung von Sommersmog abbildet.

Durch den wachsenden Anteil an erneuerbaren Energien am Energiesystem kann das Photochemische Oxidantienbildungspotenzial (POCP) um rund 50 % reduziert werden. Die im Vergleich zum Treibhauspotenzial (GWP) geringeren Reduktionspotenziale erklären sich aus der größeren Relevanz, die die untersuchten Technologien zur Nutzung Erneuerbarer Energien in dieser Wirkungskategorie aufzeigen. Hier sind besonders Biogas sowie Photovoltaik zu nennen. Analog zum Treibhauspotenzial (GWP) und fossilen Primärenergiebedarf (PED) steigt die Relevanz von Herstellung und Entsorgung an. Im Vergleich zu den später im Kapitel 4.6 vorgestellten Ergebnissen für den Bilanzraum Metzingen ist die Relevanz der Nutzungsphase für den Bilanzraum Baden-Württemberg höher, da im Vergleich zu Metzingen sowohl der Anteil an Strom aus Biomasse- und Biogaskraftwerken (mit lokal wirkenden Verbrennungsemissionen) höher ist. Gleichzeitig ist der Anteil von Strom aus PV-Anlagen, die eine aufwändigere Herstellung als Windkraftanlagen aufweisen, niedriger, was zusätzlich zu einer geringeren Bedeutung von Herstellung und Entsorgung führt (Held, et al., 2011; Held, 2010).

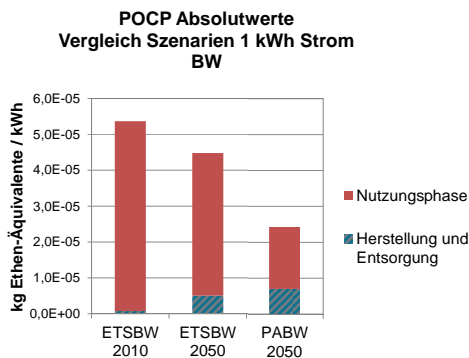


Abbildung 35: Vergleich der Szenarien für Baden-Württemberg für die Bereitstellung von 1 kWh Strom in der Wirkungskategorie Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP)

Im Referenzzustand ETSBW 2010 ist ein erheblicher Anteil von fossilen Energieträgern im Einsatz (Abbildung 34). Wie Abbildung 36 zeigt, sind hier vor allem Steinkohle und Kernenergie relevant und tragen auch entsprechend zum Treibhauspotenzial (GWP) (Steinkohle) und zum fossilen Primärenergiebedarf (PED) (Steinkohle und hauptsächlich Kernenergie) bei. Zusätzlich trägt auch der Import nach Baden-Württemberg deutlich zu den Ergebnissen bei. Diese werden hauptsächlich vom restlichen Deutschland und aus Frankreich bereitgestellt, so dass auch diese Importe von fossilen Energieträgern geprägt sind und entsprechend in die Auswertungen einfließen.

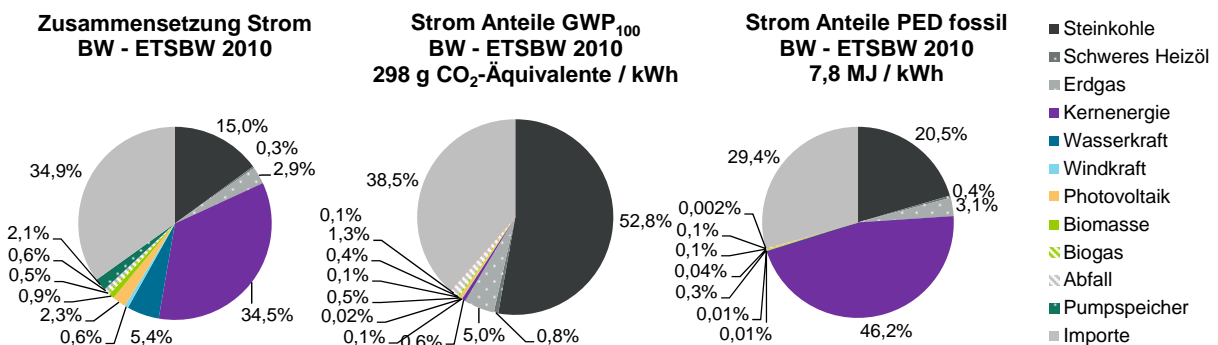


Abbildung 36: Gegenüberstellung der Anteile der Energieträger an der Stromerzeugung und ihre Anteile an den Umweltwirkungen für Baden-Württemberg im Referenzzustand ETSBW 2010

Mit steigendem Autarkiegrad steigt der Anteil der erneuerbaren Energien am Energiesystem. In Abbildung 37 zeigt sich allerdings, dass sich der Anteil der Stromimporte im Szenario mit ETS-Zielen (ETSBW) nicht verringert. Diese sind fossil basiert und vor allem durch den knapp 50 %-igen französischen Anteil nuklear basiert, was sich auch am Anteil der Importe am fossilen Primärenergiebedarf widerspiegelt. Der für die Importe angenommene zukünftige Importmix wurde dabei entsprechend der TIMES PanEU-BW-Modellergebnisse spezifisch modelliert, und die Umweltprofile der Stromerzeugungsmixe der Importländer der aktuellen GaBi-Datenbank (PE-International in Zusammenarbeit mit der Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Bauphysik, 2012) entnommen. Im Szenario mit ETS-Zielen (ETSBW) tragen in 2050 auch Pumpspeicherkraftwerke zur Stromerzeugung bei, der Anteil an Speichertechnologien steigt in den folgenden Szenarien weiter an.

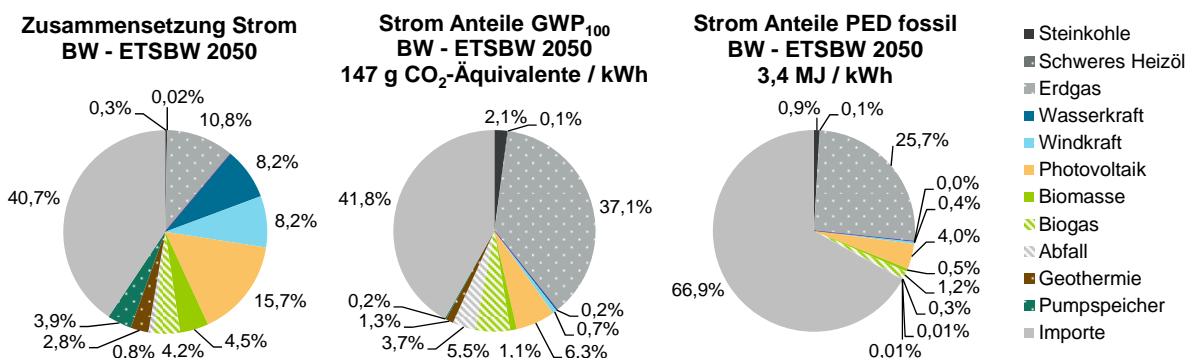


Abbildung 37: Gegenüberstellung der Anteile der Energieträger an der Stromerzeugung und ihre Anteile an den Umweltwirkungen für Baden-Württemberg im Szenario mit ETS-Zielen (ETSBW) in 2050

Abbildung 38 zeigt die Ergebnisse für das Szenario Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW) in 2050. Das baden-württembergische Energiesystem ist in diesem Szenario nur noch auf einen sehr geringen Stromimportanteil angewiesen, der einen Großteil des fossilen Primärenergiebedarfs verursacht. Innerhalb von Baden-Württemberg wird der Strom auf Basis Erneuerbarer Energien gewonnen. Wie bereits angeführt, unterscheiden sich die dabei beitragenden Technologien in ihren Umweltprofilen. So trägt beispielsweise die Windkraft zu fast 50 % zur Strombereitstellung bei, aber ihre Anteile am Treibhauspotenzial (GWP) und dem fossilen Primärenergiebedarf (PED) liegen nur bei knapp 13 %. Dominierender sind, wie bereits angeführt, die Importe beim Primärenergiebedarf, sowie Biogas und Abfallverbrennung bei den Treibhausgasemissionen.

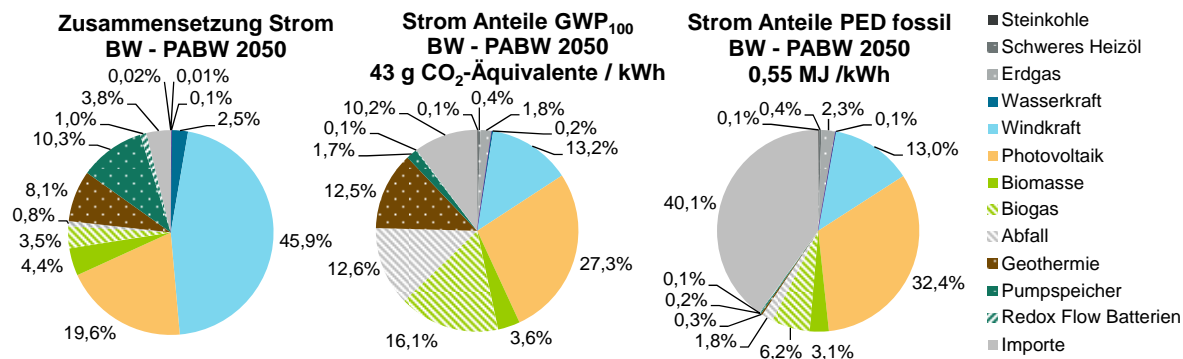


Abbildung 38: Gegenüberstellung der Anteile der Energieträger an der Stromerzeugung und ihre Anteile an den Umweltwirkungen für Baden-Württemberg im Szenario Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW) in 2050

Beim Vergleich der Ergebnisse des Bilanzraums Baden-Württemberg mit den später in Kapitel 4.6 vorgestellten Ergebnissen des Bilanzraums Metzingen wird deutlich, dass der größere Bilanzraum Baden-Württemberg auf ein diversifizierteres Energiesystem angewiesen ist. Im kleineren Bilanzraum Metzingen dominiert in den untersuchten Szenarien klar die Stromerzeugung aus PV, während in Baden-Württemberg im Szenario Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW) neben einem großen Anteil von Windkraft (knapp 50 %) noch einige weitere Energieträger im System existieren.

Im untersuchten Fall erweist sich das diversifiziertere System Baden-Württembergs mit nur 43 g emittierten CO<sub>2</sub> Äquivalenten pro kWh Strom im Vergleich zu 47 g emittierten CO<sub>2</sub> Äquivalenten pro kWh Strom für Metzingen in der Wirkungskategorie Treibhauspotenzial (GWP) als ökologisch leicht vorteilhaft. Ähnlich zeichnet sich der fossile Primärenergiebedarf mit 0,55 MJ Einsatz pro kWh Strom im Vergleich zu 0,7 MJ Einsatz als günstiger ab. In der Wirkungskategorie Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP), die u. a. den Beitrag von Emissionen zu lokalem Sommersmog abbildet, ist der Unterschied der Ergebnisse vernachlässigbar klein.

Potenziell auftretenden Abweichungen zu anderen offiziellen Daten zu Treibhausgasemissionen der Strombereitstellung in Baden-Württemberg können durch verschiedene Faktoren zustande kommen. Zum einen wurden Industriekraftwerke, welche Strom für den Eigenverbrauch der Industrie bereitstellen, nicht mit berücksichtigt. Die ökobilanzielle Untersuchung betrachtet nur die öffentliche Versorgung. Zusätzlich wurde bei der Modellierung eine Allokation der Umweltwirkungen nach Marktpreisen vorgenommen, die Abweichungen gegenüber auf anderen Allokationsmethoden basierenden Ergebnissen mit sich bringen kann. Zudem wurde in der Modellierung der Anteil der KWK-Anlagen entsprechend dem Deutschlandmix eingestellt. Weiterhin wurden bei der Modellierung Datensätze aus der GaBi-Daten verwendet, deren Wirkungsgrade sich zum einen auf Gesamtdeutschland beziehen, zum anderen teilweise auf Literaturdaten basieren, sodass auch hier eine Abweichung gegenüber den Daten des Statistischen Landesamts Baden-Württemberg vorliegt. Da aber für die Modellierung der Energiemixe der Zukunftsszenarien die gleiche Datenbasis wie für den Referenzzustand ETSBW 2010 verwendet wurde, liefert ein Vergleich nichtsdestotrotz aussagekräftige Ergebnisse.

Die Bereitstellung von Wärme in Baden-Württemberg wurde ebenfalls ökobilanziell untersucht. Abbildung 39 zeigt den potenziellen Beitrag, der in den verschiedenen Szenarien jeweils zum Klimawandel geleistet wird, um 1 kWh Wärme bereitzustellen. Es zeigt sich ein sehr hohes Reduktionspotenzial von bis zu 82 % der klimawirksamen Emissionen. Die Dominanz der Nutzungsphase bei den Ergebnissen der untersuchten Kategorien lässt sich durch die Verknüpfung von Wärmeerzeugung und Strombereitstellung erklären. Wie in Abbildung 43 bis Abbildung 45 zu sehen ist, ist der Anteil an Technologien, die einen relevanten Strombedarf haben, bei der untersuchten Wärmeversorgung relativ groß. Das Umweltprofil des jeweiligen Strommix ist somit sehr relevant.

Ähnlich stellen sich die Ergebnisse auch in Abbildung 40 dar. Das Reduktionspotenzial des fossilen Primärenergiebedarfs (PED) beträgt 71 %, die Nutzungsphase ist mit mindestens 98 % Anteil am Verbrauch klar dominierend. Bei der Untersuchung des photochemischen Oxidantienbildungspotenzials (POCP) zeigt sich in Abbildung 41 im Szenario Energiewende Baden-Württemberg (EWBW) für 2050 der geringste potenzielle Beitrag zum Sommersmog.

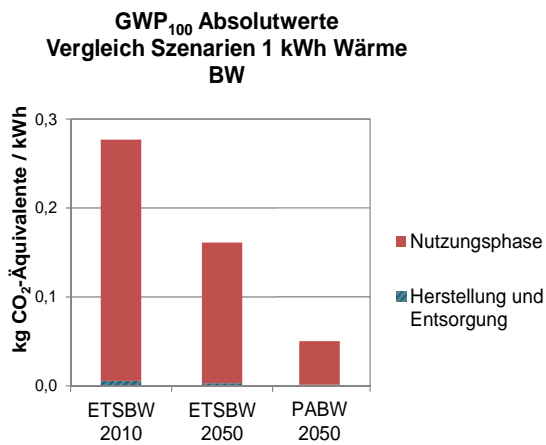


Abbildung 39: Vergleich der Szenarien für Baden-Württemberg für die Bereitstellung von 1 kWh Wärme in der Wirkungskategorie Treibhauspotenzial (GWP)

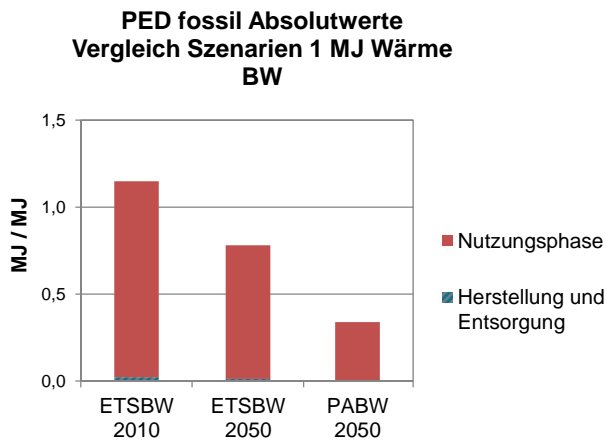


Abbildung 40: Vergleich der Szenarien für Baden-Württemberg für die Bereitstellung von 1 kWh Wärme in der Kategorie fossiler Primärenergiebedarf (PED)

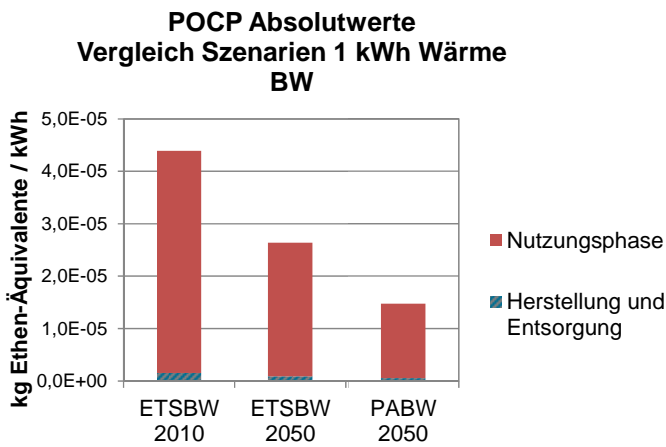


Abbildung 41: Vergleich der Szenarien für Baden-Württemberg für die Bereitstellung von 1 kWh Wärme in der Wirkungskategorie Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP)

Das bilanzierte Wärmesystem besteht aus den Komponenten Fernwärme und gebäudeintegrierte Heizungssysteme. Um den Einfluss der Zusammensetzung der Fernwärmeversorgung nachvollziehen zu können, stellt Abbildung 42 den jeweiligen Versorgungsmix der Fernwärmebereitstellung der betrachteten Szenarien dar. Mit einem wachsenden Anteil an Technologien, die auf Erneuerbaren Energien beruhen, wird das Umweltprofil entsprechend beeinflusst.

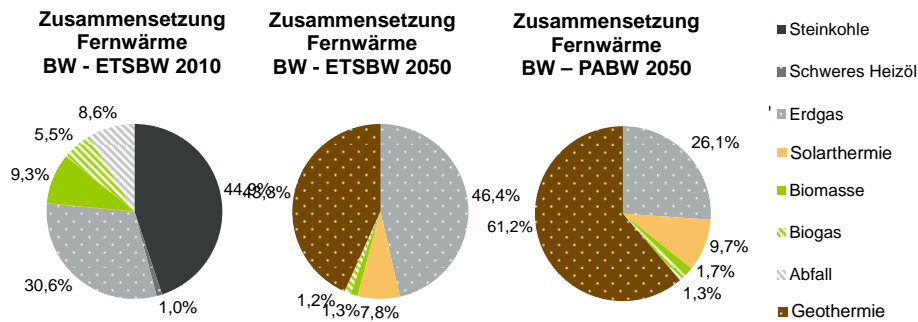


Abbildung 42: Zusammensetzung der Fernwärmeerzeugung in den verschiedenen Szenarien von Baden Württemberg

In Abbildung 43 wird der Referenzzustand für Baden-Württemberg (ETSBW 2010) dargestellt. Die Zusammensetzung der Heizungstechnologien wird stark von Öl- und Gas-Niederdruck-temperaturkesseln dominiert. Auch das Umweltprofil wird signifikant von diesen beiden Beiträgern beeinflusst. Der zu großen Teilen fossil basierte Fernwärmemix trägt entsprechend seinen Beitrag zur Zusammensetzung zu den Umweltprofilen bei.

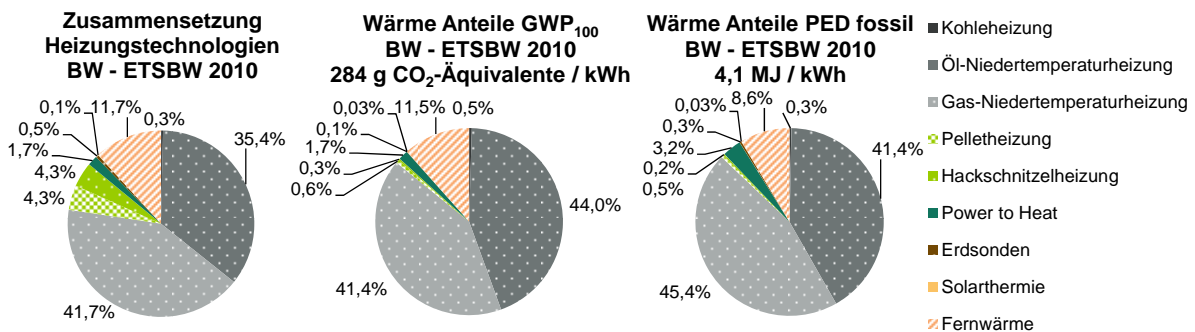
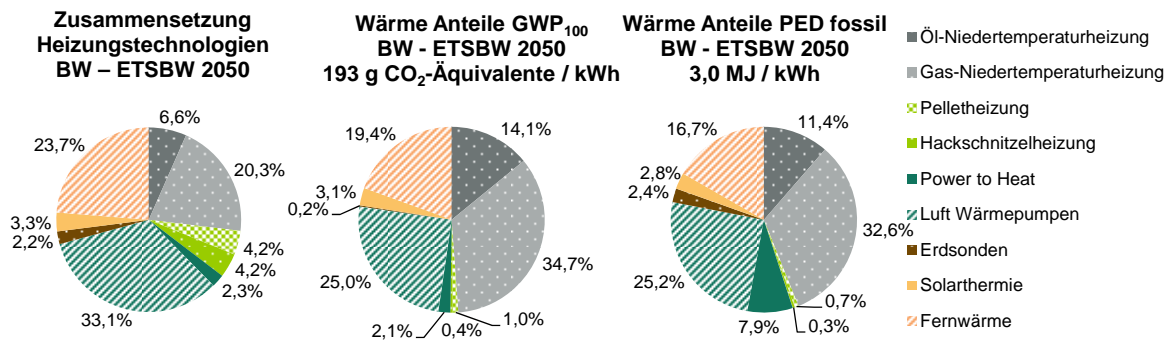


Abbildung 43: Gegenüberstellung der Anteile der Energieträger an der Wärmeerzeugung und ihre Anteile an den Umweltwirkungen für Baden-Württemberg im Referenzzustand ETSBW 2010

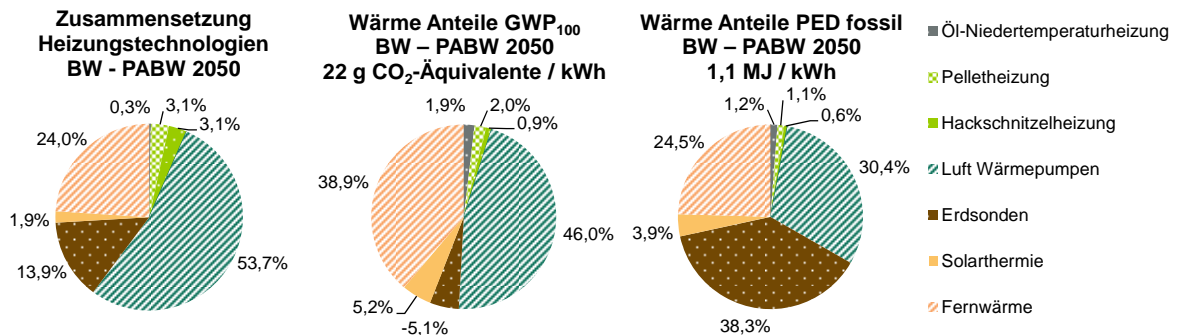
Abbildung 44 zeigt eine Diversifizierung der Zusammensetzung im Szenario mit ETS-Zielen für Baden-Württemberg (ETSBW) in 2050 auf. Neben einem Zuwachs an Fernwärme, die zudem deutlich weniger fossil basiert ist, steigt vor allem der Anteil der Luft-Wärmepumpen an. Entsprechend der Zusammensetzung gestalten sich auch die Anteile an den Umweltprofilen, wobei die fossilbasierten Öl- und Gasheizungen das Treibhauspotenzial (GWP) und den fossilen Primärenergiebedarf (PED) zu knapp 50 % dominieren. Auffällig ist der große Beitrag zum Primärenergiebedarf des geringen Power-to-Heat Anteils am Mix. Dieser ist auf das entsprechende Stromprofil (vgl. Abbildung 37) zurückzuführen das fossil- und nuklearbasiert ist. Die absoluten Ergebnisse reduzieren sich im Vergleich zum Jahr 2010 (ETSBW 2010) deutlich.





**Abbildung 44: Gegenüberstellung der Anteile der Energieträger an der Wärmeerzeugung und ihre Anteile an den Umweltwirkungen für Baden-Württemberg im Szenario mit ETS-Zielen (ETSBW) in 2050**

Das Wärmesystem für das Szenario Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW) ist in Abbildung 45 dargestellt. Entsprechend dem hohen Anteil an Technologien, die auf Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien basieren, weisen die absoluten Ergebnisse in Hinblick auf den Primärenergiebedarf ein sehr effizientes System aus. Auch der Beitrag zum Klimawandel ist mit 22 g CO<sub>2</sub> Äquivalenten pro zur Verfügung gestellter kWh Wärme sehr gering. In diesem Szenario dominieren Luft-Wärmepumpen den Wärmemix und auch das Treibhauspotenzial (GWP). Durch die wiederum notwendige Gastherme ist der Anteil der Erdsonden am Primärenergieverbrauch überproportional zum Anteil am Wärmemix.



**Abbildung 45: Gegenüberstellung der Anteile der Energieträger an der Wärmeerzeugung und ihre Anteile an den Umweltwirkungen für Baden-Württemberg im Szenario Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW) in 2050**

Für den Bilanzraum Baden-Württemberg dominieren in der Wärmeerzeugung Technologien, die auf Erneuerbaren Energien basieren, wenn sie auch zu Teilen auf konventionelle fossil basierte Unterstützung angewiesen sind. Durch die Verknüpfung der Wärmebereitstellung mit dem Umweltprofil der Stromerzeugung profitiert der Bilanzraum Baden-Württemberg zudem, sodass im Szenario Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW) in 2050 nur der Einsatz von 0,3 MJ fossiler Primärenergie notwendig ist, um 1 MJ Wärme zu gewinnen.



## 4 Fallstudie Metzingen

### 4.1 Ist-Situation und Potenziale erneuerbarer Energien

Beginnend bei der Nachfrageseite wurden die sektorübergreifenden Energiebedarfe für die Untersuchungsregion Metzingen ermittelt. Im Rahmen der Erstellung einer detaillierten Energiebilanz für Metzingen wurde für das Jahr 2012 eine Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz auf Basis von Sekundärinformationen (Stadtwerke Metzingen, Landkreis Reutlingen, Stadt Metzingen, Statistisches Landesamt u. a.) (Statistisches Bundesamt Destatis, 2015; Bragagnolo, et al., Januar 2009) sowie von Primärerhebungen über Fragebögen erarbeitet. Die Nachfrage für Strom, Wärme und Mobilität wurde den einzelnen Energieträgern Kohle, Heizöl, Erdgas, Strom und Kraftstoffen und den Sektoren Industrie, Gewerbe/Handel/Dienstleistungen sowie private Haushalte, öffentliche Liegenschaften und Verkehr zugeordnet und deren Emissionen bestimmt.

Für die Bestimmung der Emissionsbilanz wurde Ansatz der endenergiebasierten Territorialbilanz angewandt. Die endenergiebasierte Territorialbilanz berücksichtigt alle im betrachteten Bilanzraum anfallenden Endenergieverbräuche, inklusive der jeweiligen Strombezüge und der damit einhergehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen. Der Endverbraucher wird dabei energetisch ganzheitlich betrachtet. Der außerhalb des Territoriums auftretende Energieverbrauch Endenergieverbrauch der Bewohner (z. B. im Verkehr) wird an dieser Stelle nicht bilanziert. Abbildung 46 stellt die Endenergienachfrage für Metzingen im Jahr 2012 dar. Die daraus resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen sind in Abbildung 47 aufgeführt.

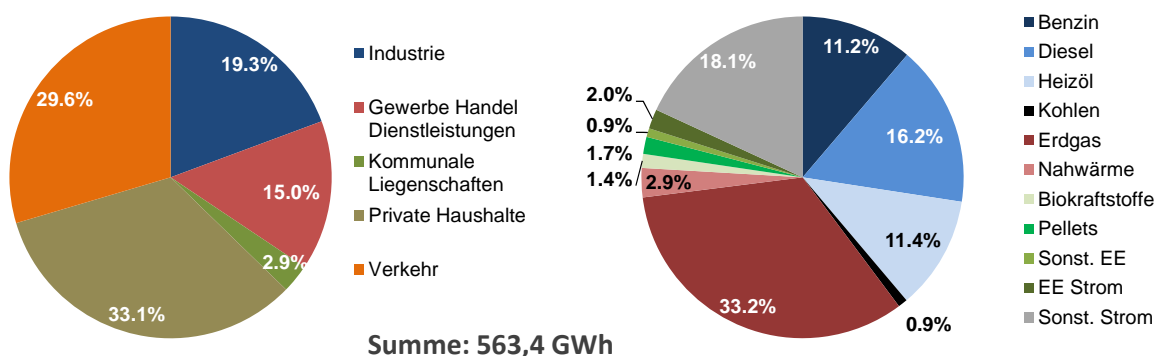


Abbildung 46: Anteile der endenergiebasierten Territorialbilanz für Metzingen im Jahr 2012

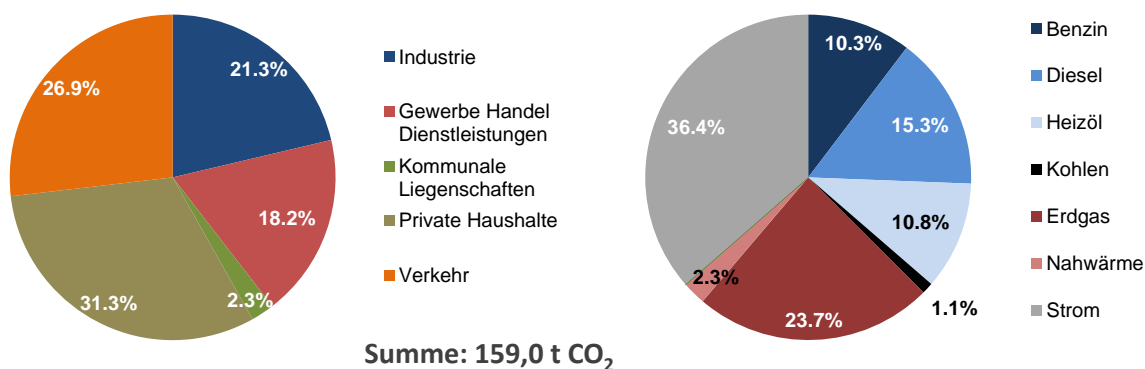
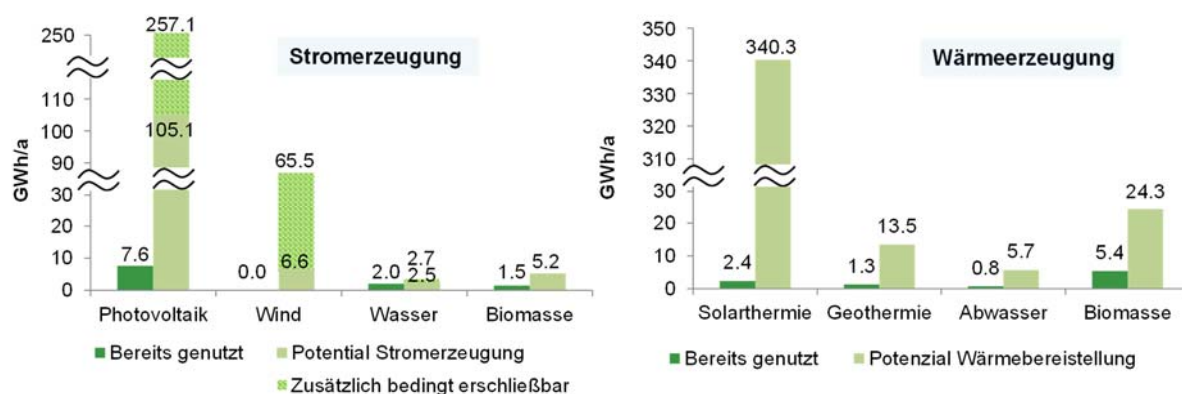


Abbildung 47: Anteile der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf Basis der endenergiebasierten Territorialbilanz für Metzingen im Jahr 2012

Der sich im Basisjahr resultierende bilanzielle Energie-Autarkiegrad ergibt sich aus den lokal gewonnenen Energien (aus Solarthermie, Umwelt- und Erdwärme, PV, Wasser, Kläranlage) bezogen auf den Endenergiebedarf in 2012. Für 2012 resultiert für Metzingen ein Energie-Autarkiegrad von 2,8 %. Stromseitig war der Bilanzraum Metzingen in 2012 zu 9,5 % bilanziell autark. Ein Großteil der Strom-eigengewinnung ist auf die PV (7,6 GWh) und die Wasserkraft (2,0 GWh) zurückzuführen.

Wichtig für die potenzielle Erreichung einer Energie-Autarkie in Metzingen sind neben der Energieeffizienzpotenziale die möglichen Beiträge der Erneuerbaren Energien. Zur Abschätzung wurden auf Basis eines Geoinformationssystems (GIS) die Potenziale Erneuerbarer Energien für die Beispielmunicipal Metzingen ermittelt. Dabei werden in einem ersten Schritt die Potenziale Erneuerbarer Energien jeweils bezüglich der Endnutzung für Strom bzw. für Wärme zugeordnet. Abbildung 48 stellt eine Übersicht der Potenziale in Metzingen dar.



**Abbildung 48: Potenziale Erneuerbarer Energien und bereits erfolgte Nutzung von Erneuerbaren Energien im Jahr 2012 in Metzingen**

Für die Photovoltaik und Solarthermie wurden die zu Verfügung stehenden Dach- und Freiflächen mit der jeweiligen Dachneigung und der Solareinstrahlung in Metzingen gekoppelt. Zusätzlich wurde in einer Detailbetrachtung das Potenzial von Lärmschutzwällen entlang von Bundesstraßen innerhalb der Gemarkung von Metzingen ermittelt. Das bedingt erschließbare Potenzial ergibt sich im Falle der Photovoltaik auf Basis eines Zubaus der verfügbaren Dach- und Freiflächen mit Gallium-Arsenid Modulen (GaAs). Deren Entwicklung befindet sich zum Zeitpunkt der Veröffentlichung des vorliegenden Berichtes noch im Laborstadium, jedoch wird die Technologie aufgrund der deutlichen Ertragsteigerung und der damit verbundenen Potenzialverschiebung in die zukünftig verfügbaren Potenziale aufgenommen. Die gemeinsame Nutzung von PV und Solarthermie auf den gegebenen Flächen ist nicht zugelassen, daher schließt sich eine gleichzeitige Ausschöpfung der gesamten solaren Potenziale zur Strom- und Wärmeerzeugung aus. Für die Berechnung der Potenziale von Solarthermie wurde eine Wärmegewinnung auf Basis von Vakuumröhren angenommen. Das Windpotenzial basiert auf dem Energieatlas der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Landesanstalt für Umwelt, 2014) sowie einer Potenzialstudie des Ingenieurbüros Fritz (Fritz Technik GmbH & Co. KG, März 2014). Das bedingt erschließbare Windpotenzial schließt dabei die eingeschränkt nutzbaren Flächen in Metzingen ein. Ebenfalls die Wasserpotenziale wurden dem Potenzialatlas Erneuerbaren Energien der LUBW entnommen (Landesanstalt für Umwelt, 2014).

Die maximal nutzbare Wärme aus dem Abwasser basiert auf einer Detailanalyse der Abwasser-Wärmenutzung des Abwassersammlers Ermstal (Frank, 2012). Die Nutzung des kumulierten Potenzials aus

Wasserkraft zur Stromerzeugung und aus dem Abwasser zur Wärmerückgewinnung schließen sich nicht gegenseitig aus. Das Potenzial der Erdwärme resultiert aus dem theoretischen Zubau von Erdwärmepumpen und der Erschließung von Tiefengeothermie zur Thermalwassernutzung in Metzingen (Fritz Technik GmbH & Co. KG, März 2014; Arbeitskreis Klima und Energie Metzingen, 2005). Für die Biomasse-Potenziale wurden die zu Verfügung stehenden landwirtschaftlichen Flächen und deren energetische Nutzung sowie eine im Vorfeld entstandene Potenzialstudie verwendet. Auch für die Biomasse gilt, die Erschließbarkeit des kumulierten Potenzials aus Biomasse zur Stromerzeugung und Wärmege-  
winnung ist möglich.

Die Potenziale erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung betragen, unter Vernachlässigung der bedingt erschließbaren Potenziale kumuliert 119,4 GWh/a. Dies entspricht 105 % der Stromnachfrage in Metzingen in 2012. Zusätzlich beträgt das Gesamtpotenzial der Erneuerbaren zur Wärmebereitstellung summiert 383,8 GWh/a. Diesem Ertrag steht ein Wärmebedarf (Endenergie) von 340,3 GWh in 2012 gegenüber. Zu beachten ist jedoch, dass die gleichzeitige Nutzung der Solarenergie zur Strom- und Wärmege-  
winnung nicht möglich ist. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkung ist eine vollständige Energie-Autarkie (Strom und Wärme) in Metzingen nicht möglich. Der maximale heutige Autarkiegrad beträgt 81 %. Dabei wird die Nutzung der Solarpotenziale aufgrund der höheren Wirkungsgrade der Solarthermie verglichen zur PV zur Wärmeerzeugung genutzt. Das restlich verfügbare Potenzial dient anschließend zur Deckung der Stromnachfrage. Erst die Realisierung der bedingt erschließbaren Potenzi-  
ale erlaubt aus technischer Sicht eine vollständige Energie-Autarkie des betrachteten Bilanzraumes.

## **4.2 Umsetzung der Bürgerbeteiligung in Metzingen: Bürgerumfrage und Bürgergutachten**

### **4.2.1 Bürgerumfrage**

Neben der Befragung von Stakeholdern auf lokaler- und Landesebene für die Einschätzung und Simulation von Szenarien war im Projektdesign auch die Bürgerbeteiligung vorgesehen und wurde durch eine Teilstudie des DLR realisiert. Damit leistet die vorliegende Studie eine umfassende Berücksichtigung der Soziotechnik zur Energiewende. Die Bürgerbeteiligung erfolgte über eine Umfrage, deren Teilnahme allen Bürgern offenstand sowie diskursive Verfahren (Bürger- und Jugendgutachten). Darin waren z. B. auch Mitglieder des AKE Metzingen vertreten, die auch als Stakeholder teilweise befragt wurden. Projektübergreifend ermöglichte die Bürgerbeteiligung auch die Evaluation der Technologiesteckbriefe zur Ökobilanz und brachte soziale Szenarien ein. Die Hinzunahme von Schülern und Jugendlichen ist eine weitere Innovation.

Folgende Zielsetzungen hatte die Bürgerumfrage als Startpunkt der Bürgerbeteiligung:

- (a) die Chance zur Beteiligung für alle interessierten Bürger, d.h. Durchführung als Vollerhebung
- (b) die Legitimation des Formates zur Bürgerbeteiligung auf Basis einer vorgegebenen Auswahl und möglichen Kombination von vier Beteiligungsformaten,
- (c) die konkrete Auswahl des Beteiligungsverfahrens und eventuelle Bereitschaft mitzuwirken,
- (d) eine verbesserte Datenbasis für technische Simulation durch Erfassung von Verbrauchsdaten, energetischen Gebäudedaten, individuellen Haushaltsausstattungen mit Energiegeräten und Einschätzungen zum zukünftigen Verbrauch,
- (e) sozialen Szenarien zentraler Ausbaupfade (qualitativ vs. quantitativ),
- (f) die Analyse soziologischer Erklärungsmodelle bzgl. Einstellungen und Verhaltensweisen zur Energiewende

Diese Vorgehensweise entsprach weitgehend dem Verfahren in Rottweil-Hausen (Pfenning, et al., 2008). Die Bürgerumfrage in Metzingen von Januar bis März 2015 wurde in der lokalen Presse und Amtsblatt durch Interviews, Artikel und Anzeigen bekannt gemacht. Sie war als Online-Fragebogen und in einer schriftlichen Version verfügbar. Die schriftlichen Exemplare wurden flächendeckend in Metzingen mit dem wöchentlich erscheinenden Amtsblatt an alle Haushalte verteilt und konnten bei den Stadtwerken, im Rathaus oder kostenlos via Post zurückgesandt werden. Von den ca. 10.000 Haushalten mit ca. 22.000 Einwohner/innen kamen letztlich 570 verwertbare Fragebögen zurück (davon 205 online). Dies entspricht einem Rücklauf von ca. 6 % der Haushalte in Metzingen mit ca. 1.400 Metzinger Bürger/innen als Haushaltsmitglieder. Statistisch ist die Fallzahl hinreichend für repräsentative Aussagen und statistische Analysen. Allerdings bedingen Verzerrungen für das Geschlecht (überproportionaler Anteil von Männern), das Alter (mehr ältere Personen), den Bildungsabschluss (höherer Anteil höherer, akademischer Bildungsabschlüsse), die Eigentumsverhältnisse an Immobilien (überdurchschnittlich hoher Anteil von Eigentümern gegenüber Mieter) eine Gewichtung (Tabelle 13). Neben soziodemographischen sind zudem auch technische Variablen hinsichtlich möglicher Verzerrungen zu überprüfen (installierte PV-Anlagen, doppelt so hoch wie im Schnitt). Referenzdaten sind die Angaben aus dem amtlichen Mikrozensus und Daten der Netzagentur.

Tabelle 13: Empirische Verteilungen und Gewichtung zentraler Variablen

<b>Merkmal</b>	<b>Zensus (1)</b>	<b>Umfrage</b>		<b>Umfrage</b>	<b>Differenz</b>
		<b>ungewichtet (n=570)</b>		<b>gewichtet, n= 867 (2)</b>	<b>(1)-(2)</b>
<b>Alter</b>					
10-19	6,7	bis 20	1,5	2,2	+4,5
		21-25	2,1	1,9	
20-29	12,8	26-30	2,1	4,4=6,3	+6,5
30-39	13,3	31-40	11,2	12,9	+0,4
40-49	18,7	41-50	16,2	11,8	+6,5
50-59	14,1	51-60	23,4	22,4	-8,3
60-69		61-65	10,1	11,4	
	10,3	66-70	9,1	9,9=21,3	-10
70-79	12,2	71 plus	23,2	24,5	
80plus	5,3=17,5				-7,0
<b>Geschlecht</b>					
weiblich	51		72	50,5	-0,5
männlich	49		28	48,5	+0,5
<b>Eigentumsquote</b>					
Mieter/in	61		77	62,4	+1,4
Eigentümer/in	39		23	37,6	-1,4
<b>Bildung</b>					
Hochschule	26,6		49,2	36,1	-10,5
Abitur	17,4		15,1	12,9	+4,3
Fachhochschule	9,2		8,3	5,7	+3,5
Realschule	26,0		15,1	23,3	+2,7
Hauptschule	38,0		9,3	19,6	18,4
<b>PV-Anlagen</b>					
PV-Gebäude- Installationen	ca. 1.000 ca. 10 % HH		24 %	7 %	-3
<b>Stromverbrauch</b>					
Haushalte	3.500 kWh p. a. für Mehrpersonenhaushalte		3.421 Dito	3.298 dito	+200-300 kWh p. a.

Der geringe Rücklauf ist für die Zielsetzung zur Verbesserung technischer Daten problematisch, weil letztlich damit die Simulationen auf Ebene von einzelnen Straßen oder Quartieren auch nur eingeschränkt möglich sind und insofern aggregierte Daten oder Schätzungen die gleiche Güte haben. Die Zeit zum Ausfüllen variiert zwischen 25 und 65 Minuten, im Schnitt liegt sie bei knapp 50 Minuten, für sozialwissenschaftliche Umfragen eher eine lange Dauer. Weshalb die Umfrage auch als Härtestest für den Zweck der Verbesserung der technischen Datenbasen anzusehen ist.

Der Fragebogen wurde von den teilnehmenden Bürger/innen überwiegend positiv bewertet bzgl. des Interesses, der Verständlichkeit und der beinhalteten Informationen, jedoch auch als in Teilen zu lang zum Ausfüllen. Negative Assoziationen zu sensiblen Daten (zu persönlich) wurden überwiegend verneint. Insofern scheint er angesichts des komplexen Themas und in seiner Logik, Abfolge und Layout gut angenommen worden zu sein. Der Rücklauf dokumentiert aber auch ein derzeit eher geringes Interesse am Thema Energie in Metzingen, was wiederum Fragen zur Öffentlichkeitsarbeit und Wissenschaftskommunikation aufwirft.

#### 4.2.2 Ob und wie beteiligen? Zur Auswahl des Beteiligungsmodus durch die Bürgerschaft

Die Auswahl des Beteiligungsverfahrens erfolgt i. d. R. durch den Forscher nach Maßgabe von erwünschter Zielgruppe und verfügbaren Ressourcen. Prinzipiell kann dies kritisch hinterfragt werden, denn warum sollten die Bürger/innen nicht selbst darüber entscheiden, ob und wie sie beteiligt werden möchten. Zudem sollte sich dadurch die Akzeptanz des Beteiligungsverfahrens erhöhen. In der Bürgerumfrage wurden dazu vier ausgewählte Beteiligungsformate informativ kurz erläutert und zur Auswahl gestellt.

- a) punktuelle Bürgerinformationsabende zu ausgewählten Themen mit Diskussion
- b) punktuelle Bürgerkonferenz zur Diskussion ausgewählter Themen
- c) Bürgergutachten als kleine Gruppe zur intensiven Detailberatung
- d) formaler Bürgerentscheid nach der baden-württembergischen Gemeindeordnung

Die Ergebnisse zeigen auf (Tabelle 14), dass ein Mix aus punktuellen Informations- und Diskussionsangeboten mit einem Kleingruppenformat zur Detaildiskussion und Ausarbeitung von Empfehlungen gewünscht wird.

**Tabelle 14: Legitimation verschiedener Beteiligungsverfahren**

	halte ich für ein sehr gut geeignet (1)	halte ich für gut geeignet (2)	kumuliert (1)+(2)	halte ich nur eingeschränkt geeignet (3)	Kumuliert (1)+(2)+(3)	halte ich für wenig geeignet (4)	halte ich für über- haupt nicht ge-eignet (5)	Kumuliert (4)+(5)
	Zustimmungen					Ablehnungen		
Bürgergutachten	20,3/19,9	30,5/26,1	50,8/46,0	25,6/27,2	76,4/73,2	16,2/16,9	7,4/9,9	23,6/26,8
Bürgerkonferenz.	11,5/12,1	27,0/26,1	38,5/38,2	30,5/30,7	69,0/68,9	22,9/22,5	8,2/8,5	31,1/31,0
Bürgerinformationsabende	24,9/28,3	44,4/42,6	69,3/70,9	20,7/19,2	90,0/91,1	7,4/6,4	2,6/3,6	10,0/10,0
Bürgerentscheid	19,9/21,7	25,6/28,2	45,5/49,9	22,9/20,7	78,4/70,6	21,1/18,6	10,5/10,9	31,6/29,5

Fallzahl (n) zwischen 430 und 560 Angaben ungewichtet /650-770 gewichtet

Für die Diskussionsrunde zu EE-Technologien und einem Energieversorgungssystem basierend auf Erneuerbaren Energien (EVS-EE) erreicht das vorgeschlagene Format Bürgergutachten eine hinreichende, akzeptable Akzeptanz von 73 % Zustimmung (davon 50 % als gute bis sehr gute Annahme). Der hohe Anteil für eine formale Bürgerbeteiligung (Bürgerentscheid) indiziert Annahmen zum Verhältnis Bürgerschaft und Stadt bezgl. der Umsetzung zur Energiewende. Im Vergleich mit der Vorgängerstudie in Rottweil sind die Anteile für die Legitimation des Bürgergutachtens etwas geringer (-10 %) und die Anteile für den Bürgerentscheid höher.

Für den innovativen Ansatz eines Jugend- und Schülergutachtens scheiterten die Kontaktaufnahmen zu den Schulen. Deshalb wurden Gespräche mit den aktiven örtlichen Jugendgemeinderat geführt und es fanden sich aus diesem Kreis Teilnehmer/innen für das Schüler- und Jugendgutachten. Eine Auftakt-runde fand beim DLR Stuttgart statt, gemeinsam mit Vertretern des JGR Stuttgart. Diese Auftakt-runde wurde im Rahmen einer Seminararbeit von einer Studentengruppe protokolliert und ausgewertet (Kurzberg/Swietarsky et al 2016). Generell wird beim intergenerativen Projekt Energiewende die Einbindung der nachfolgenden Generation im hohen Maße (>80%) eindeutig gewünscht und befürwortet. Die Energiewende wird insofern auch als Bildungsaufgabe verstanden.

Es fanden sich insgesamt über 30 Bürger/innen und 11 Jugendliche bereit für die Konstituierung der Bürgergutachter-Gruppen und des Jugend- und Schülergutachtens. Dies ist ein hoher Anteil an bürgerschaftlichen Engagement und führte u. a. zur Gründung zweier Bürgergutachter-Gruppen.

#### **4.2.3 Zentrale inhaltliche Ergebnisse der Bürgerumfrage**

##### **Soziotechnische Aspekte - Zentrale Kognitionen zur Energiewende: Interesse, Wissen, Informiertheit, Sicherheit**

Welche inneren Überzeugungen haben die Befragten zur Energiewende und wie stabil sind diese? Die Energiewende stößt bei den Befragten auf ein außerordentlich bis eher hohes Interesse (ca. 82 %). Dem gegenüber sind das Informationsniveau und das subjektiv empfundene Wissen deutlich geringer ausgeprägt und zudem deutlich in Richtung schwächerer Einstellungen verschoben (Tabelle 15). Gewünscht werden vor allem soziotechnische Informationen, so über den Klimawandel und die Energiewende (Mittelwerte auf einer Skala 1-6: 1.91), die Kostenentwicklung (1.95), die Folgen für Natur- und Landschaftsschutz (1.93) und als erstes technisches Thema Speichertechnologien (2.15). Eine Betroffenheit durch negative lokale Folgen des Klimawandels sehen gut 88 % der Bürger/innen in Metzingen, nur 7-8 % zweifeln daran. Am wenigsten nachgefragt werden in Metzingen Informationen zur Biomasse (3.05) und zur Elektromobilität (2.75). Dies verdeutlicht, dass die Energiewende aus Sicht der Bevölkerung vornehmlich in ihren Wertebezügen Klimaschutz (positiv) und Naturschutz (kritisch) und ökonomischen Kontexten wahrgenommen wird. Es wird aber auch erkannt, dass noch Umsetzungsdefizite seitens der Wissenschaft bei Speichertechnologien und Mobilität bestehen.

Zu welchem bilanzierenden Muster verdichten sich diese basalen Kognitionen? 62 % der Befragten in Metzingen stimmen der Energiewende vollkommen bis weitgehend zu. Weitere 19 % stimmen noch eher zu. Der Anteil ablehnender Meinungen liegt unter 5 %, bei ca. 10 % unentschiedener Haltungen. Der Mittelwert (Skala 1-7) liegt mit 2.27 deutlich im positiven Bereich der Zustimmung zur Energiewende. 66 % der Befragten sind sich zudem ihrer Meinung sehr bis überwiegend sicher. Das heißt, die Zustimmung zur Energiewende ist ein festes positives Einstellungsmuster bei einer deutlichen Mehrheit

der Bürgerschaft. Allerdings sind diese Einstellungsmuster stark vom Interesse abhängig ( $r > .34$ ), weniger vom Wissen und subjektiven Informationsniveau ( $r$  jeweils  $< .23$ ). Es sind also feste Einstellungen im Sinne von Images und Deutungsmuster, aber noch nicht stabil im Sinne fester wissensbasierter Überzeugungen.

**Tabelle 15: Kognitionen zur Energiewende (in %)**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	MW 1-7
Interesse	14,9	42,0	25,1	12,3	3,1	0,9	0,5	0,8	0,4	2,51
Wissen	2,5	12,7	30,0	30,8	17,1	5,6	0,6	0,7	0,1	3,67
Informationsniveau	2,3	14,7	27,6	31,4	12,6	5,7	1,6	0,8	3,3	3,63

Legende: 1 außerordentlich hoch I 2 weitgehend hoch I 3 eher hoch als niedrig I 4 gleichermaßen hoch wie niedrig I 5 eher niedrig als hoch I 6 weitgehend niedrig I 7 vollkommen niedrig I 8 habe mich damit nicht beschäftigt I 9 kann ich nicht beurteilen

Dazu passend ist die Analyse zu Meinungsänderungen. Rund 29 % der Befragten äußern, dass sie in den letzten 1-3 Jahren ihre Meinung hin zu mehr Zustimmung verändert haben. 53 % sehen für sich keine Veränderung in ihrem Meinungsbild. 7 % sehen die Energiewende inzwischen etwas pessimistischer. Die Argumente für die Energiewende finden sich vor allem in externen Bezügen zu Klimaschutz (78 %) und Ausstieg aus der Atomenergie (82 %).

Die Energiewende ist eine positiv besetzte Idee, verknüpft hohen Interesse und geringen Wissen. Ihre ideelle Legitimation speist sich auch aus externen intrinsischen Überzeugungen den Klimaschutz voranzubringen und aus der hochriskanten Atomtechnologie auszusteigen. Noch fehlt aber die Komponente, sie als maßgebliche technologische Innovation zu begreifen. Ihre eigene Soziotechnik ist nicht präsent in den Wahrnehmungen der Befragten.

### **Einstellungen zu Preisen und Kosten zur Energiewende**

Es besteht in einer Mehrheit der Bevölkerung die Annahme (55,7 %: davon sind 37 % eher überzeugt und ca. 19 % sehr überzeugt), dass der Einsatz von EE-Technologien auf lange Sicht zu sinkenden Energiepreisen führen wird. Rund 16 % sind sich hierüber noch im Unklaren, etwa 25 % gehen nicht von sinkenden Energiepreisen aus. Zugleich würden ca.  $\frac{3}{4}$  der Befragten einen Strompreis von maximal 30 ct/kWh akzeptieren (derzeit in Metzingen ca. 28 ct/kWh), einen moderat höheren Strompreis würden noch 11 % (er-)dulden und lediglich knapp 3 % einen deutlich höheren Strompreis. Damit wird die Kostenentwicklung zu einem wichtigen kognitiven Prüfstein für die Akzeptanz der Energiewende.

Inwieweit die 30-Cent-Marke je Kilowattstunde eine magische Grenze darstellt, bleibt offen. Die Energiepreise nähern sich dieser Marke jedoch an. Die Vermittlung der Preis- und Kostenfaktoren der Energiewende wird damit zunehmend bedeutsam für die Energiewende und Teil der Wissenschaftskommunikation.

Die Mentalität der befragten Bürger sieht trotz unbegrenzt verfügbarer Energieressourcen bei EE-Technologien keinen Grund zur Energieverschwendung, sondern präferiert Energieeffizienz und sparsamen Umgang, ungeachtet dieser technischen Option. Dies tendiert zu einem qualitativen, bedarfsorientierten (dargebotsabhängigen) Ausbaupfad (Demand-Side-Management).

## Vertrauen in die Akteure und Umsetzungsdefizite: Politik und Wissenschaft

Für die Umsetzung der Energiewende wird den politischen Akteuren auf allen Ebenen ein schlechtes Zeugnis ausgestellt (60 %). Die generelle kommunale Umsetzung finden noch knapp 60 % der Befragten für gut bis sehr gut gelungen. Für das Land Baden-Württemberg sind es noch knapp 48 % und für die Bundesebene lediglich 33 %. Dies sind sozialwissenschaftlich bekannte Effekte, dass die eigene erlebte Situation i. d. R. besser bewertet wird als die übergeordneten, eher abstrakt wahrgenommenen Handlungsebenen von Land und Bund. Aber dies indiziert auch eine Verantwortlichkeit der kommunalen Ebene.

Befragt nach der gelungenen Umsetzung der Energiewende vor Ort in Metzingen zeigen sich kritische Entwicklungen (Tabelle 16). So relativiert sich die Zustimmung von 60 % für die generelle kommunale Handhabung in Metzingen auf ca. 42 %, also eine unterdurchschnittliche Beurteilung im Vergleich zur Wahrnehmung der Umsetzung der Energiewende in anderen Orten. Dies kann als Nachholbedarf interpretiert werden. Am besten, aber nur im graduellen Umfang, schneiden aus Sicht der befragten Bürger/innen noch die Stadtwerke Metzingen mit einem Mittelwert von 3,56 ab.

**Tabelle 16: Bewertung der Beiträge lokaler Akteure zur Energiewende**

	vollkommen ausreichend	weitgehend ausreichend	eher ausreichend	eher unzu- reichend	weitgehend unzureichend	vollkommen unzureichend	Mittel- werte
Einstellungen zu ...	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	
Aktivitäten Stadtwerke	2,2%	17,1%	31,8%	30,3%	8,2%	10,4%	3,56
Aktivitäten Gemeinderat	2,5%	9,1%	28,4%	45,3%	11,2%	3,5%	3,64
Aktivitäten Bürgerschaft	4,5%	9,3%	21,5%	50,5%	11,2%	3,0%	3,63
Aktivitäten Unternehmen	1,9%	9,0%	23,9%	45,7%	11,9%	7,6%	3,79

Insgesamt wird also die Umsetzung Energiewende auf der lokalen Ebene in Metzingen, gemessen an der subjektiven Wahrnehmung der Bürger was möglich wäre, als gerade hin- bis ausreichend und in hohen Anteilen als unzureichend angesehen.

Der Zeithorizont der Umsetzung der Energiewende (erhoben durch die Frage, ob die Umsetzung als überhastet und zu schnell empfunden wird) wird nicht als kritisch angesehen (Tabelle 17). Für die Bürger/innen gilt: Je schneller, umso besser (61 % Zustimmung für eine schnellere Umsetzung). Deutlich kritisiert wird aber die mangelnde Abstimmung und das fehlende Gesamtkonzept einer Umsetzung der Energiewende (z. B. fehlende Netzleitungen). 72 % kritisieren dies.

Das höchste Vertrauen - mit Ausnahme zur E-Mobilität - zur Umsetzung der Energiewende genießt „die“ Wissenschaft. Dies gilt für die Entwicklung der nötigen Technologien, einschließlich der Speicher für Strom und Wärme. Lediglich bei der E-Mobilität besteht eine Skepsis. Auch bei der Einschätzung, ob die Wissenschaft mit der Energiewende selbst überfordert ist, finden sich bedeutsame Anteile einer Zustimmung. Sie wird in Teilen als konfus und ungeordnet wahrgenommen. Diese Ergebnisse implizieren auch mehrere Herausforderungen für und an die Wissenschaft, nämlich den jeweiligen Forschungsstand mehr transparent zu machen, die lokalen Bezüge der Energiewende mehr zu erforschen sowie die



Wissenschaftskommunikation und populärwissenschaftliche Darstellungen der Komplexität der Energiewende zu verbessern. Letztlich wird die Wissenschaft Teil der Energiewende und deren Gestalter und weniger externe Quelle.

**Tabelle 17: Einstellungen zum Vertrauen in die Wissenschaft zur Umsetzung der Energiewende**

Einstellungen zu ...	stimme vollkommen zu	stimme eher zu	weder noch	stimme eher nicht zu	stimme überhaupt nicht zu	Mittelwerte
wissenschaftlicher Fortschritt schafft Energiewende	3,6%	17,0%	12,5%	51,9%	15,0%	3,57
Wissenschaft ist selbst überfordert	7,0%	35,8%	21,7%	29,2%	6,4%	2,92
nötige Stromspeicher bald verfügbar	1,1%	10,6%	9,6%	56,3%	22,4%	3,88
serienreife E-Mobilität ist bald verfügbar	10,4%	37,0%	7,3%	34,3%	11,0%	2,98

### **Zentrale Ausbaupfade: Das Oxymoron der relativen Autarkie – oder 80 % sind 100 %**

Ein zentrales Konstrukt ist die Auswahl zentraler Ausbaupfade zur lokalen Energiewende. Vier prototypische Szenarien wurden hierzu in der Umfrage kurz erläutert: Das restriktive Szenario I begrenzt das Energiepotenzial auf die lokal erzeugbare Menge und die Anpassung des individuellen Energiekonsums auf diese Menge, mithin durch eventuell Energieeffizienz und Suffizienz durch Verhaltenseinschränkungen. Szenario II relativiert Autarkie auf das technisch-ökonomisch machbar erscheinende Potenzial und inkludiert Energieimporte oder Auslagerung der Energieerzeugung. Das Szenario III beschreibt einen maximalen örtlichen Ausbau auf allen verfügbaren Flächen und mit allen Ressourcen, vielen Speicheranlagen und unter ökonomisch vertretbarem Aufwand. Das Szenario IV ist die Vision einer technisch möglichen Energie-Autarkie auf Gebäudeebene bis 2050 durch technischen Fortschritt, mithin die idealtypische Dezentralisierung.

Werden die Szenarien einzeln bewertet, bleibt die Relation der Gewichtung und Priorität gewahrt. Zukünftig mögliche gebäudliche Autarkie für Strom und Wärme (90 %) und ein moderater Ausbaupfad (94 %) bleiben die Favoriten (Tabelle 18). Das soziotechnische Fazit ist, dass Energie-Autarkie zwar als ideelles Ziel angesehen wird, aber in der Umsetzung auf ein ökologisch-ökonomisches Maß relativiert wird. Aber für alle Szenarien, auch für das restriktive Szenario mit möglicher Suffizienz, findet sich überwiegend Zustimmung. Die Energiewende wird in allen Varianten befürwortet.

Favorit unter den Szenarien in einem Ranking der vier Szenarien ist eindeutig das moderate Szenario II mit einer relativen Autarkie bis zum ökologisch und ökonomisch vertretbaren Maß mit ökologischen Energieimporten zur Abdeckung des örtlichen Energiedefizits (Tabelle 19). Die Einstellungen zu Szenarien sind bipolar. Beliebte sind Szenarien, die den individuellen Energiekonsum möglichst wenig restringieren und weitgehend dezentral sind.

Eine absolute Autarkie, für die jeder Aufwand lohnt (so die Formulierung in der Umfrage) wird von 33 % der Befragten gewünscht. Ein hohes Potenzial mit 80 % Zustimmung findet eine relative Autarkie, in dem Gebäude, soweit technisch möglich, sich selbst mit Wärme und Strom versorgen. Hier zeigt sich der lokale Handlungsbedarf bei energetischen Gebäudesanierungen und deren Bedeutung. Dies ist die Vision der lokalen Energiewende (Pfenning, 2016).

Tabelle 18: Soziale Szenarien lokaler Energiewenden in der Einzelbetrachtung

	vollkommen		weitgehend		eher nicht		weitgehend		in keinster Weise	
	akzeptabel	akzeptabel	akzeptabel	akzeptabel	akzeptabel	akzeptabel	akzeptabel	akzeptabel	akzeptabel	akzeptabel
<b>Szenario I: Absolute restriktive Autarkie (Absolute Autarkie)</b>										
Strom und Wärme werden zu 100% aus verfügbaren lokalen Quellen gewonnen. Reichen diese nicht aus, muss der Verbrauch durch Einsparungen und Auflagen reduziert werden.	4,0%	16,3%	12,3%	16,8%	34,7%	48,7%	14,0%	17,0%		
			33,1%			65,7%				
<b>Szenario II: Maximale Autarkie durch Speicherung (Optional Optimal)</b>	26,0%	34,4%	20,8%	11,7%	3,7%	1,1%				
Alle lokalen verfügbaren Quellen und alle Flächen werden maximal für Strom und Wärme genutzt. Gerade nicht benötigter Strom wird für spätere Bedarfe gespeichert. Dafür werden einige große zentrale Energiespeicher benötigt.		50,4%			15,4%					
			71,2%			16,5%				
<b>Szenario III: effizient Autarkie mit optionalem Energieimport (Relative Autarkie)</b>	43,7%	33,2%	17,5%	2,1%	1,7%	0,6%				
Strom und Wärme werden soweit technisch effizient und wirtschaftlich sinnvoll aus den verfügbaren lokalen Quellen gewonnen. Reichen diese nicht aus, wird ökologisch erzeugter Strom oder Wärme aus externen Quellen hinzugenommen.		76,9%			3,8%					
			94,5%			4,4%				
<b>Szenario IV: Absolute gebäudliche Autarkie (Vision)</b>	46,0%	26,2%	17,7%	4,6%	1,9%	1,0%				
Die Technik wird bis 2050 in der Lage sein, für jedes Haus eine Selbstversorgung mit Strom und Wärme zu gewährleisten. In jedem Haus befindet sich ein kleiner Speicher für Wärme und vor allem Strom.		72,2%			6,5%					
			89,9%			7,5%				

**Tabelle 19: Zentrale Ausbaupfade Bürgerumfrage (Ranking)**

Szenarien	abs.	in %
Szenario I: restriktive Autarkie mit Anpassung Energiekonsum	21	3,9
<b>Szenario II: moderater Ausbau und relative Autarkie, Energieimporte</b>	<b>221</b>	<b>41,5</b>
Szenario III: maximaler lokaler Ausbau, viele Speicher + einige Großspeicher	60	11,3
<b>Szenario IV: Gebäudliche Energie-Autarkie bis 2050 technisch machbar</b>	<b>174</b>	<b>32,7</b>
Keines der genannten Szenarien	22	4,1
Kann ich nicht beurteilen	34	6,4

Quelle: Bürgerumfrage Metzingen 2014/2015

Den gegenläufigen Argumenten für ökologische Strom- und Wärmeimporte wegen der besseren Effizienz von EE-Anlagen an anderen Standorten sowie den günstigeren Kosten wird von 2/3 der Befragten (67 % bzw. 69 %) gefolgt. Etwas niedriger mit 55-60 % fällt die Zustimmung aus für eine Autonomie qua Eigentum der Stadt bzw. Stadtwerken an den EE-Anlagen, die zur städtischen Energieversorgung dienen (Tabelle 20). Dies gilt auch für die Einbeziehung und Beteiligung der Bürger an den Maßnahmen zur Energiewende. Insgesamt erscheint Autarkie nicht als ideales Leitmotiv. Die Effizienz und die Kosten der Anlagen sind die maßgeblichen Auswahlgründe für EE-Technologien. Dem Gebäudemanagement wird eine große Bedeutung für Fortschritte in der kommunalen Energiewende attribuiert.

**Tabelle 20: Einstellungen zu technischen und sozialen Kriterien von Autarkie und Autonomie (in %)**

Metzingen ist energieautark, wenn ....	+++ (1)	++ (2)	+ (3)	- (4)	-- (5)	--- (6)	Unent (7)	k. A. (8)	MW 1-6
<i>Technische Autarkie</i>									
100% Strom lokal erzeugt	23,6	30,4	17,5	9,9	4,7	4,7	6,3	3,6	2,97
100% Wärme lokal erzeugt	24,8	29,3	17,7	7,2	4,3	3,0	8,4	5,3	3,06
Gebäude autark bis 2050	22,4	37,1	21,5	6,3	2,8	6,8	1,6	4,2	2,72
<i>Autonomie</i>									
Bürgerbeteiligung	13,1	19,9	25,7	16,0	7,6	6,6	6,4	4,8	3,54
Stadt/-werke Eigentümer	12,2	31,3	15,2	14,6	3,2	4,6	10,9	8,1	3,63

Legende: Unent = Unentschieden, noch keine abschließende Meinung gebildet, k. A. = keine Angabe

### Auswahl zentraler EE-Technologien: Kollektiv vor individuell & PV vor Biomasse + Wind

Aus Sicht der befragten Bürger ist die Solarenergie, insbesondere die Photovoltaik die eindeutig bevorzugte EE-Technologie (61 % Zustimmung) (Tabelle 21). Gefolgt von der erweiterten Nutzung der Biomasse (34 %) und der Windenergie (11 %). Jedoch präferieren über 43 % den gemeinsamen Ausbau von Wind- und Solarenergie. Daraus folgt, dass einem sinnvollen Energiemix der Vorrang vor dem Ausbau einer einzigen EE-Technologie gegeben wird, auch wenn diese (i. e. PV) eindeutig als Einzeltechnologie gewollt wird. Diese Ergebnisse decken sich mit den technischen Erkenntnissen, dass Metzingen eine sonnenbegünstigte geographische Lage hat. Die Auswahl der zweiten EE-Technologie zwischen Wind und Biomasse entscheiden die Bürger/innen zugunsten der Biomasse. Diese wird zudem in verschiedenen Anlagen auch in Metzingen bereits eingesetzt, vorwiegend als feste Biomasse (Holz und Pellets) für Heizzwecke. Allerdings stehen in Metzingen mit ca. 250 ha landwirtschaftlicher Nutzfläche nur vergleichsweise geringe Flächen zur Verfügung, auch bedingt durch die Hanglagen. Derweil

erzeugen Windanlagen auf kleiner Fläche relativ hohe Leistungen, greifen aber sehr in das Landschaftsbild ein. Dieses Dilemma war Thema in den Bürgergutachten.

**Tabelle 21: Auswahl zentraler EE-Technologien für Metzingen**

Aussage:	--	-	+	++	+0	0	K. A.
Ausbau der Solarenergie sollte in Metzingen Vorrang vor der Windenergie haben	1,4%	7,4%	33,4%	33,4%	16,5%	2,4%	5,5%
Ausbau der Windenergie sollte in Metzingen Vorrang vor der Solarenergie haben	25,0%	43,1%	5,7%	0,6%	18,7%	2,4%	4,5%
Wind- und Solarenergie sollten in Metzingen gleichermaßen vorangetrieben werden	11,2%	28,7%	30,7%	12,9%	10,8%	0,8%	5,0%
die Energiegewinnung aus Pflanzen (Biogas, Biomasse) sollte in Metzingen mehr vorangetrieben werden	15,4%	28,6%	25,6%	8,4%	10,6%	1,0%	10,4%
das Wasserspeicherkraftwerk im Stadtteil Glems sollte ausgebaut werden	4,0%	5,2%	37,4%	44,8%	2,1%	2,0%	4,4%
da nicht für alle Gebäude die Solarenergie ideal genutzt werden kann, sollten größere zentrale "Solarfelder" zu deren Versorgung gebaut werden	9,3%	28,8%	35,7%	13,3%	6,4%	0,4%	6,2%

Legende: -- = stimme überhaupt nicht zu; - = stimme weitgehend nicht zu; + = stimme weitgehend zu; ++ = stimme vollkommen zu. Fett umrandet sind die Anteile mit den höchsten Prozentanteilen.

Hinsichtlich einer individuellen Installation oder dem Aufbau kollektiver Versorgungssysteme in Arealen oder Quartieren, votiert eine Mehrheit für eine spezifische Förderung kollektiver EE-Anlagen. Technisch gewinnen dadurch KWK- und BHKW-Anlagen in Verbindung mit EE-Ressourcen als Energieträger an Bedeutung unter Nutzung von EE-Technologien. Thematisch betrifft dies die Sektorenkoppelung von Strom und Wärme. Es zeigen sich teilweise auch bedeutsame Anteile von unentschiedenen Angaben von 5-20 %, was auf nötige weitere Informationsangebote und Aufklärungsinitiativen verweist. Die Mehrheiten sind nicht immer bereits eindeutig festgelegt, sondern könnten durch Meinungswechsel noch verändert werden.

#### 4.2.4 Technische Aspekte

Anliegen dieses Teils der Erhebungen war die Verbesserung und Unterstützung der technischen Datenbasen für die Szenarien und Verbrauchsberechnungen. Dazu zählen Angaben zum Energieverbrauch, Energiekosten und zur energetischen Gebäudesanierung. Aufgrund des Rücklaufs ist dieses Ziel bereits kritisch zu bewerten, zumal sich diese Verbesserung vor allem erst auf einer Quartiersebene optimal auswirken sollte. Dazu sind je Quartier zu wenige Daten verfügbar.

#### Energieverbrauch und Entwicklungstendenzen des Verbrauchs

Ein erster wichtiger Parameter für zukünftige lokale Energiesysteme ist der Energieverbrauch. Haushalte in Metzingen liegen hier mit 3.300 kWh Jahresstromverbrauch marginal unter dem Bundesdurchschnitt (ca. 3.500 kWh). Der Anteil von häuslichen PV-Anlagen liegt bei ca. 8 %, wobei sich in den Industriegebieten sehr große PV-Anlagen zusätzlich befinden.

Die Annahmen zum zukünftigen Energieverbrauch in den Metzinger Haushalten weisen auf abnehmende Stromverbräuche hin (Tabelle 22), vornehmlich durch den Kauf energieeffizienter Geräte, bei der Umstellung auf LED-Leuchten sowie den Verzicht auf Stand-by-Schaltungen. Steigende Verbräuche erwarten zwischen 1,5 und 4,6 %, in der Summe ca. 13 % aller Haushalte.

**Tabelle 22: Annahmen zum zukünftigen Energieverbrauch in Haushalten (Mehrfachnennungen)**

Annahme zum zukünftigen Energieverbrauch	abs.	Fälle	Nennungen
sinken aus anderen Gründen	13	0,9%	1,5%
steigen aus anderen Gründen	21	1,4%	2,5%
steigen wg. mehr Geräte im HH	26	1,8%	3,2%
steigen wg. Umzug größere WE	35	2,4%	4,3%
steigen wg. Familienzuwachs	40	2,7%	4,9%
sinken wg. Umzug kleinere WE	63	4,3%	7,7%
steigen wg. mehr Zeit zuhause	66	4,6%	8,2%
sinken wg. weniger Personen im Haushalt	92	6,3%	11,4%
sinken wg. Stand-by-Goodbye	218	15,0%	26,9%
sinken wg. Umstellung LED- Leuchten	252	17,4%	31,2%
bleibt gleich	303	20,9%	37,5%
sinken wg. Kauf energiesparsamer Geräte	324	22,3%	40,1%
<b>gesamt</b>	<b>1451</b>	<b>100%</b>	<b>179,6%</b>

## Beheizung und energetische Sanierungen von Gebäuden

Für die Wärmeversorgung werden vorrangig Erdgas (57 %), Erdöl (32 %) und Kachelöfen oder Kaminheizungen, also letztlich Holz als Energieträger, eingesetzt (Tabelle 23). Solare Wärme bringt es auf ca. 10 %, ebenso Wärmepumpen als Teil moderner EE-basierter Wärmeversorgungen, aber auch Nachtspeicherheizungen. Vorrangig sind es gebäudebezogene zentrale Heizungssysteme. Individuelle Einzelversorgungen in Wohnungen bilden marginale Ausnahmen.

**Tabelle 23: Verwendete Heizungssysteme und Wärmenergien in den Haushalten von Metzgingen**

einzelne Öl-Ofen	0,2%
Kohleofen / Kohleöfen	0,3%
Öl-Radiator	0,5%
Holzpellet-Anlage	2,7%
Gasdurchlauferhitzer in der Wohnung	3,9%
elektrischer Heizstrahler	7,2%
Nahwärmeanschluss / Fernwärmeanschluss	7,5%
Wärmepumpen	9,1%
Sonnenkollektoren / Solarthermie	9,5%
elektrische Nachtspeicherheizung	9,7%
Kachelofen / Kaminofen / Holzofen	30,7%
zentrale Ölheizung	31,8%
moderne zentrale Gasheizung (Brennwertkessel)	56,5%

Legende: rot = Öl als fossiler Energieträger; blau = Erdgas als fossiler Energieträger; grün = Erneuerbare Energien als Energiequelle

Interessant und für Simulationen relevant ist der hohe Anteil von Holzheizungen, die in Übergangszeiten von Herbst auf Winter und Winter auf Frühling ergänzend zu Öl- und Gasheizsystemen eingesetzt werden und damit folglich deren Jahresverbrauch reduzieren. Dies ist bei den Wärmebedarfsanalysen zu berücksichtigen. Die Zuordnung von Kamin- und Kachelöfen kann zu den erneuerbaren Wärmeenergien

erfolgen, wenn man diese vom Klimaschutz her betrachtet. Technologisch ist dies hingegen problematisch, es ist eine tradierte Technologie.

Gebaut wurden die meisten (60 %) Wohnhäuser in Metzingen vor 1980 (Tabelle 24) und zählen somit zu Bauten ohne jegliche Bauvorhaben zu energetischen Wärmestandards. Zwischen 1981 und 1990, 1991-2000 sowie nach 2005 wurden jeweils ca. 10-11 % der Gebäude errichtet. 2001-2005 zeigt sich ein deutlich geringerer Zuwachs an Wohneinheiten mit ca. 5 %. Dies bedeutet ein hoher Gebäudealtbestand mit geringen Wärmestandards. Der energetische Standard von Häusern mit besserer Wärmedämmung steigt mit dem Baujahr an. Für die Jahre nach 2000 werden die energetischen Teilsanierungen weitgehend durch den Niedrigenergie-Standard und die Passivhausbauweise ersetzt. Die Problembereiche sind die Dämmung der Kellerdecke sowie die niedrige Rate von Passivhäusern (Anteil insgesamt 4 %) und Häusern gemäß Niedrigenergie-Standard (10 %) in Metzingen.

**Tabelle 24: Baujahr der Gebäude und Wärmestandard bzw. Dämmung in Metzingen**

Baujahr	Dämmung			Haus-Standard	
	Fassade	Dachstuhl	Keller	NE-Haus	Passiv-Haus
vor 1980	35,5%	32,9%	7,5%	3,7%	0,5%
1981-1990	37,7%	45,3%	16,9%	2,0%	1,3%
1991-2000	62,0%	35,5%	27,1%	15,3%	9,4%
2001-2005	42,3%	52,4%	25,7%	20,3%	1,4%
nach 2005	38,1%	64,7%	34,6%	42,2%	25,0%
Anteile insgesamt	30,1	59,8	14,9	10,1	4,3

Energetische Sanierungen finden sich zu gut 40 % für eine Wärmedämmung des Gebäudes bzw. Wohnhauses, zu 60 % für den Dachstuhl und zu 16 % für den Keller. Eine umfassende Wärmesanie rung für die gesamte Gebäudehülle finden sich bei ca. 6 % und bei ca. 20 % sind bereits Fassade und Dachstuhl gedämmt. Etwa 7 % weisen einen Niedrigenergiestandard und ca. 4 % einen Passivhausstandard auf. Die konkreten Planungen für weitere energetische Sanierungen erreichen eine Rate von 1,5-1,7 % des Gebäudebestandes per anno.

### Nutzung erneuerbarer Energien

Sonnenkollektoren zur Wärmege winnung befinden sich auf etwa 10 % der Gebäude, PV-Anlagen auf ca. 7 %. Auf gleichem Niveau liegt der Anteil von Häusern mit BHKW- oder Nahwärmeanschluss, wie es die Stadtwerke im Stadtteil Neugreuth anbieten.

**Tabelle 25: Nutzung und Planungen zur Nutzung von EE-Anlagen in Metzingen**

	Ja	Nein	ist geplant	Keine Angabe
Sonnenkollektoren zur Wärmege winnung?	10,6%	88,2%	1,2%	0,0%
eine Photovoltaik-Anlage zur Stromerzeugung	7,3%	90,7%	1,9%	0,0%
Anschluss Nahwärmenetz	7,3%	79,9%	0,2%	12,6%
Wärmeisolationfenster	53,2%	31,5%	0,8%	14,5%
Blockheizkraftwerk - nur Online-Erhebung	5,9%	83,1%	0,0%	10,9%

Es zeigen sich auch in Metzingen die bundesweit beobachtbaren niedrigen Zuwachsraten hinsichtlich der geplanten Installation von Solaranlagen. Am höchsten ist die Zuwachsrate bei PV-Anlagen mit ca. 2 % in den nächsten Jahren zu erwarten. Die individuelle Bereitschaft, zur Innovation Energiewende beizutragen, ist nicht sonderlich ausgeprägt. Die Zuwachsraten je Jahr liegen unter einem Prozent. Ebenso ist erkennbar, dass sich in den Haushaltsausstattungen für Geräte und Beleuchtung etliche Aktivitäten zeigen, weniger im Bereich der energetischen Sanierung von Gebäuden.

## **E-Mobilität**

Zur E-Mobilität wurde gefragt, ob die Befragten bei einem anstehenden Kauf eines neuen Personenkraftwagens ein Elektrofahrzeug in die engere Wahl einbeziehen würden und ob eine Bereitschaft besteht, bei einem Car-Sharing-Angebot mitzumachen (kollektive Nutzungsformate). Jeweils ca. 23-25 % ziehen diese Möglichkeiten konkret in Betracht. Damit ist die E-Mobilität im Vergleich mit der Installation von PV-Anlagen oder zur energetischen Wärmesanieung deutlich niedriger in ihrer Bereitschaft ausgeprägt. Das Potenzial erscheint aber hoch genug für erste Maßnahmen zu deren kommunalen Förderung.

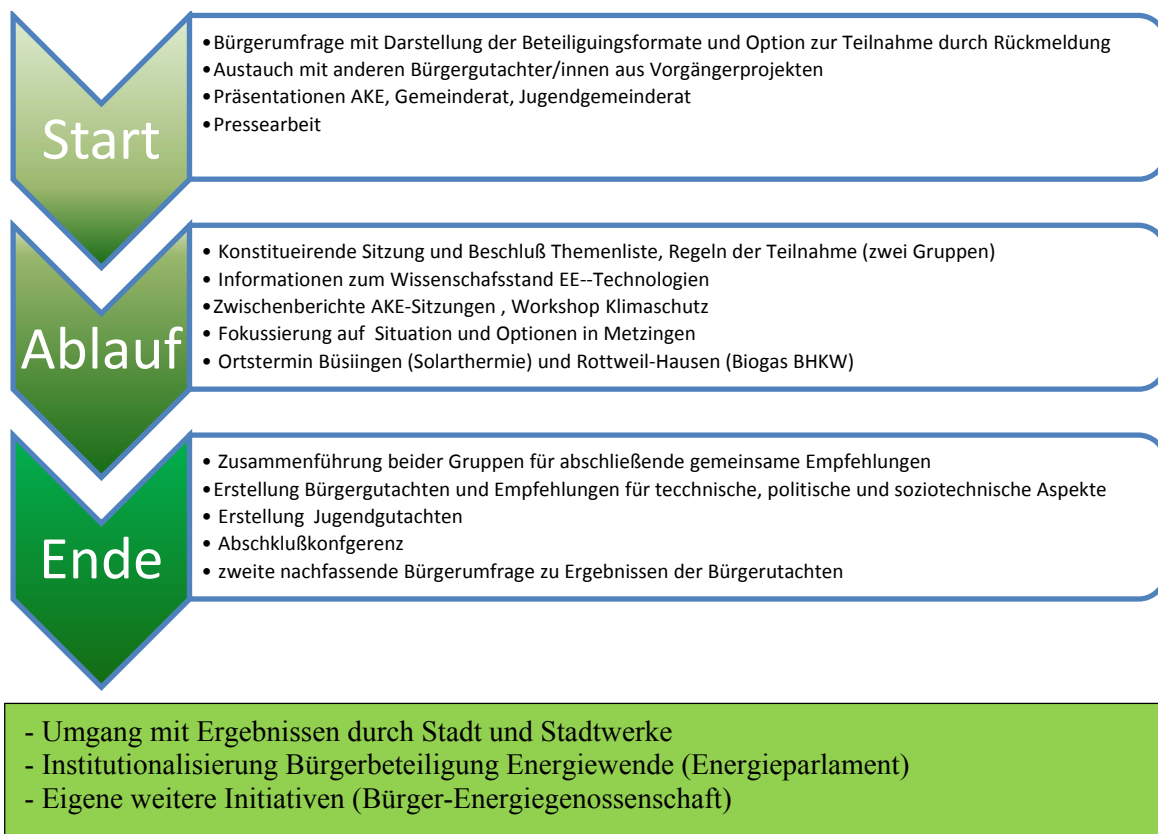
### **4.2.5 Bürger- und Jugendgutachten**

Es fanden sich zwei Bürgergruppen, die ab April 2015 ihre Beratungen aufnahmen, und ebenso eine Jugendgruppe, vornehmlich mit Vertretern aus dem Jugendgemeinderat von Metzingen. Die Gruppengröße variierte zwischen 8-12 Personen, darunter fünf Bürgergutachterinnen. Beim Schülergutachten waren vornehmlich Schülerinnen aus dem Jugendgemeinderat vertreten. Alle Altersgruppen ab 25 Jahren waren in den Bürgergruppen vertreten. Es dominieren technische Berufe. Innerhalb des Teilnehmerkreises fanden sich Personen mit Nutzungen von PV-Anlagen, Wärmepumpen und kollektiver Nahwärmeversorgung. Zur Einstimmung auf die Rolle als Bürgergutachter wurden jeweils Ergebnisse der Bürgerumfrage in die Diskussionen eingespeist, um auf die allgemeine Stimmungslage zu Sachfragen hinzuweisen.

Wissenschaftlich sind die Bürgergutachten Teil eines Diskurses, um im Detail technische Lösungen für die Energiewende zu erarbeiten. Dies ist ambitioniert. Denn viele EE-Technologien ermöglichen viele Kombinationen, die fachlich wie zeitlich nicht im Verfahren ausgiebig behandelt werden können. Es kommt deshalb darauf an, zu fokussieren und Technologien auszuwählen.

- Technisch ging es um den Test, ob die Komplexität der EE-Technologien und eines auf Erneuerbaren Energien basierenden Energieversorgungssystems (EVS-EE) in einem Bürgergutachten umfassend hinreichend vermittelt werden kann.
- Für die Umsetzung geht es um die Auswahl primärer EE-Technologien für den Einsatz in Metzingen und zentrale Ausbaupfade auszuwählen, auch als visionärer Ausblick.
- Kommunalpolitisch geht es um die Frage der Umsetzung der Energiewende vor Ort, nicht nur bezogen auf die Empfehlungen des Bürgergutachtens, mithin die Ausgestaltung der Rahmenbedingungen kommunaler Energiepolitik.
- Individuell geht es um das Erarbeiten oder Aufzeigen eigener Möglichkeiten eines Beitrages zur Energiewende.

Die Durchführung eines wissenschaftlich begleiteten Bürgerbeteiligungsverfahrens auf aktueller Höhe des Forschungsstandes, unter Einbindung einer Bürgerumfrage sowie eines Bürger- und Jugendgutachtens, ist in der ausgeprägten ehrenamtlichen Bürgerbeteiligung in Metzingen eine Innovation. Sowohl hinsichtlich des Formats, des Stils als auch der Inhalte wurden neue Standards gesetzt, was für alle Seiten nicht unkritisch bzw. unproblematisch war. Dies gilt für die Aufwandsentschädigung, die Raumfrage und die Kooperation zwischen Verwaltung und Forschungsteam. Nachfolgende Übersicht illustriert das prozessuale Bürgerbeteiligungsverfahren.



### Forschungsstand zu EE-Technologien

Dieser Teil des Bürgergutachtens entspricht eigentlich einer Wissenschaftskommunikation. Für alle aufgeführten EE-Technologien wurden in den ersten Monaten Forschungsstand, Vor- und Nachteile erörtert und besprochen. Schwerpunkte bildeten jedoch die Photovoltaik und die Windenergie für die Stromversorgung. Für die Wärmeversorgung waren dies Wärmepumpen und feste Biomasse, da in Metzingen die Firma Refood (energetische Verwertung von Lebensmittelresten) aktiv ist und ein Sammelager im Industriegebiet-Nord unterhält. Das Interesse der Bürgergutachter an EE-Themen führte auch dazu, dass Veranstaltungen des Arbeitskreis Klima und Energie (AKE) Metzingen Thema der Sitzungen wurde. Dies betrifft insbesondere für die Nutzung von fester Biomasse (insbesondere Holz), von Abwasserwärme und von Wärmepumpen im Verbund mit einer lokalen Wärmeanomalie im Untergrund, die für Niedrigtemperaturheizungen einsetzbar erscheint. Besonders begrüßt wurden die Ortstermine in Büsingen und Rottweil.



## **Bestandsaufnahme EE-Technologien und deren Potenziale in Metzingen**

In Metzingen sind bisher an EE-Technologien verfügbar:

- ca. 800 installierte PV-Anlagen
- Modellprojekte einzelner Vorhabenträger zur Nutzung von Abwasserwärme
- Modellprojekte zur Nutzung von Wärmepumpen, die über PV-Anlagen versorgt werden
- Modellprojekte zur Nutzung der Wärmeanomalie für Gebäudeheizungen
- 13 Bürgersolaranlagen des AKE, die genossenschaftlich betrieben werden
- ein erdgasbetriebenes BHKW im Geschoßwohnungsbau im Stadtteil Neugreuth
- vergleichbare Planungen für ein Wohngebiet rund um das Rathaus im Stadtteil Glems
- eine holzbefeuerte Heizungszentrale beim Schulzentrum und angrenzendem Wohngebiet
- ein kleines Laufwasserkraftwerk an der Erms bei der örtlichen Kläranlage
- die Firma Kramer nutzt ein modernes Smart-Factory-System zur Energiesteuerung
- in einem Gutachten wurden die Optionen für die Nutzungen der Straßenböschungen an den Straßentangenten für kollektive Solaranlagen analysiert, jedoch aus Kostengründen verworfen. Hier ergeben sich Anschlusspunkte für kollektive Anlagen
- am Wippberg ist eine Fläche für Windanlagen auf Metzinger Gemarkung ausgewiesen mit durchschnittlichen Windgeschwindigkeit  $>5$  m/sec, und somit im kritischen Bereich für eine gute Ausnutzung von Windanlagen

Damit verfügt Metzingen bereits über eine Vielzahl von EE-Technologien, ohne dass diese besonders eingebunden erscheinen in ein kommunales Konzept zur lokalen Energiewende.

## **Visionärer Ausblick und Rahmenbedingungen als Zielbestimmung**

Die eigene Zielbestimmung wurde im Kreis der Bürgergutachter mehrheitlich gesehen als (a) visionärer Ausblick auf eine mögliche Energie-Autarkie, der es sich anzunähern gilt und (b) die Definition von Rahmenbedingungen für die lokale Energiewende. Dieser visionäre Ausblick und die Rahmenbedingungen inkludieren aus technischer und aus soziotechnischer Sicht folgende Aspekte.

### **Technische Aspekte:**

- Priorität haben Solaranlagen zur Stromversorgung mit integrierten Speichermöglichkeiten und solarthermische Anlagen mit Wärmezwischenspeicher oder saisonalen Speichern.
- Vorrang für einen Energiemix aus PV und Windanlagen, die aufgrund ihrer hohen Leistung dem intensiven Ausbau lokaler Biomasse vorgezogen wird. Dies bedingt aber hohe Windanlagen ( $<3$  MW Leistung) mit Einfluss auf das Landschaftsbild, weshalb deren Planung von Umwelt- und Naturschutzgutachten flankiert werden soll.
- Biomasse kann über KWK- und BHKW-Systeme zur Versorgung kleinerer örtlicher Areale herangezogen werden. Dazu sollen Gespräche mit den Landwirten geführt werden. Es soll aber auf jeden Fall Biomasse in der Landschaft verbleiben für ökologische Flächen. In die Überlegungen wurden

neben landwirtschaftlichen Flächen auch Grünschnitt und Holzabfälle einbezogen. Ethische Bedenken wurden geäußert, Nahrungsmittel zur Energieversorgung zu verwenden. Dies soll öffentlich thematisiert werden für eine gemeinsame Konvention mit allen Beteiligten.

- Wasserkraft kann an den alten Mühlenstandorten als Laufwasserkraftwerk nach Bad Uracher Vorbild als örtliche Nischentechnik mit hoher Symbolik zum Einsatz kommen. Auch hier sollen ökologische Gutachten die Umweltverträglichkeit für den Fischbestand sichern.
- Zur Wärmeversorgung soll die lokale Wärmeanomalie sowie Wärmepumpen mit PV-Stromversorgung dienen (oberflächennahe Geothermie).
- Abwasser-Abwärmenutzung soll entlang ausgewählter Gebäude am Hauptsammler zum Einsatz kommen für die Wärmeversorgung.
- Nach Büsinger Vorbild sollen Solarthermie und Biomasse zur kollektiven Wärmeversorgung für Gebäude im Altbestand geprüft werden.
- Kollektive Anlagen sollen Vorrang vor individuellen Anlagen haben, aber nicht als Konkurrenz und Ausschluss, sondern sich ergänzend.
- Die Einbindung des von der EnBW betriebenen Pumpspeicherkraftwerkes in ein örtliches EVS-EE ist ein weitaus gewichtigeres Thema für ein EVS-EE in Metzingen. Es könnte Überkapazitäten aufnehmen und Regelleistung zur Verfügung stellen. Dazu wären Gespräche mit der EnBW und der NetzeBW erforderlich, inwieweit eine solche Nutzung beim Ausbau von EE-Anlagen in Metzingen für das Pumpspeicherkraftwerk möglich ist, denn es dient überregional zum Lastausgleich und zur Netzsicherung.

Vom Verfahren her schien die Diskussion zum Forschungsstand zu langatmig anlegt. Konkrete Beispiele und Ortstermine bewiesen sich als attraktive Didaktik für ein Bürgergutachten. Die Wissenschaftskommunikation zur allgemeinen Darstellung der Energiewende hat mehr didaktische denn inhaltliche Defizite. Die in der Schlussphase verfügbaren technischen Steckbriefe aus dem Technologieatlas (Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, 2016) wurden von den Bürgergutachter/innen in einer explorativen, qualitativen Evaluation als sehr hilfreich bewertet.

### **Soziotechnische Aspekte:**

- Autarkie wird als technisch relativer Ausbaupfad betrachtet, aber energiepolitisch als Ideal angesehen, um über pragmatische Lösungen sich diesem Ideal zu nähern. Die Relativierung richtet sich nach den Kriterien ökologischer und ökonomischer Machbarkeit. Dies schließt einen moderaten dezentralen, bedarfsnahen und qualitativen Ausbaupfad mit Ökostrom-Importen ein.
- Eine Autonomie über externe EE-Anlagen soll die Selbstbestimmung und ideale Abstimmung in einen lokalen Smart-System gewährleisten. Metzingen soll eine Smart-City werden.
- Kollektive Anlagen sollen gegenüber individuellen Anlagen gesondert gefördert werden, z. B. durch eine Bürgerenergiegenossenschaft.
- Eine Bürgerenergiegenossenschaft soll privates Kapital für eine Energiewende aktivieren und einen Beitrag der Bürgerschaft darstellen, auch als Anreiz für die Stadt und die Stadtwerke. Kooperationen sind anzustreben.
- Primäre Technologien für Metzingen sollen Solarenergie und eingeschränkt Wind sein als örtliche Systemtechnologien. Biomasse und Wasserkraft (Erms) gelten als flankierende EE-Technologien

zur Energieversorgung für Inselösungen und EE-Symbolik, z. B. Ersatz von Erdgas durch von Biogas. Dies stellt auch den örtlichen Energiemix dar.

- Die Bürgermitbestimmung soll institutionalisiert werden mit konkreten Rechten zu Informationen über Bauvorhaben mit energetischer Relevanz und Planungen zur Energieinfrastruktur. Die Chance zur Veränderung, Umsetzung und Einfluss auf örtliche Planungen und Entscheidungen zur Energiepolitik wird als Voraussetzung für ein weiteres Bürgerengagement in Metzingen eingefordert. Diskutiert wurde das Modell eines Energierates, der durch örtliche Satzungen zur Bürgerbeteiligung etabliert werden kann.
- Aus dem Jugendgutachten resultiert vor allem die Forderung, die Energiewende zum Bildungsthema zu machen, z. B. im Rahmen von MINT-Projekten oder Projekten des Jugendgemeinderats wie eine Schülerumfrage, Vorträgen und Informationsmaterialien.
- Dazu können Maßnahmen in der Stadtbibliothek, der örtlichen VHS, Vorträge von Expert/innen, öffentlichkeitswirksame, symbolische EE-Demoanlagen (Solarlesebank) und weitere projektbezogene Bürgergutachten zählen.

#### **4.2.7 Fazit zur Bürgerbeteiligung**

Die Akzeptanz und Partizipationsforschung hat zum konkreten Erfolg, dass sich in Metzingen relativ viele Bürger/innen für die Detaildiskussion einfanden. Der Rücklauf der Bürgerumfrage zeigt jedoch ein geringes Interesse am Thema Energiewende. Die Ergebnisse erscheinen äquivalent zu den technischen Analysen und Szenarien: moderater Ausbau, relative Autarkie und angestrebte Autonomie. Die Verbesserung der technischen Datenbasen gelang nur hinlänglich. Das vom Modellprojekt Rottweil-Hausen übernommene Design bewährte sich jedoch. Derzeit startet die örtliche Diskussion zur Umsetzung der Empfehlungen.

### **4.3 Szenarioerstellung mittels Cross-Impact-Bilanzanalyse (CIB)**

#### **4.3.1 Auswahl der Szenarioelemente für die CIB**

Da für die Metzinger Szenarios zum einen weniger Zeit eingeplant war als für die Szenarien für Baden-Württemberg und sich zum anderen dort gezeigt hat, dass die Bewertung der Cross-Impacts für verschiedene Stufen der lastgerechten und bilanziellen Autarkiegrade oft ähnlich ausfiel, wurde hier die angestrebte Anzahl der Deskriptoren als auch der verschiedenen Autarkiegrade reduziert. Hier wurde nur noch zwischen lastgerechter und bilanzieller Autarkie unterschieden und maximal dreizehn Deskriptoren zugelassen. Diese wurden aus einer Liste mit 21 verschiedenen Deskriptoren durch Abstimmung der Projektmitglieder und interviewten Stakeholder ausgewählt. Erstellt wurde diese aufbauend auf Interviews mit Stakeholdern und Projektpartnern und den Befragten vor der Abstimmung zur Ergänzung vorgelegt. Wie in den Szenarien für Baden-Württemberg wurden die Stimmen dabei so gewichtet, dass pro beteiligter Institution eine Stimme einging, um den Stakeholdern gegenüber den teilweise mit mehreren Personen beteiligten Projektpartnern gleiches Stimmgewicht zu geben (siehe Tabelle 26).

Tabelle 26: Umfrageergebnisse zur Wichtigkeit der Deskriptoren für Metzinger

<i>Deskriptor</i>	<i>Wichtigkeit</i>
<b>Akzeptanz in der Bevölkerung</b>	9,2
<b>Ausbau Photovoltaik</b>	9,0
<b>Ausbau Erneuerbare Energien</b>	8,7
<b>Autarkiegrad Strom</b>	8,6
<b>Autarkiegrad Wärme</b>	8,6
<b>Energetische Rohstoffpreise</b>	7,5
<b>Eigenerzeugung Strom u. Wärme</b>	7,3
<b>Sanierungsrate und -tiefe</b>	6,9
<b>Ausbau des Verteilnetzes</b>	6,7
<b>CO2-Preise</b>	6,7
<b>Wirtschaftswachstum</b>	6,7
<b>Autarkiegrad Mobilität</b>	6,6
<b>Ausbau Windkraft</b>	6,5
<i>Gesetzgebung Strommarkt</i>	6,3
<i>Biomasseimporte</i>	6,2
<i>Politikstabilität</i>	5,9
<i>Ausbau Wasserkraft</i>	5,8
<i>Mobilitätsverhalten und modal split</i>	5,4
<i>Struktur des ÖPNV</i>	5,1
<i>Bevölkerungsentwicklung</i>	4,7
<i>Entwicklung Biokraftstoffe</i>	4,2

#### 4.3.2 Erhebung der Cross-Impacts

Analog zum Vorgehen bei den Szenarien für Baden-Württemberg wurde, um die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Szenariodeskriptoren und ihren Varianten zu bestimmen, die Wirkung jeder Variante auf alle anderen Varianten bewertet. Die Realisierung einer Deskriptorvariante wurde dazu in Hinblick auf ihre Wirkung auf die Realisierung einer Variante eines anderen Deskriptors als stark fördernd (+3) / fördernd (+2) / schwach fördernd (+1) / ohne klaren Einfluss (0) / schwach hindernd (-1) / hindernd (-2) oder stark hindernd (-3) bewertet. An der Bewertung konnten alle Projektmitglieder teilnehmen. Diese Bewertung wurde zunächst in einem Workshop von jedem Teilnehmer einzeln durchgeführt, alle stark widersprüchlichen Bewertungen – bei denen es nicht nur über die Stärke eines Impacts unterschiedliche Ansichten gab, sondern auch über die Wirkungsrichtung – wurden in einem zweiten Workshop diskutiert, bis eine gemeinsame Bewertung gefunden war. Gab es nur unterschiedliche Bewertungen in Bezug auf die Stärke der Wirkung, wurden diese gemittelt. Dafür wurde die Summe der Bewertungen aller Einschätzungen gebildet; da die CIM von insgesamt sechs Experten bewertet wurde, gibt die daraus resultierende Cross-Impact-Matrix eine Einschätzung aller Cross-Impacts zwischen den Deskriptorvarianten wieder, die dort mit -18 (stark hindern) bis +18 (stark fördernd) abgebildet sind (Abbildung 49). Die gemeinsam diskutierten Cross-Impacts wurden analog mit 6 multipliziert.



### 4.3.3 Szenarioauswahl

Die Auswertung der Cross-Impact-Matrix ergab für Metzingen drei vollkonsistente Szenarien (Tabelle 27), welche – auch auf Grund der geringen Anzahl – den Möglichkeitsraum aller Deskriptoren nicht komplett ausschöpfen. Für Strom (Deskriptor F) und Wärme (Deskriptor G) erscheinen nur bilanzielle Autarkieformen (Ausprägung F1 bzw. G1) mit bilanzneutralen Biomasseimporten (Deskriptor H – Ausprägung H3) als plausibel (siehe Abbildung 50).

**Tabelle 27: Vollkonsistente Szenarien für Metzingen**

Szenario Nr. 1	Szenario Nr. 2	Szenario Nr. 3
A. Akzeptanz in der Bevölkerung: A1 sinkende Akzeptanz	A. Akzeptanz in der Bevölkerung: A3 steigende Akzeptanz	
B. Ausbau des Verteilnetzes: B1 Stand der Technik	B. Ausbau des Verteilnetzes: B2 Smart Grid Ansatz	
C. Ausbau Photovoltaik: C1 niedriger Ausbaupfad	C. Ausbau Photovoltaik: C3 hoher Ausbaupfad	
D. Ausbau Windkraft: D1 niedriger Ausbaupfad	D. Ausbau Windkraft: D3 hoher Ausbaupfad	
E. Autarkiegrad Mobilität: E1 bilanzielle Autarkie	E. Autarkiegrad Mobilität: E2 lastgerechte Autarkie	
F. Autarkiegrad Strom: F1 bilanzielle Autarkie		
G. Autarkiegrad Wärme: G1 bilanzielle Autarkie		
H. Biomasseimporte: H3 bilanzneutrale Importe		
I. CO <sub>2</sub> -Preise: I2 mittlerer Preispfad	I. CO <sub>2</sub> -Preise: I3 hoher Preispfad	I. CO <sub>2</sub> -Preise: I2 mittlerer Preispfad
J. Eigenerzeugung Strom u. Wärme: J1 keine Privilegierung	J. Eigenerzeugung Strom u. Wärme: J2 Privilegierung	
K. Energetische Rohstoffpreise: K1 niedriger Preispfad		K. Energetische Rohstoffpreise: K2 mittlerer Preispfad
L. Sanierungsrate und -tiefe: L1 schwache Effizienzentwicklung	L. Sanierungsrate und -tiefe: L3 starke Effizienzentwicklung	
M. Wirtschaftswachstum: M1 schwaches Wachstum	M. Wirtschaftswachstum: M2 moderates Wachstum	

Als wichtigste Treibergrößen der drei Szenarien wirken die (weltweiten) energetischen Rohstoffpreise, die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Preise sowie das Wirtschaftswachstum und die Akzeptanz in der Bevölkerung.

#### Stagnationsszenario

Im Szenario **Stagnierendes Metzingen (BAU)** (Szenario Nr. 1 in Tabelle 27) werden, ausgehend von schwachem Wirtschaftswachstum, niedrigen Rohstoffpreisen und geringen CO<sub>2</sub>-Preisen, nur wenige Sanierungen vorgenommen und der Ausbau der Erneuerbaren Energien erfolgt auf Grund des geringen Kostendrucks relativ langsam, genauso werden mögliche Effizienzsteigerungen wenig genutzt. Durch wirtschaftliche Probleme und einen Ausbau des Verteilnetzes nach Stand der Technik – was unter anderem eine große Anzahl neuer Freikabel bedeutet – sinkt zudem die Akzeptanz für den Ausbau Erneuerbarer Energien. Dadurch erscheinen nur die schwächeren Autarkieziele als plausibel. Zudem werden in diesem Szenario Eigenerzeugung und -verbrauch nicht privilegiert, was eine lastgerechte Autarkie vor allem im Wärme- und Strombereich zusätzlich erschwert. Mobilität erfolgt in dieser Welt noch hauptsächlich über Verbrennungsmotoren: nur knapp über ein Viertel der privaten Fahrzeuge

verfügt über alternative Antriebe, die meisten davon sind Benzin-Hybrid-Antriebe; Plug-In-Hybride kommen auf einen Anteil von unter 10 %. Im Lastverkehr werden nun knapp die Hälfte der Fahrzeuge mit Diesel-Hybrid-Antrieb ausgestattet sein, allerdings läuft die andere Hälfte der Flotte immer noch mit gewöhnlichen Dieselmotoren. Metzingen ist in diesem Szenario zu 80 % strom-autark; von der im Bilanzkreis verbrauchten Endenergie – ausgenommen graue Energie – werden in diesem Szenario 20 % innerhalb des Bilanzkreises bereitgestellt. Nicht überraschend fallen in diesem Szenario die wenigsten Investitionskosten an: Pro erzeugtem TJ/a entstehen hier Kosten von rund 85 Mio. Euro. Gleichzeitig ist es dadurch auch das Szenario mit dem höchsten Endenergiebedarf und den höchsten Emissionen: Im Jahr 2050 werden hier über 85.000 t CO<sub>2</sub> pro Jahr ausgestoßen.

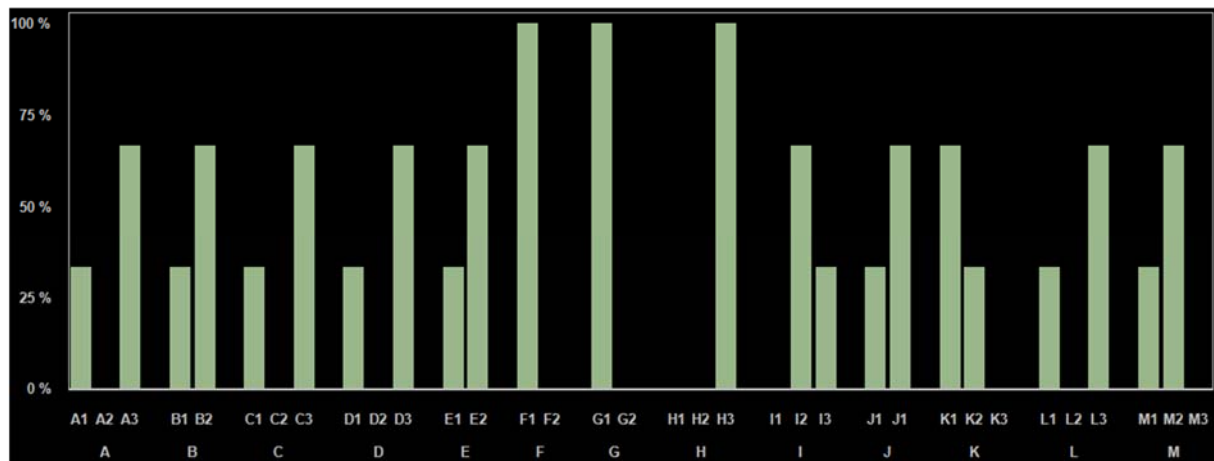


Abbildung 50: Häufigkeiten der Deskriptorvarianten bei den drei vollkonsistenten Szenarien für Metzingen

### Innovationsszenarien

Im Szenario **Innovatives Metzingen I (IM1)** (Szenario Nr. 2 in Tabelle 27) erhöht sich der Kostendruck durch höhere CO<sub>2</sub>-Preise, was einen schnelleren Ausbau der Erneuerbaren Energien zur Folge hat, der – anders als in Szenario Nr. 1 (BAU) – auch nicht durch Proteste aus der Bevölkerung verlangsamt wird. Das liegt zum einen an der besseren wirtschaftlichen Lage, zum anderen aber auch daran, dass der Netzausbau in Richtung Smart Grid erfolgt, wodurch weniger neue Leitungen verlegt werden müssen als im Szenario Stagnierendes Metzingen (BAU), in dem das Netz nach derzeitigem technischem Standard ausgebaut wird. In diesem Umfeld erscheint es plausibel, dass die hohen Ausbaupfade für Windkraft- als auch Photovoltaikanlagen realisiert werden können. Weiterhin macht sich die steigende Akzeptanz der Energiewende in diesem Szenario auch in den hohen Effizienzgewinnen bemerkbar: sowohl die Sanierungsrate (2 %) als auch die -tiefe (70 %) sind hier doppelt so hoch wie im Szenario Stagnierendes Metzingen (BAU). Dazu trägt auch die Privilegierung der Eigenerzeugung bei, die einen weiteren Sanierungsanreiz setzt, der sowohl von der wirtschaftlichen Lage als auch der positiven Einstellung der Bevölkerung zur Energiewende zusätzlich unterstützt wird. Im Szenario Innovatives Metzingen I (IM1) wird in Metzingen weit mehr Strom erzeugt, als hier verbraucht wird (ca. 300 % des Bedarfes). Der Endenergiebedarf des Bilanzkreises wird hier zu etwas über 82 % innerhalb desselben bereitgestellt. Dieser sinkt bis zum Jahr 2050 um ca. 20 %. Pro Jahr und TJ fallen in diesem Szenario Kosten von ca. 92 Mio. Euro an, dafür sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich zu 2012 um 60 % gesunken, im Vergleich zum Szenario Stagnierendes Metzingen (BAU) sind sie um ein gutes Viertel geringer.

Das zweite Innovationsszenario (**Innovatives Metzingen II, IM2**) (Szenario Nr. 3 in Tabelle 27) unterscheidet sich vom ersten nur in den energetischen Rohstoff- und den CO<sub>2</sub>-Preisen. Die Wechselwirkung zwischen diesen beiden Größen wurde so eingeschätzt, dass ein niedrigerer Rohstoffpreis die Institutionalisierung eines hohen CO<sub>2</sub>-Preises tendenziell erleichtert, da in diesem Umfeld – auf Grund der geringeren Gesamtbelastung durch Energiekosten – mit weniger Gegenwind gegen ein solches Vorhaben gerechnet wird, als wenn sich auch bei den Rohstoffpreisen der hohe Preispfad realisieren würde. Bezogen auf den Energiebedarf, die CO<sub>2</sub>-Emissionen, die Autarkiegrade und die Kosten ist das Szenario Innovatives Metzingen II (IM2) fast identisch mit dem Szenario Innovatives Metzingen I (IM1).

Anders als in der Cross-Impact-Bilanzanalyse für Baden-Württemberg wurden für Metzingen die Autarkiegrade nicht fest vorgegeben, sondern nur die Art der angestrebten Autarkie (lastgerecht oder bilanziell) festgelegt. Im Simulationsmodell TEAM wurde dann der maximal erreichbare Autarkiegrad bei Einhaltung der anderen Parameter und bei Kostenoptimierung errechnet. Dieses Vorgehen wurde gewählt, weil sich in der Modellierung der Szenarien für Baden-Württemberg gezeigt hat, dass sich modelltechnisch eine Optimierung der Kosten bei fest vorgegebenem Autarkiegrad nur mit hohem rechen-technischen Aufwand umsetzen ließ.

### **Extreme Autarkieszenarien**

Zusätzlich zu diesen drei aus der Cross-Impact-Bilanzanalyse resultierenden plausiblen Szenarien wurden zwei Extremszenarien berechnet. Ausgehend von den Rahmenbedingungen des Szenarios Innovatives Metzingen II (IM2) wurde hier einmal die maximal erreichbare Strom-Autarkie (*Strom-autarkes Metzingen*) sowie die maximal erreichbare Endenergie-Autarkie (*Endenergie-autarkes Metzingen*) über alle Bereiche errechnet.

Im Szenario **Strom-autarkes Metzingen (SAM)** wurde auf die Kostenoptimierung verzichtet und dafür die Autarkie im Strombereich maximiert. Die Berechnung des bilanziellen Strom-Autarkiegrades erfolgt nach Gleichung 2 bzw. Gleichung 3. Dabei wird der Quotient aus lokal erzeugtem Strom und lokal verbrauchtem Strom gebildet. Überschüssige Stromproduktion, die anschließend über Exporte an die benachbarten Kommunen geliefert wird, wirkt sich somit positiv auf die Höhe des bilanziellen Strom-Autarkiegrades für Metzingen aus.

Bedingung ist dabei, dass in 2050 der maximale Strom-Autarkiegrad für Metzingen erreicht wird. Der so definierte Strom-Autarkiegrad lässt sich noch weiter als in den Innovationsszenarien steigern: Metzingen könnte 2050 knapp fünfmal so viel Strom erzeugen wie dort verbraucht wird. Allerdings müssten dafür Bereiche, bei denen es aus Emissions- oder Effizienzgründen sinnvoll erscheint, sie stromgeführt zu betreiben (z. B. Wärmepumpen oder E-Mobilität) auf andere Energielieferanten zurückgreifen. Dadurch ergibt sich bis 2050 ein Endenergieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Ausstoß, der über dem der Innovationsszenarien IM1 bzw. IM2 (aber unter dem des Stagnationsszenarios BAU) liegt, und es zeigen sich höhere Kosten als in den drei vorhergegangenen Szenarien: ca. 95 Mio. Euro pro TJ und Jahr. Der Autarkiegrad bezogen auf die Endenergie liegt in diesem Szenario bei ca. 80 %.

Im Szenario **Endenergie-autarkes Metzingen (EAM)** wird analog zum anderen extremen Autarkieszenario (SAM) die Endenergie-Autarkie maximiert. Dies schließt somit neben den Stromanwendungen nun ebenfalls die Wärme und die Mobilitätsbedarfe in die Berechnung der Importunabhängigkeit ein. Gleichung 5 zeigt die dazugehörige Nebenbedingung für das Energiesystemmodell TEAM.



Endenergie – Autarkiegrad (bilanziell)

Gleichung 5

$$= \frac{\text{Endenergiegewinnung}_{\text{Bilanzraum}}}{\text{Endenergieverbrauch}_{\text{Bilanzraum}}}$$

Durch die sehr starke Nutzung von Biomasse, KWK und Solarthermie kann Metzingen ab dem Jahr 2040 endenergie-autark sein und bis 2050 141 % der benötigten Endenergie auch im Bilanzkreis erzeugen. Da in diesem Szenario mehr Energie über Strom bereitgestellt wird als im Szenario Strom-autarkes Metzingen (SAM) verringert sich im Vergleich zu diesem der Grad der Strom-Autarkie bis 2050 auf ca. 250 % des Bedarfs. Neben den mit Abstand höchsten Kosten (ca. 118 Mio. Euro pro TJ pro Jahr) zeichnet sich dieses Szenario auch durch extrem niedrige CO<sub>2</sub>-Emissionen (Reduktion im Vergleich zu 2012 über 90 %) und den mit Abstand geringsten Endenergiebedarf aus.

#### 4.4 Stromnetzberechnungen

Das für das Strommittelspannungsnetz von Metzingen entwickelte Stromnetzmodell (Abschnitt 2.3.4) wird für die Untersuchung von zwei Fällen genutzt. Zum einen wird der in Metzingen mögliche PV-Zubau unter Berücksichtigung von Netzrestriktionen ermittelt und zum anderen wird ein kostenoptimaler Netzausbau zur Integration des Gesamtpotenzials analysiert.

Für die Berechnung der zubaufähigen PV-Leistung im bestehenden Verteilnetz wurde zunächst ausgehend von einem vorläufigen Dachflächenpotenzial von 71,5 MW<sub>el,p</sub> untersucht, ob sich dieses in das bestehende Verteilnetz integrieren lässt. Das Potenzial für die Integration von dezentralen Erzeugungsanlagen in das Verteilnetz wird über eine optimierende Leistungsflussberechnung quantifiziert. Die zulässigen Spannungsgrenzen und maximalen Stromflüsse werden als Nebenbedingungen in der Optimierung berücksichtigt (Abbildung 51).

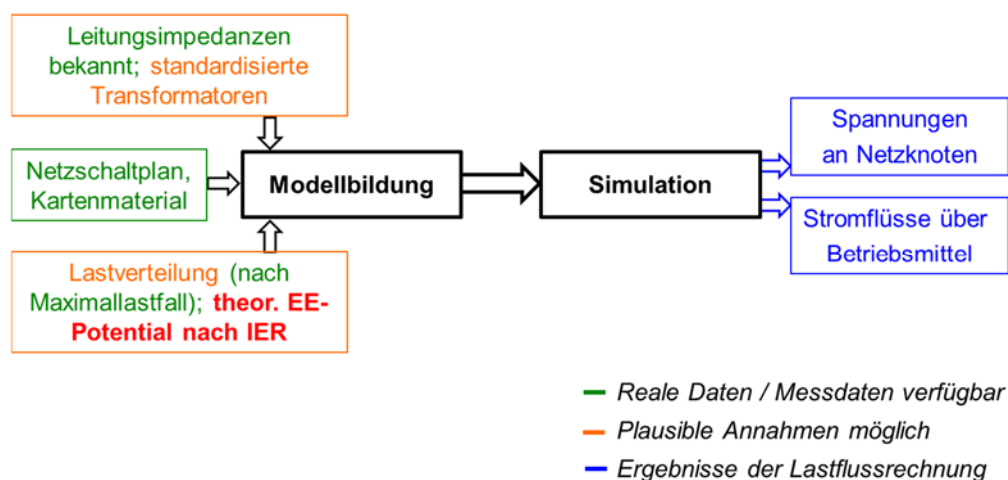


Abbildung 51: Vorgehen zur Ermittlung des integrierbaren PV-Zubaus

Entsprechend der Anforderungen für den Anschluss von Erzeugungsanlagen an das Mittelspannungsnetz ist der zulässige Spannungsanstieg auf maximal 2 % im Vergleich zum Netzzustand ohne dezentrale Einspeisung begrenzt. Da Erzeugungsanlagen mit Anschluss auf der Niederspannungsebene von der Mittelspannungsrichtlinie nicht betroffen sind, ist dieser Grenzwert als konservativ zu betrachten.

Die maximalen Leistungsflüsse ergeben sich aus den zulässigen thermischen Strömen für die betrachteten Erdkabel. Die Einspeiseleistungen der Erzeugungsanlagen sind für jeden einzelnen Netzknoten variabel. Es wird angenommen, dass die Erzeugungsanlagen induktive Blindleistung entsprechend eines  $\cos(\varphi)$  von 0,95 bereitstellen.

Ziel der Optimierung ist die maximal mögliche Einspeisung aus dezentralen Erzeugungsanlagen. Jeder Netzknoten wird einem Stadtquartier zugewiesen. Aus Erfahrungswerten wird für den PV-Zubau eine gewisse Gleichmäßigkeit hinsichtlich der geografischen Verteilung berücksichtigt. Die Gütefunktion wird hierzu um den Variationskoeffizienten erweitert. Gleichung 6 zeigt die Gütefunktion für das Optimierungsproblem zur maximal möglichen Integration von PV-Leistung in das bestehende Verteilnetz unter Berücksichtigung von Netzrestriktionen ohne Netzausbaumaßnahmen.

$$obj = \min \left( \sum_{k=1}^n P_{DG,n} - \frac{\sigma_{P_{DG}}}{E(P_{DG})} * \sum_{k=1}^n P_{DG,n} \right) \quad \text{Gleichung 6}$$

mit  $n = \text{Anzahl Stadtquartiere}$

$P_{DG} = \text{Einspeiseleistung PV je Quartier}$

$\sigma_{P_{DG}} = \text{Standardabweichung der Einspeiseleistungen}$

$E(P_{DG}) = \text{Erwartungswert der Einspeiseleistungen}$

Das Optimierungsproblem wird nach dem nach dem Interior-Point Verfahren in der Software MATLAB® formuliert und gelöst.

Das zuvor beschriebene Verfahren wird nun um die Möglichkeit von Netzausbauoptionen erweitert. So soll ermittelt werden, unter welchen Kosten das Verteilnetz verstärkt werden muss, um das gesamte mögliche PV-Dachflächenpotenzial von 136,3 MW<sub>p,el</sub> integrieren zu können, ohne Spannungs- und Stromgrenzen zu verletzen. Das Vorgehen ist in Abbildung 52 dargestellt.

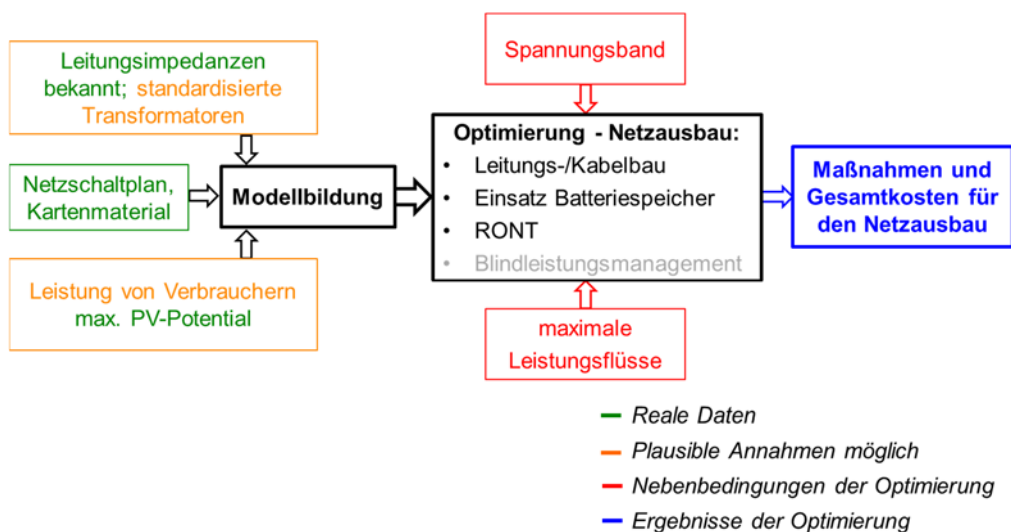


Abbildung 52: Vorgehen zur Ermittlung des kostenoptimalen Netzausbaus zur Integration des Gesamtpotenzials

Für den Netzausbau stehen drei Möglichkeiten zur Verfügung: Leitungs- bzw. Kabelausbau, Einsatz von Batteriespeichern sowie regelbare Ortsnetztransformatoren (RONT). Für alle drei Maßnahmen wurden Annahmen zu Kosten und Lebensdauer getroffen sowie der Einfluss auf die jeweilige kritische Größe bewertet. Als weitere Restriktion geht in die Optimierung ein, dass die maximale Kapazität nach einem Kabelausbau 20 MVA betragen darf, was einer Verdopplung der aktuell verbauten Leitungen entspricht

Die Lösung des Optimierungsproblems mittels eines genetischen Algorithmus liefert die günstigsten Gesamt-Investitionskosten für einen Netzausbau, der notwendig ist, um das Gesamtpotenzial an PV integrieren zu können. Die Validierung des Optimierungsalgorithmus fand anhand eines Benchmark Netzes (Conseil international des grands réseaux électriques (CIGRÉ), 2014) statt.

Für die zwei zuvor vorgestellten Fälle

- Ermittlung des möglichen PV-Zubaus unter Berücksichtigung von Netzrestriktionen
- Kostenoptimaler Netzausbau zur Integration des Gesamtpotenzials

werden im Folgenden die Ergebnisse sowohl der Netzberechnungen als auch der zugehörigen Optimierungsprobleme vorgestellt.

#### 4.4.1 Integrierbares PV Potenzial

Inwieweit sich das ermittelte Dachflächenpotenzial unter Berücksichtigung netzseitiger Restriktionen in Metzingen integrieren lässt, kann durch eine optimierende Leistungsflussrechnung beurteilt werden. Darin werden das technische Potenzial je Stadtquartier, dargestellt in Abbildung 53, und zulässige Stromfluss- und Spannungsgrenzen der Optimierungssoftware als Restriktion übergeben.

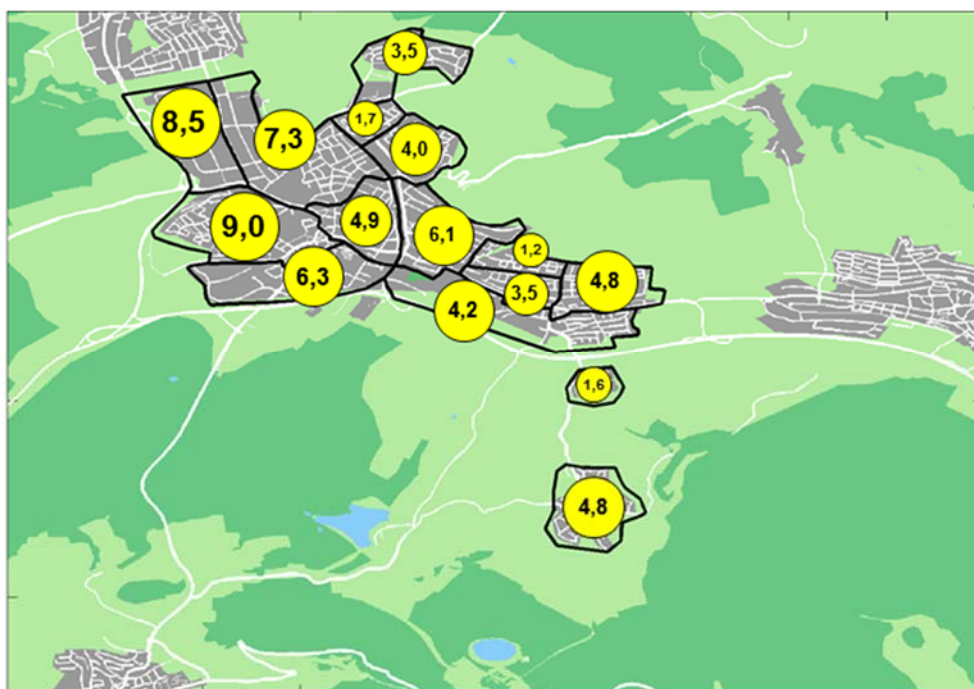
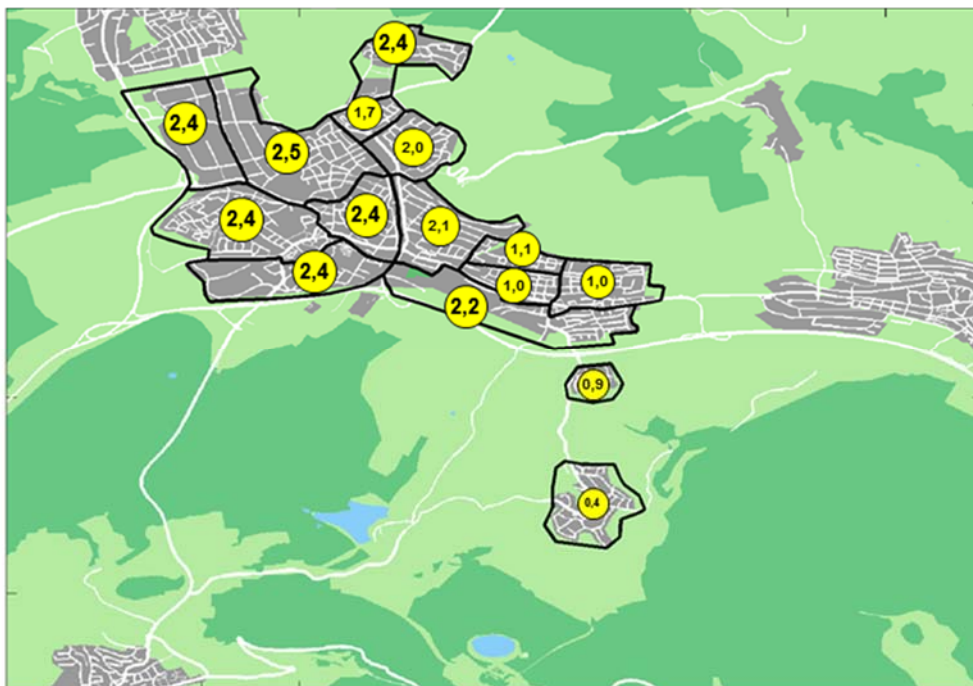


Abbildung 53: Technisches Dachflächenpotenzial in MW je Stadtquartier

Die maximalen Leistungsflüsse ergeben sich aus den zulässigen thermischen Strömen für die betrachteten Erdkabel. Weiterhin wird in der zugrunde liegenden Gleichung 6 über einen Variationskoeffizienten eine Annahme zu einer geografisch etwa gleichmäßigen Verteilung von PV-Anlagen berücksichtigt, da sonst dem Netzanschlusspunkt elektrisch nahe Potenziale vollständig ausgeschöpft würden, wohingegen fernere Stadtquartiere kaum einen Zubau verzeichnen würden.

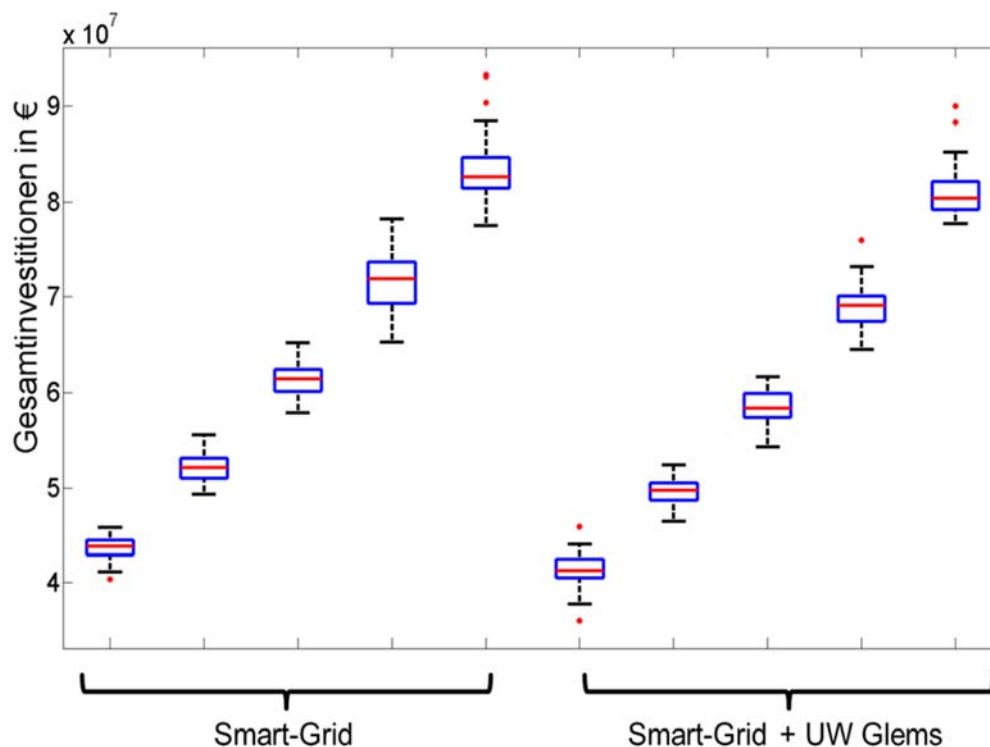
Ausgehend vom theoretisch möglichen Dachflächenpotenzial reduziert sich aus Gründen der Netzsicherheit somit die integrierbare Einspeiseleistung aus PV-Anlagen. Abbildung 54 zeigt das Ergebnis der optimierenden Leistungsflussrechnung. Es zeigt sich, dass sich vor allem dem Netzanschlusspunkt elektrisch ferne Potenziale nur bedingt umsetzen lassen. Insgesamt reduziert sich die aus Netzsicht derzeit zubaufähige PV-Einspeiseleistung auf nun 27,1 MWel,p.



mit einer (n-1)-Sicherheitsrechnung überprüft wurden, um die Betriebsfähigkeit des Netzes bei Ausfall eines Betriebsmittels aufrechterhalten zu können. Da aufgrund der sehr großen Anzahl an möglicher Kombinationen das globale Optimum mittels des genetischen Algorithmus nicht zweifelsfrei ermittelt werden kann, werden für die einzelnen Ausbaustufen jeweils 60 Durchläufe mit einer Population von 1.000 Individuen berechnet und das beste Ergebnis als optimale Lösung angenommen. Abbildung 55 zeigt die detaillierten Ergebnisse der Optimierung hinsichtlich der Gesamtinvestitionen für den Netzausbau.

**Tabelle 28: Ausbaupfade für die dezentrale Erzeugung in Metzingen und Kosten für den Verteilnetzausbau**

Zubau dezentrale Erzeugung		Kosten des Netzausbaus - Gesamtinvestitionen in Mio. €	
in % Gesamtpotenzial	in MW <sub>p</sub>	Smart Grid	Smart Grid + Umspannwerk Glems
50	68,2	40,4	36,1
62,5	85,2	49,3	46,4
75	102,2	57,9	54,3
87,5	119,3	65,2	64,5
100	136,3	77,5	77,7



**Abbildung 55: Gesamtinvestitionen in notwendige Netzausbaumaßnahmen**

Hier wird zunächst wieder unterschieden in das Szenario des aktuellen Netzzustands als Ausgangsszenario und dem zusätzlichen Anschluss an das Umspannwerk Glems. Die fünf Unterszenarien repräsentieren die Ausbaupfade wie in Tabelle 28 beschrieben. Die roten Datenpunkte kennzeichnen im dargestellten Boxplot Diagramm Ausreißer, die Whisker das 1,5-fache des Interquartilsabstands, und die Box

beinhaltet 50 % der aufgetretenen Werte (beschränkt durch unteres und oberes Quartil). Als rote Linie dargestellt ist jeweils der Median der Optimierungsergebnisse. Es zeigt sich, dass bei Betrachtung der jährlichen Gesamtinvestitionen die Ergebnisse des Szenarios Smart Grid + Anschluss an das Umspannwerk Glems die jährlichen Investitionen jeweils niedriger als im Smart Grid Szenario liegen. Schlüsselte man die notwendigen Investitionen in je Szenario besten Ergebnis nach der umgesetzten Technologie auf, ergibt sich die Darstellung in Abbildung 56.

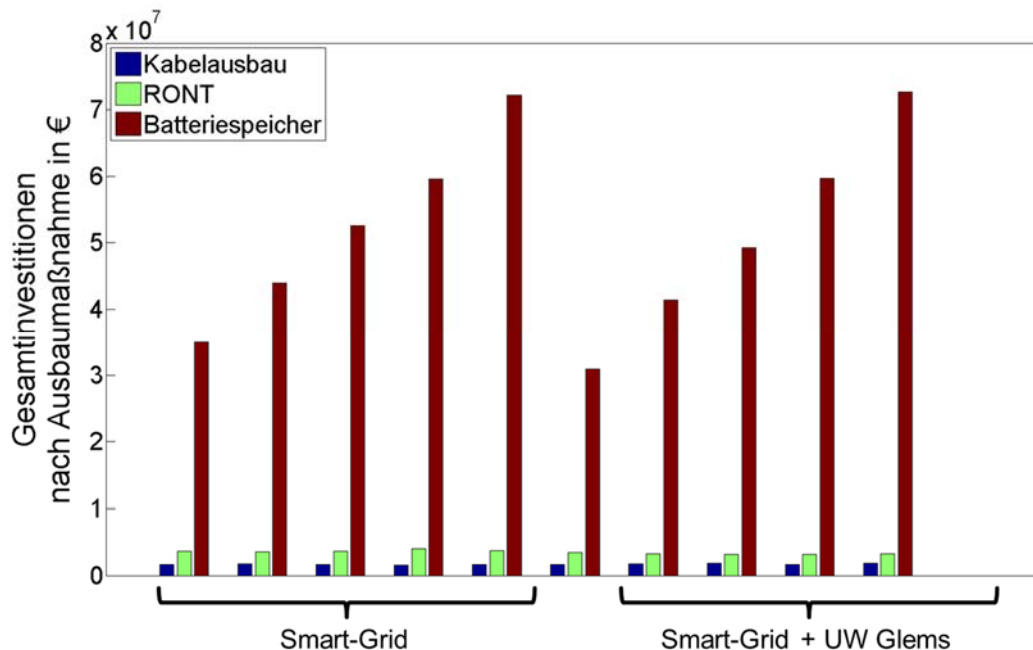


Abbildung 56: Kostenaufschlüsselung nach Technologieoption

In jedem der betrachteten Szenarien verursachen Batteriespeicher dabei den größten Kostenanteil. Die Optionen Kabelausbau und RONT stellen demgegenüber nur einen Bruchteil der Gesamtinvestitionen dar. Nichtsdestotrotz sind in jeder kostenoptimalen Lösung Batteriespeicher notwendig, will man das gesamte theoretische Dachflächenpotenzial an PV-Einspeiseleistung integrieren, da der Kabelausbau im Optimierungsansatz auf die doppelte Scheinleistung der verbauten Erdkabel beschränkt ist.

#### 4.5 Energiesystemmodellierung mit TEAM-Metzingen

Das TIMES Energie-Autarkie Modell TEAM-Metzingen stellt eine Anwendung des TIMES Modells mit dem Schwerpunkt auf der Betrachtung von denjenigen Prozessen dar, die für die Energie-Autarkie auf Stadt- oder Quartiersebene relevant sind. Der Modellierungszeitraum ist von 2012 ist 2050 asymmetrisch zunächst in 3- und anschließend in 5-Jahresschritte eingeteilt und die Optimierung des Technologieeinsatzes sowie der Ausbau bzw. in diesem Beitrag die Sanierungsmaßnahmen erfolgen kostenoptimal und integral (Blesl, 2011). Die Modellierung erfolgt in Form jährlich kumulierter Nutzenergiebedarfe. Auf diese Weise kann eine Abschätzung zur theoretisch möglichen Energie-Autarkie ohne Berücksichtigung der einschränkenden Bedingungen hinsichtlich zeitlicher Divergenzen von Angebot und Nachfrage getroffen werden. Dadurch erfolgt eine Glättung der Last-/Bedarfsspitzen, wodurch das Ergebnis als obere Grenze der Wärmeautarkie des untersuchten Bilanzraumes interpretiert werden kann. Eine Übersicht über das Referenzenergiesystem ist in Abbildung 57 gegeben.



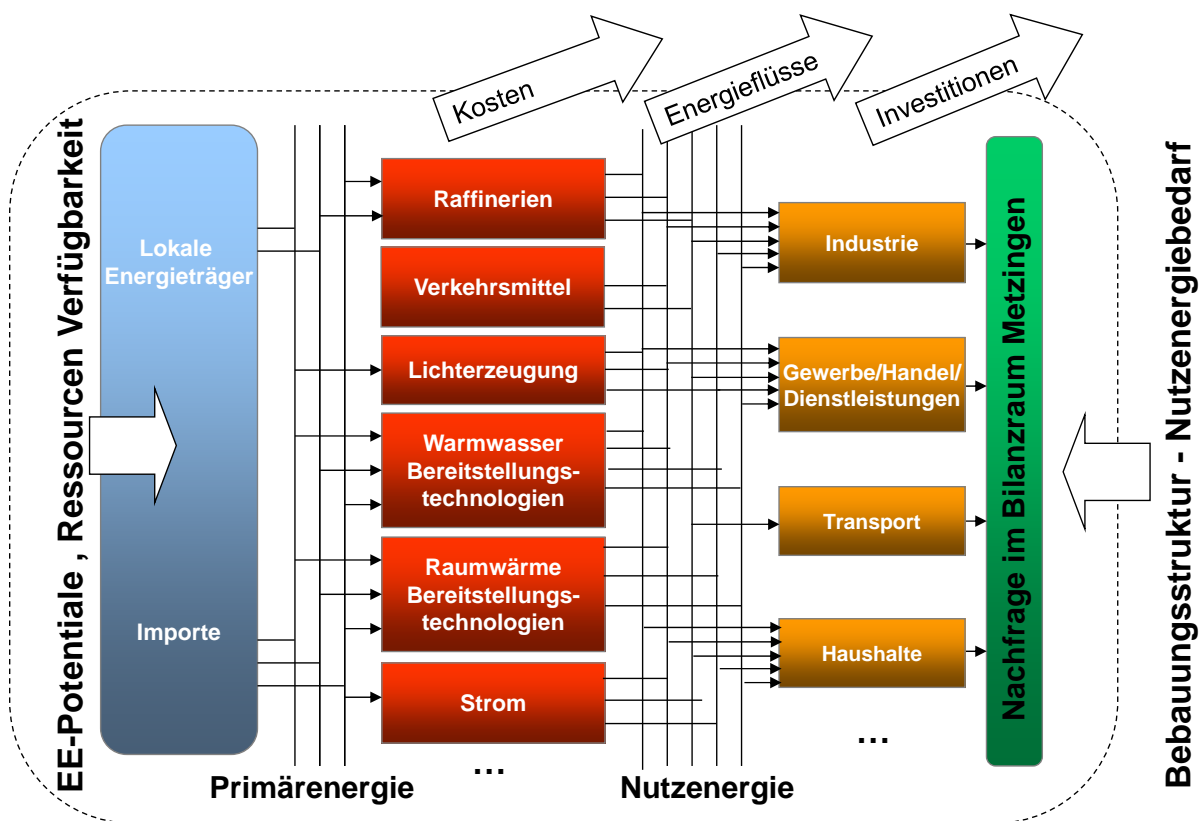


Abbildung 57: Referenzenergiesystem für TEAM-Metzingen (aggregiert)

Die Energienachfrage der privaten Haushalte folgt hier aus dem Bedarf nach Wohnraum in den einzelnen Gebäudekategorien. Die verschiedenen Wohngebäude sind dabei eingeteilt in Bestandsgebäude und Neubauten. Zusätzlich können Bestandsbauten durch Investitionsoptionen in Form von Sanierungspaketen aufgerüstet werden. Die Energieeinsparmöglichkeiten zur Minderung des Raumwärmebedarfs können durch verschiedene Maßnahmen erschlossen werden. Die umsetzbaren energetischen Sanierungsmaßnahmen betreffen dabei hauptsächlich die Dämmung der Fassade und den Ersatz der Fenster durch solche, die den heutigen Maßstäben der Wärmeschutzverglasung entsprechen. Die Reduktion des Warmwasserbedarfs ist dabei zum großen Anteil nur auf die Nutzergewohnheiten zurückzuführen und wird daher an dieser Stelle nicht weiter betrachtet. Ausgehend vom ermittelten Gebäudebestand wurden im Modell vier Gebäude-Modernisierungsoptionen implementiert. Wärmeenergieeinsparpotenziale können durch den verbesserten Wärmeschutz von Fenstern (Sanierungspaket 1), einer energetischen Dachdämmung (Sanierungspaket 2), der zusätzlichen Erneuerung der Außenwanddämmung (Sanierungspaket 3) und dem Einbau einer Kellerdeckendämmung (Sanierungspaket 4) realisiert werden (Born, et al., 2003). Dabei bauen die Maßnahmenbündel aufeinander auf und sind je Gebäudetyp und Alter einzeln definiert. Abbildung 58 stellt exemplarisch für einen Gebäudetyp die Modellstruktur für die Implementierung der Sanierungsmaßnahmen dar.

Der Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen weist einen ähnlichen Modellaufbau auf. Bezüglich der Wärmenachfragen wird zwischen Raumwärme, Warmwasser, Prozesswärme und Raumklimatisierung unterschieden. Zusätzlich findet hier eine Differenzierung nach großen und kleinen Betrieben statt, um die unterschiedlichen Wärmebereitstellungskosten durch z. B. BHKWs abzubilden. Die spezifischen Charakteristika der unterschiedlichen Gebäudegrößen und der damit verbundenen Anlagengrößen in

den unterschiedlichen Anwendungsbereichen werden auf diese Weise abgebildet. Die detaillierte Endenergienachfrage des GHD Sektors wurden dabei nach (Schlommann, et al., Februar 2015) ermittelt, basierend auf den Angaben des Statistischen Landesamtes Baden-Württemberg sowie den Zensusdaten. Eine Erweiterung der Energiebilanz fand durch gezielt gerichtete Fragebögen statt (Schnabel, 2016). Modellseitige Einsparpotenziale ergeben sich durch Sanierungen im GHD Sektor basierend auf (Loga, et al., 2015; Born, et al., 2003).

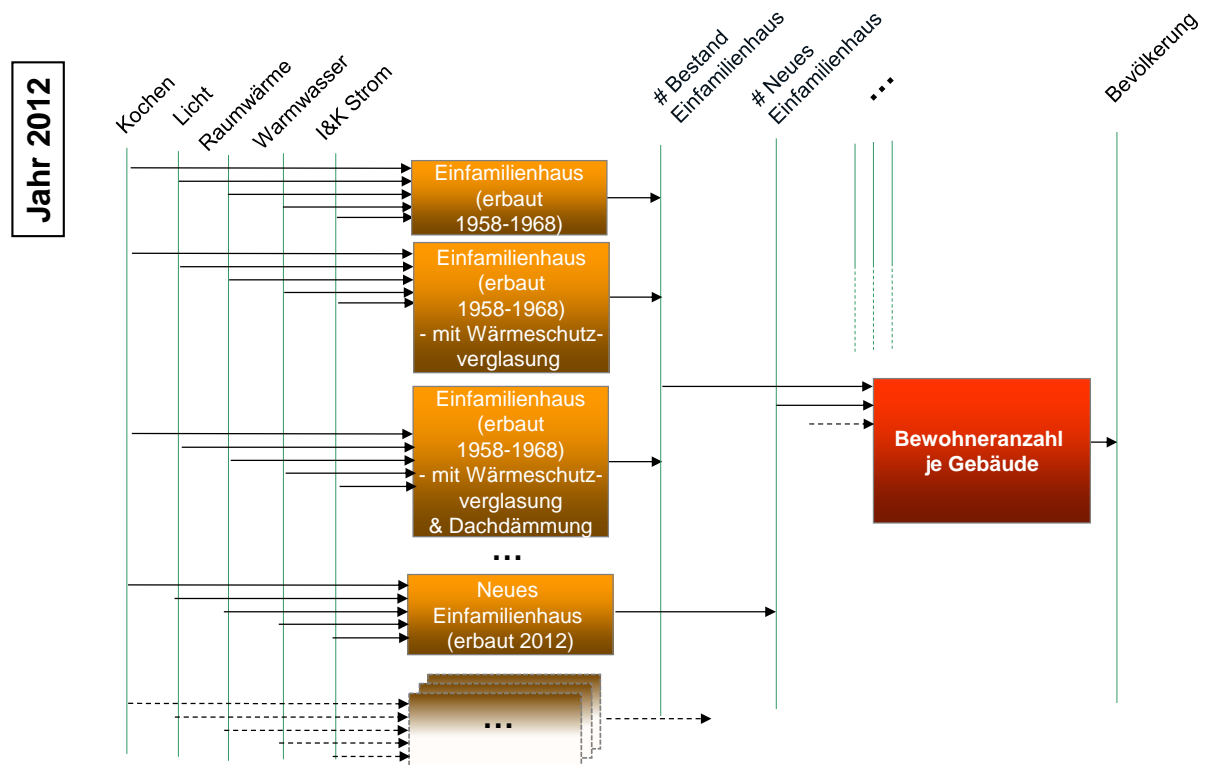


Abbildung 58: Übersicht der Sanierungsmodellierung von Wohngebäuden in TEAM-Metzingen

Die vereinfachte Modellierung des Industrie-Sektors stützt sich auf die Endenergienachfragen aus der städtischen Energiebilanz. Energieeinsparungen durch Effizienzsteigerungen werden für den Industrie-sektor aus (McKane, et al., 2011; Saidur, et al., 2010) entnommen. Durch das Verkaufszentrum Outlet City in Metzingen weist die Stadt eine besondere Verbraucherstruktur auf. Die spezifische Energienachfrage des Outlets unterscheidet sich dabei zum Teil deutlich von der Verbrauchsstruktur des restlichen GHD-Sektors. Vor allem im Bereich der Beleuchtung und Kühlung kommen die Unterschiede zur Geltung. Daher wurde zusätzlich eine Abtrennung des Outlets vom GHD-Sektor innerhalb der Energiesystemmodellierung durchgeführt.

Ausgehend vom Gebäudebestand im Basisjahr wird basierend auf (Schlesinger, et al., 2014) eine Abrissquote von 0,15 % in 2012 gewählt, die bis auf 0,5 % in 2050 linear ansteigt. Dabei zieht die veränderte Gebäudenachfrage zeitgleich eine Anpassung der Nutzenergiebedarfe nach Raumwärme, Warmwasser, Kochen, Licht und Reststrom nach sich. Die Entwicklung der spezifischen pro Kopf Wohnflächennachfrage wird ebenfalls auf Basis von (Schlesinger, et al., 2014) auf den untersuchten Bilanzraum umgelegt. In Verknüpfung mit der Bevölkerungsvorausrechnung der Regionalstatistik des Statistischen Landesamtes Baden Württemberg wird somit die gesamte Wohnraumnachfrage bestimmt. Aus der gesamten Wohnraumnachfrage und der Abrissquote ergeben sich die benötigten Wohnflächen



durch Zubau von Neubauten. Die Verteilung zwischen den unterschiedlichen Gebäudekategorien lehnt sich dabei an die heutige Struktur der Gebäudegrößen in Metzingen an (Schlesinger , et al., 2014). Synchron zur Entwicklung der nachgefragten Wohnfläche des Betrachtungsgebietes findet eine Fortschreibung der Dachflächenpotenziale zur Nutzung von Solarenergie statt. Hierbei werden durch den Gebäudeneubau bedingten neu zu Verfügung stehenden Dachflächen innerhalb der einzelnen Jahre für den PV und Solarthermie Zubau zugelassen. Durch die Abrissquote bedingte Minderung des Dachflächenpotenzials wird ebenfalls berücksichtigt.

Für die Sektoren GHD, Industrie und die öffentlichen Liegenschaften werden ausgehend vom Ist-Zustand im Basisjahr die Entwicklungen des Endenergieverbrauchs je Erwerbstätigem bis 2050 berechnet und auf Metzingen übertragen. Dabei wird die Entwicklung des Endenergieverbrauchs an die Bruttowertschöpfungsprognose für Deutschland gekoppelt (Statistisches Landesamt Baden Württemberg, 2016). Für das Outlet wird zusätzlich im Jahr 2021 ein Ausbau der Verkaufsflächen um 20.000 m<sup>2</sup> implementiert, dessen Zubau zum Zeitpunkt der Berichtsfassung beschlossen wurde.

Die Rahmenbedingungen der mit dem Energiesystemmodell TEAM-Metzingen berechneten Szenarien werden basierend auf der im Vorfeld durchgeführten CIB berücksichtigt. Im Folgenden werden davon die in Abschnitt 4.3.3 beschriebenen fünf Szenarien Stagnierendes Metzingen (BAU), Innovatives Metzingen I (IM1), Innovatives Metzingen 2 (IM2), Strom-autarkes Metzingen (SAM) und Endenergieautarkes Metzingen (EAM) näher betrachtet. Die Vorgaben der Deskriptorenausprägungen werden in der Szenarienauswahl als Input der Optimierung gesetzt.

### **4.5.1 Szenario “Stagnierendes Metzingen - Business as usual (BAU)”**

Das Szenario Stagnierendes Metzingen (BAU) wird als Ausgangspunkt für die konventionelle Entwicklung Metzingens angenommen und die Ergebnisse dienen als Bezugsgröße für weitere Berechnungen. Wie in Kapitel 4.3.2 dargestellt, werden die Rahmenbedingungen des Szenarios Stagnierendes Metzingen (BAU) (siehe Tabelle 29) in das Modell implementiert. Die quantitativen Ausprägungen der Deskriptoren können den Deskriptorenessays im Anhang entnommen werden. Darüber hinaus ist ein Zubau von Gallium-Arsenid Photovoltaik Zellen und von Windkraft im Szenario Stagnierendes Metzingen (BAU) nicht zulässig. Ebenfalls ausgeschlossen wird der Energiepflanzenanbau. Autarkiebestrebungen werden in diesem Szenario nicht berücksichtigt.

Weitere Annahmen betreffen die Entwicklung der Stromerzeugungsstruktur in ganz Deutschland bis 2050, die einen direkten Einfluss auf den Strommixfaktor haben, der für den Strombezug nach Metzingen zu unterstellen ist. Tabelle 30 stellt die Annahmen zum Strommixfaktor dar.

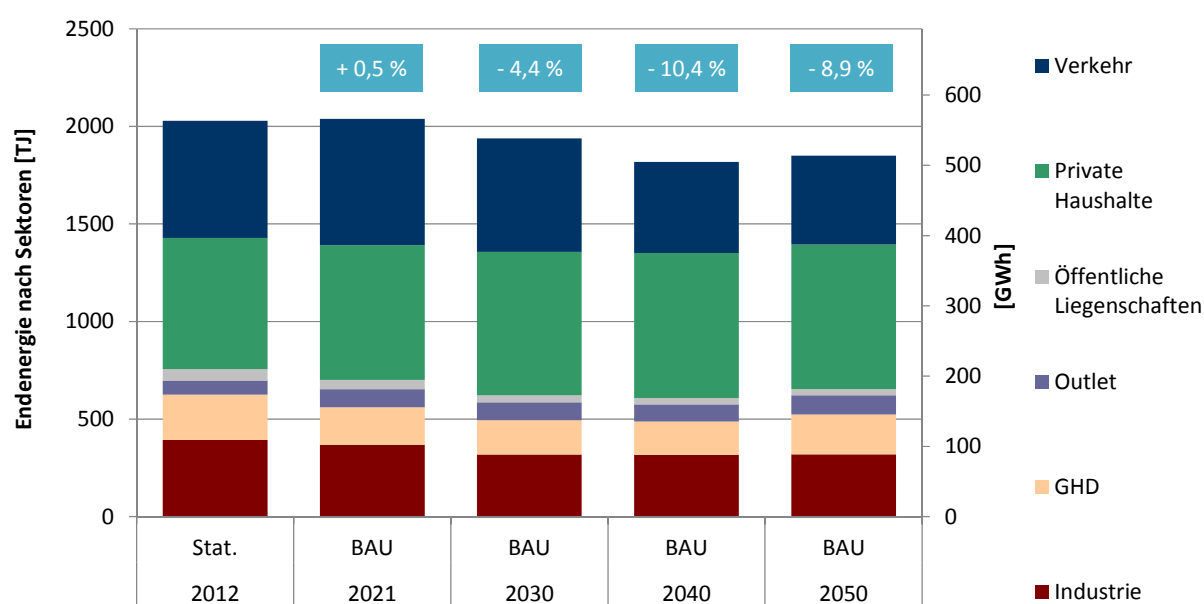
Die Ergebnisse des Szenarios Stagnierendes Metzingen (BAU) hinsichtlich der Entwicklung des Metzinger Endenergieverbrauchs der einzelnen Sektoren von 2012 bis 2050 sind in Abbildung 59 dargestellt. Ausgehend von der Energiebilanz im Jahr 2012 (Statistik - Endenergiebedarf in Höhe von 563 GWh bzw. 2.028 TJ) wird für Metzingen im Szenario Stagnierendes Metzingen (BAU) eine Endenergieverbrauchssenkung um 8,9 % bis zum Jahr 2050 erwartet. Bis 2021 erfolgt eine leichte Steigerung des Endenergiebedarfs, vor allem getrieben durch den zusätzlichen Ausbau des Outlet Centers.

**Tabelle 29: Rahmenbedingungen für das Szenario Stagnierendes Metzgingen (BAU) basierend auf der CIB Analyse**

A.	Akzeptanz in der Bevölkerung	A1	sinkende Akzeptanz
B.	Ausbau des Verteilnetzes	B1	Stand der Technik
C.	Ausbau der Photovoltaik	C1	niedriger Ausbaupfad
D.	Ausbau der Windkraft	D1	niedriger Ausbaupfad
E.	Autarkiegrad Mobilität	E1	bilanzielle Autarkie
F.	Autarkiegrad Strom	F1	bilanzielle Autarkie
G.	Autarkiegrad Wärme	G1	bilanzielle Autarkie
H.	Biomasseimporte	H3	bilanzneutrale Importe
I.	CO <sub>2</sub> -Preise	I2	mittlerer Preispfad
J.	Eigenerzeugung Strom u. Wärme	J1	keine Privilegierung
K.	Energetische Rohstoffpreise	K1	niedriger Preispfad
L.	Sanierungsrate und –tiefe	L1	schwache Effizienzentwicklung
M.	Wirtschaftswachstum	M1	schwaches Wachstum

**Tabelle 30: Annahmen zum Strommixfaktor für das Szenario Stagnierendes Metzgingen (BAU)**

	2012	2021	2030	2040	2050
Strommixfaktor für Metzgingen [t CO <sub>2</sub> /MWh]	0.574	0.460	0.446	0.360	0.223



**Abbildung 59: Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Sektoren in Metzgingen von 2012 bis 2050 (Szenario Stagnierendes Metzgingen (BAU))**

Den höchsten Beitrag zur Reduktion des Endenergiebedarfs steuert der Verkehrssektor bei (ca. 25 % Minderung), gefolgt vom GHD-Sektor (8 % Endenergieverbrauchsrückgang bis 2050). Im Verkehr kann dies auf den Einsatz zukünftig verfügbarer effizienterer Motorentechnik zurückgeführt werden, während bestehende Antriebskapazitäten nach ihrem Lebenszyklus auslaufen. Der unterstellte Bevölkerungszuwachs und die damit verbundene höhere Nutzenergienachfrage kann durch den durch die CIB vorgegebenen Sanierungspfad der Bestandsgebäude und energieeffizienten Neubau nicht vollständig ausgeglichen werden. Durch den Bevölkerungszuwachs und die damit einhergehende Steigerung der beheizten Wohnflächen nimmt der Endenergiebedarf in Haushalten bis 2050 um 10 % zu. Die verbleibenden Sektoren können ihren Endenergieverbrauch nur sehr geringfügig bzw. nicht reduzieren (Industrie, Outlet, kommunale Liegenschaften).

Abbildung 60 zeigt den Endenergieverbrauch nach Energieträgern. Die starke Rolle des Energieträgers Gas ist im Basisjahr ersichtlich, wird aber auch bis zum Jahr 2050 deutlich. Hauptnutzungssektor der Ölprodukte ist der Verkehr.

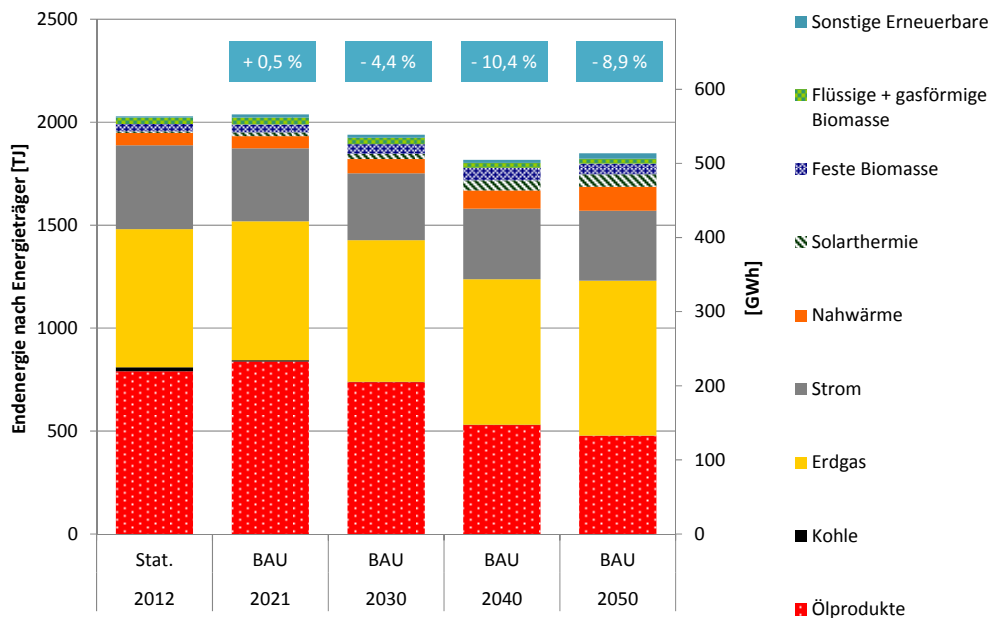


Abbildung 60: Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern in Metzingen von 2012 bis 2050 (BAU Szenario)

Der Zubau von effizienten Wärmepumpen findet in diesem Szenario nur marginal statt. Ausgehend von 5,8 TJ auf Basis von Luft- bzw. Erdwärme (enthalten in „sonstige Erneuerbare“) in 2012 steigt der Endenergieverbrauch dieser Erneuerbaren Energien auf 26,2 TJ. Dies entspricht einem Anteil von 1,4 % am Gesamtendenergieverbrauch in 2050. Die Zuwachsraten von Pelletheizungen („feste Biomasse“) und Solarthermie liegen auf einem vergleichbaren Niveau. Die Bereitstellung von Wärme durch Solarthermie ist dabei maßgeblich durch den nach EnEV geforderten Mindestanteil im Neubau gekoppelt. Der Anteil der solaren Wärme beträgt 3,3 % des Endenergieverbrauchs in 2050. Die Reduktion des Strombedarfs von 400 TJ in 2012 auf 340 TJ in 2050 ist bedingt durch den Einsatz von effizienteren LED Technologien bei der Beleuchtung in Haushalten sowie im GHD/Outlet Sektor. Zusätzlich findet eine kontinuierliche Ausmusterung alter Elektrogeräte (Fernseher, Herde, Belüftungsanlagen) statt.

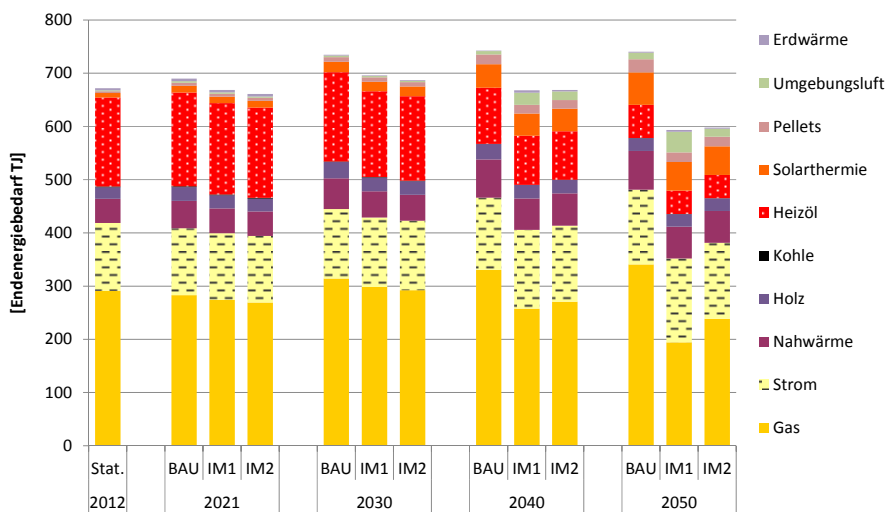
#### 4.5.2 Szenarienvergleich (BAU, IM1, IM2)

Im Folgenden werden die Ergebnisse der beiden Szenarien Innovatives Metzingen I (IM1) und Innovatives Metzingen II (IM2) in Bezug gesetzt zum Szenario Stagnierendes Metzingen (BAU). Aus Tabelle 31 ist zu erkennen, dass die Unterschiede zwischen den Szenarien Innovatives Metzingen I (IM1) und Innovatives Metzingen II (IM2) hauptsächlich im Bereich der CO<sub>2</sub>-Preise und der energetischen Rohstoffpreise liegen. Während im Szenario Innovatives Metzingen I (IM1) mit hohen CO<sub>2</sub>-Preisen und einem niedrigen Preispfad bei den Rohstoffen gerechnet wird, wird im Szenario Innovatives Metzingen II (IM2) von mittleren CO<sub>2</sub>-Preisen und mittleren Rohstoffpreisen ausgegangen. Da sich die beiden Preisbestandteile der Energieträger jeweils ausgleichen (hoch/niedrig im Vergleich zu mittel/-mittel) wird mit ähnlichen Szenarienergebnissen für beide Szenarien (IM1 und IM2) gerechnet.

**Tabelle 31: Rahmenbedingungen für die Szenarien Innovatives Metzingen I (IM1) und Innovatives Metzingen II (IM2) basierend auf der CIB Analyse**

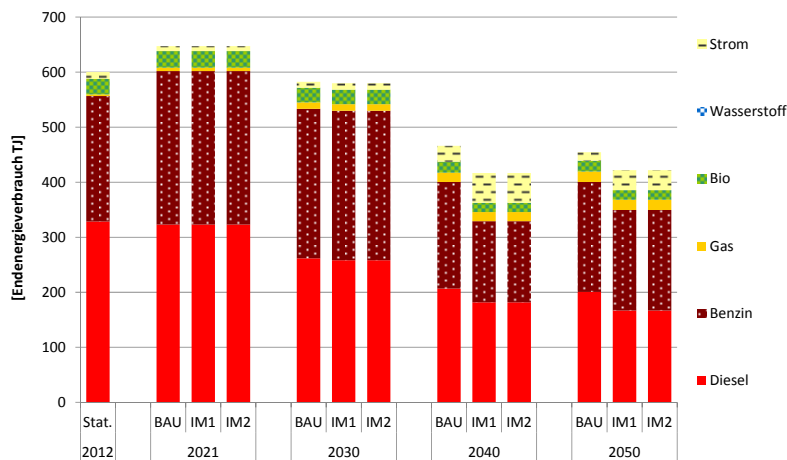
Deskriptor	Ausprägung in Szenario IM1	Ausprägung in Szenario IM2
A. Akzeptanz in der Bevölkerung	A3 steigende Akzeptanz	A3 steigende Akzeptanz
B. Ausbau des Verteilnetzes	B2 Smart Grid Ansatz	B2 Smart Grid Ansatz
C. Ausbau der Photovoltaik	C3 hoher Ausbaupfad	C3 hoher Ausbaupfad
D. Ausbau der Windkraft	D3 hoher Ausbaupfad	D3 hoher Ausbaupfad
E. Autarkiegrad Mobilität	E2 lastgerechte Autarkie	E2 lastgerechte Autarkie
F. Autarkiegrad Strom	F1 bilanzielle Autarkie	F1 bilanzielle Autarkie
G. Autarkiegrad Wärme	G1 bilanzielle Autarkie	G1 bilanzielle Autarkie
H. Biomasseimporte	H3 bilanzneutrale Importe	H3 bilanzneutrale Importe
I. CO <sub>2</sub> -Preise	I3 hoher Preispfad	I2 mittlerer Preispfad
J. Eigenerzeugung Strom u. Wärme	J2 Privilegierung	J2 Privilegierung
K. Energetische Rohstoffpreise	K1 niedriger Preispfad	K2 mittlerer Preispfad
L. Sanierungsrate und -tiefe	L3 starke Effizienzentwicklung	L3 starke Effizienzentwicklung
M. Wirtschaftswachstum	M1 moderates Wachstum	M1 schwaches Wachstum

Abbildung 61 stellt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs der privaten Haushalte in Metzingen im Vergleich der drei Szenarien dar. Zu erkennen ist dabei sowohl eine ähnliche Entwicklung beim Gesamtenergieverbrauch als auch bei der Struktur der Energieträger zwischen den Szenarien Innovatives Metzingen I (IM1) und Innovatives Metzingen II (IM2). Die Reduktion des Gesamtenergieverbrauchs von 2012 bis 2050 um ca. 11 % auf 595 TJ beim Szenario Innovatives Metzingen I (IM1) bzw. 598 TJ beim Szenario Innovatives Metzingen II (IM2) sind auf Sanierungsmaßnahmen (-32,7 TJ Raumwärme) bei zunehmender Wohnflächennachfrage und auf Effizienzgewinne bei der Beleuchtung (-8,3 TJ) zurückzuführen. Die verbleibenden Endenergieeinsparungen basieren auf Effizienzgewinnen bei der Erzeugungstruktur der Raumwärme und der Warmwasserversorgung.



**Abbildung 61: Entwicklung des Endenergieverbrauchs privater Haushalte nach Energieträgern in Metzingen von 2012 bis 2050 (Vergleich der Szenarien basierend auf der CIB Analyse)**

Im Verkehrssektor können bis 2050 Einsparungen in Höhe von 34,4 % im Vergleich zu 2012 erzielt werden (Abbildung 62). Die bis 2021 zunächst steigende Endenergienachfrage in diesem Sektor wird durch das Bevölkerungswachstum getrieben. Insgesamt kommen in den Szenarien Innovatives Metzingen I (IM1) und Innovatives Metzingen II (IM2) vermehrt moderne Verbrennungsmotoren zum Einsatz. Eine deutliche Änderung der Fahrzeugstruktur ist jedoch nicht zu erkennen. Vor allem die Elektromobilität findet nur geringe zusätzliche Anwendung im Vergleich zu 2012.



**Abbildung 62: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor nach Energieträgern in Metzingen von 2012 bis 2050 (Vergleich der Szenarien basierend auf der CIB Analyse)**

Abbildung 63 und Abbildung 64 stellen den Gesamtendenergieverbrauch bzw. den Gesamtprimärenergieverbrauch bis 2050 dar. Die Endenergieeinsparungen der Szenarien Innovatives Metzingen I (IM1) und Innovatives Metzingen II (IM2) im Vergleich zum Szenario Stagnierendes Metzingen (BAU) betragen zusätzliche 9,6 %. Während im Szenario Stagnierendes Metzingen (BAU) nur in geringem Maße Effizienzgewinne im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) und im Industrie-Sektor bis 2050 realisiert werden, wird in den Szenarien Innovatives Metzingen I (IM1) und Innovatives Metzingen II (IM2) bis 2050 24,4 % weniger Endenergie in diesen Sektoren verbraucht als in 2012. Im Szenario Stagnierendes Metzingen (BAU) beträgt die Einsparung 9 % bis 2050.

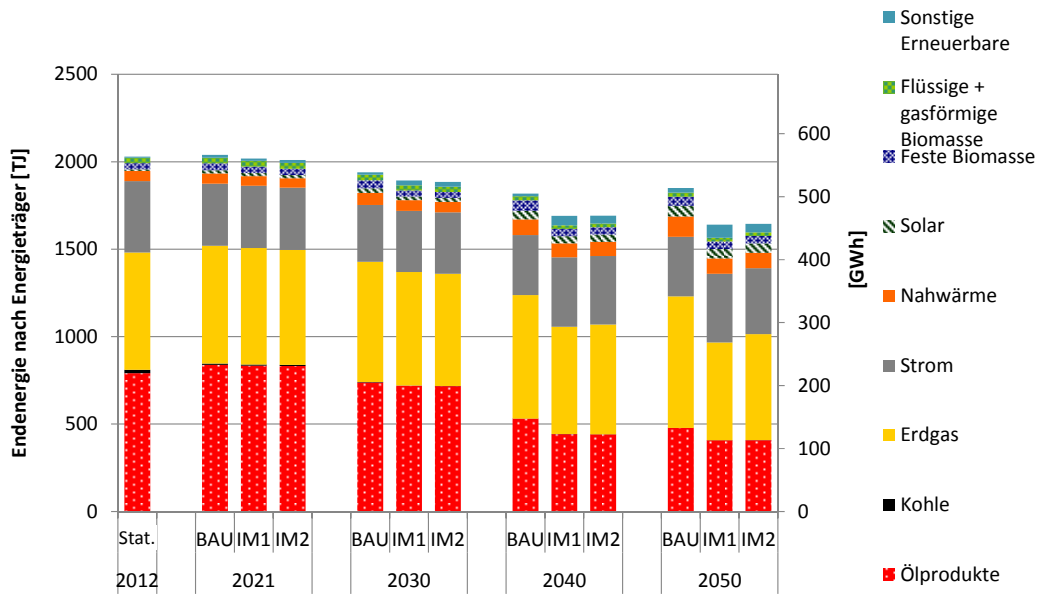


Abbildung 63: Entwicklung des Gesamtenergieverbrauchs nach Energieträgern in Metzings von 2012 bis 2050 (Vergleich der Szenarien basierend auf der CIB Analyse)

Abbildung 64 macht deutlich, wie stark der Zubau der Erneuerbaren Energien durch die Vorgaben der Deskriptoren der Cross-Impact-Bilanzanalyse (CIB) gefördert wird.

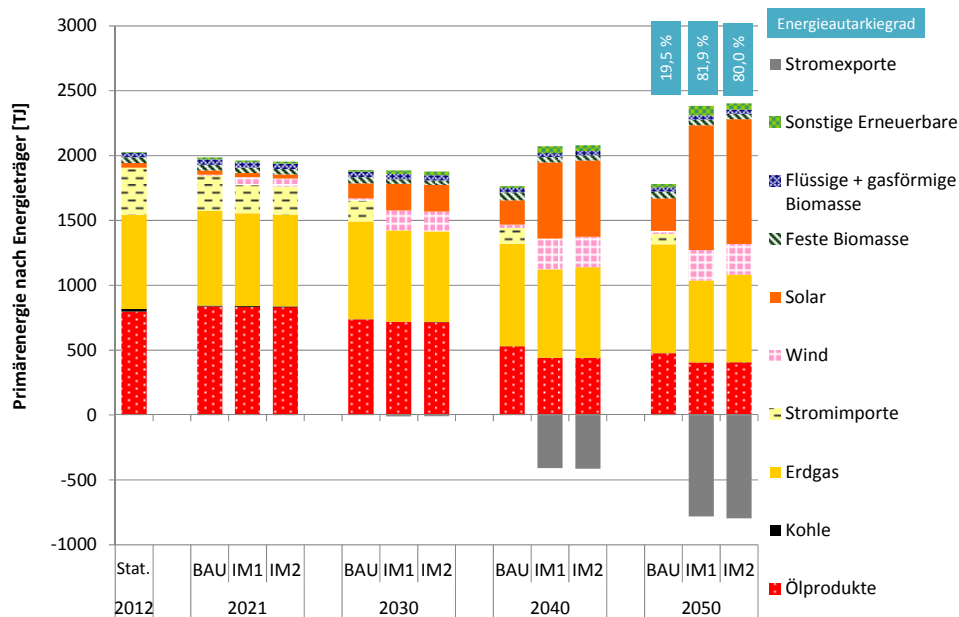
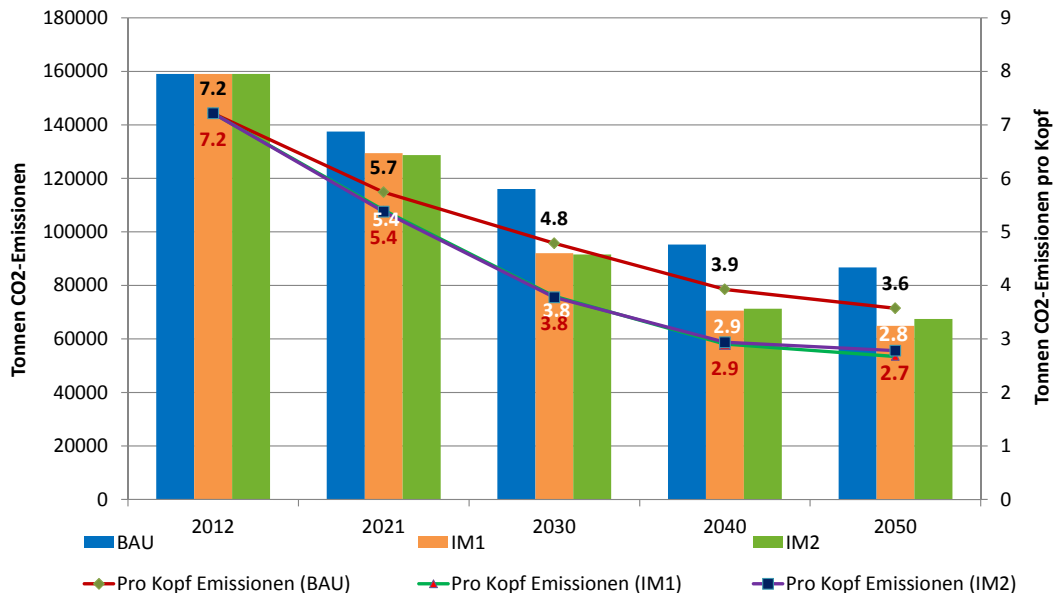


Abbildung 64: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs nach Energieträgern in Metzings von 2012 bis 2050 (Vergleich der Szenarien basierend auf der CIB Analyse)

In den Szenarien Innovatives Metzings I (IM1) und Innovatives Metzings II (IM2) werden bis zum Jahr 2050 Solarerträge in der Höhe von 960 TJ gewonnen (53 TJ durch Solarthermie und 908 TJ durch Photovoltaik). Zusätzlich werden 235 TJ aus Windkraftanlagen im Jahr 2050 gewonnen. Während im Basisjahr die Biomasse und die Wasserkraft noch einen Anteil von 69 % der Erneuerbaren Energien in Metzings ausmachen, tragen diese in 2050 nur noch einen geringen Anteil zu der Bereitstellung aus Erneuerbaren Energien insgesamt bei (0,6 %). Überschüssiger Strom wird aus Metzings exportiert, was zu einer im Vergleich zum Basisjahr starken Aus- und Belastung der Verteilnetze führt.

Um einen Eindruck über die Auswirkungen auf den lokalen Klimaschutz zu gewinnen, werden im Folgenden die CO<sub>2</sub>-Emissionen in Metzingen betrachtet. Abbildung 65 stellt dabei die gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050 sowie die Entwicklung des Pro-Kopf Ausstoßes dar.



**Abbildung 65: Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Metzingen von 2012 bis 2050 (Vergleich der Szenarien basierend auf der CIB Analyse)**

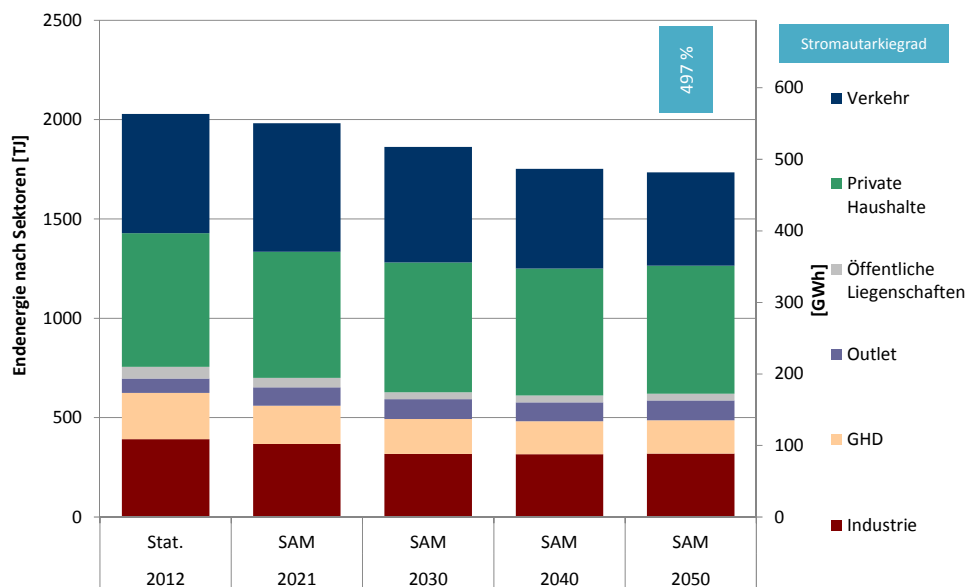
Es wird deutlich, dass trotz der steigenden Bevölkerung bis 2030 die absoluten Emissionen in allen Szenarien abnehmen. Dabei spielen zum einen die Effizienzgewinne durch moderne Technologien in den einzelnen Sektoren eine Rolle und zum anderen der Wechsel von emissionsstarken zu umweltfreundlicheren Energieträgern, was z. B. an der überproportionalen Abnahme der Ölprodukte im Vergleich zum Erdgas zu beobachten ist. Entscheidender jedoch ist die Bilanzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen für den verbrauchten Strom, dessen Emissionsfaktor auf Tabelle 30 basiert. Dabei nehmen sowohl die verursacherbezogenen Emissionen des importierten Stroms bis 2050 ab (dem Ausbau der Erneuerbaren Energien in Deutschland geschuldet), als auch der lokale Ausbau der Windenergie und der Photovoltaik trägt zur Gesamtreduktion bei. Bis 2050 emittiert der durchschnittliche Metzinger Bürger im Szenario Stagnierendes Metzingen (BAU) 3,6 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr. Mithilfe der zusätzlichen Entwicklung in den Szenarien Innovatives Metzingen I (IM1) und Innovatives Metzingen II (IM2) kann dieser Wert auf 2,8 t CO<sub>2</sub> bzw. 2,7 t CO<sub>2</sub> pro Kopf und Jahr reduziert werden.

### 4.5.3 Extreme Autarkieszenarien

Im Folgenden werden die Auswirkungen einer maximalen Energie-Autarkie in Metzingen auf das lokale Energiesystem untersucht. Dabei werden zum einen die vorgegebenen Deskriptoren aus der Cross-Impact-Bilanzanalyse (CIB) verwendet, zum anderen werden zusätzliche Autarkie-Nebenbedingungen in das Energiesystemmodell TEAM-Metzingen implementiert, die den Austausch mit dem umliegenden restlichen Energiesystem außerhalb von Metzingen einschränken.

Im Szenario Strom-autarkes Metzgingen (SAM) wird zunächst die Autarkie im Strombereich maximiert und als zweites Kriterium wird die Kostenoptimierung herangezogen. Die Vorgaben der CIB zum Ausbau der Erneuerbaren Energien sowie zu den Sanierungspfaden werden nun nicht mehr implementiert und der freien Optimierung überlassen. Die vorgegebene Preisstruktur der CO<sub>2</sub>-Emissionen und der Energieträger orientiert sich nun an den Vorgaben aus dem Szenario Innovatives Metzgingen II (IM2). Die Berechnung des bilanziellen Strom-Autarkiegrade erfolgt nach Gleichung 2 bzw. Gleichung 3.

In Abbildung 66 ist die Entwicklung des Metzinger Endenergieverbrauchs der einzelnen Sektoren für das Szenario Strom-autarkes Metzgingen (SAM) dargestellt. Dabei wird ein Strom-Autarkiewert von 497 % in 2050 erreicht. Die Optimierung weist einen fünfmal höheren Wert aus als zur Deckung der eigenen Stromnachfrage benötigt wird.



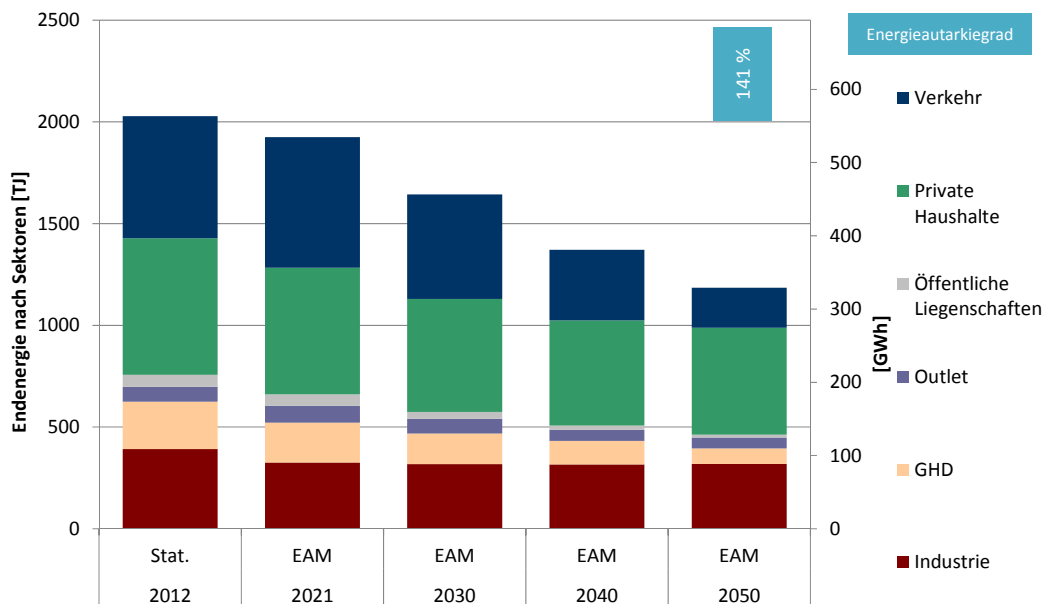
**Abbildung 66: Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Sektoren in Metzgingen von 2012 bis 2050 (Szenario Strom-autarkes Metzgingen (SAM))**

Der gesamte Endenergieverbrauch in 2050 liegt mit 1675 TJ auf einem vergleichbaren Niveau wie in den zuvor dargestellten Szenarien Innovatives Metzgingen I (IM1: 1622 TJ) bzw. Innovatives Metzgingen II (IM2: 1626 TJ). Die höchsten Einsparpotenziale weisen ähnlich wie in den Szenarien Innovatives Metzgingen I (IM1) und Innovatives Metzgingen II (IM2) die privaten Haushalte sowie der Verkehrssektor auf. Die Maximierung der Strom-Autarkie erfolgt zum einen durch die Maximierung der Stromgewinnung innerhalb des Bilanzraumes mithilfe von PV oder Windkraftanlagen und zum anderen durch die Minimierung des Stromverbrauchs (siehe Gleichung 3). Dies führt dazu, dass Bereiche, bei denen es aus Emissions- oder Effizienzgründen sinnvoll erscheint, sie stromgeführt zu betreiben (z. B. Wärmepumpen oder E-Mobilität) auf andere Energieträger zurückgreifen. Wird nun der gesamte Endenergie-Autarkiegrad im Szenario Strom-autarkes Metzgingen (SAM) betrachtet, so ergibt sich lediglich ein Wert von 80 %. Zu erklären ist dies mit einem hohen Anteil von Stromexporten, die sich positiv auf den Stromautarkiegrad auswirken, jedoch keinen Beitrag zur Erhöhung der „Importunabhängigkeit“ von Energieträgern leisten, die hauptsächlich zur Wärmebedarfsdeckung genutzt werden.

Im Szenario Endenergie-autarkes Metzgingen (EAM) wird analog zum Strom-autarken Extremszenario die Endenergie-Autarkie maximiert. Abbildung 67 stellt den sektoralen Endenergieverbrauch für das



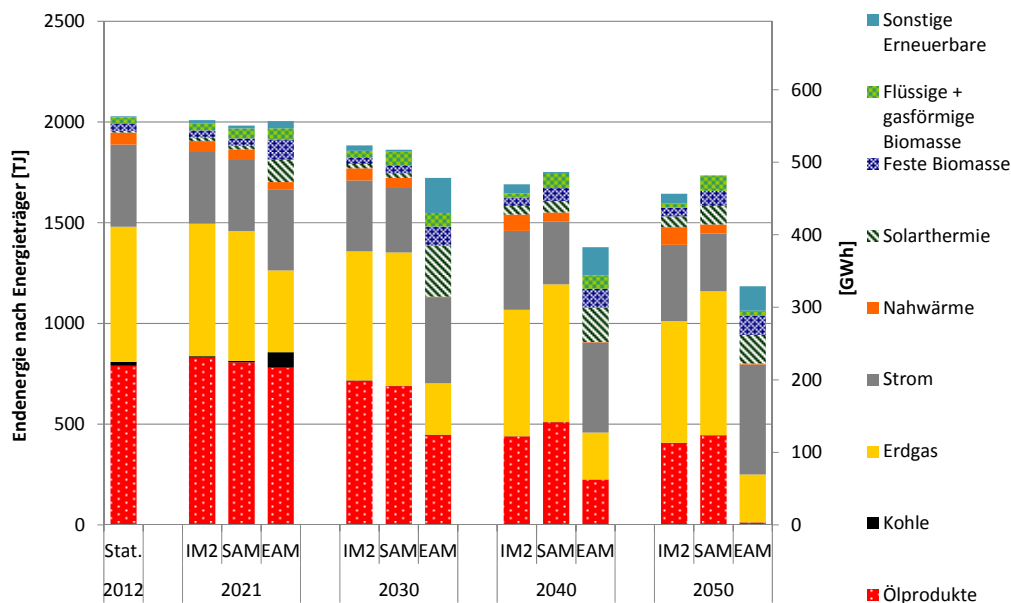
Szenario Endenergie-autarkes Metzinger (EAM) bis 2050 dar. Deutlich wird die im Vergleich zum Szenario Strom-autarkes Metzinger (SAM) hohe Endenergieeinsparung bis 2050. Am stärksten betroffen ist hierbei der Verkehrssektor, dessen Endenergiebedarf auf ca. 33 % des Ausgangszustandes im Jahr 2012 sinkt. Der Endenergie-Autarkiegrad beträgt in 2050 für Metzinger 141 %. Es wird somit mehr Endenergie gewonnen, als zur Deckung der internen Nachfrage im Bilanzraum Metzinger benötigt wird. Bereits im Jahr 2040 kann das Ziel der bilanziellen endenergetischen Unabhängigkeit in diesem Szenario erreicht werden. Nach 2040 erfolgt somit bis 2050 eine Maximierung der energetischen Bilanzraumexporte.



**Abbildung 67: Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Sektoren in Metzinger von 2012 bis 2050 (Szenario Endenergie-autarkes Metzinger (EAM))**

Um die Ergebnisse vergleichbar zu den vorherigen Szenarien (Stagnierendes Metzinger (BAU), Innovatives Metzinger I (IM1), Innovatives Metzinger II (IM2)) darzustellen, wird als Vergleichsszenario das Szenario Innovatives Metzinger II (IM2) gewählt. Abbildung 68 stellt den Endenergieverbrauch nach Energieträgern der extremen Autarkieszenarien im Vergleich zum Szenario Innovatives Metzinger II (IM2) dar. Zu erkennen ist eine ähnliche Tendenz hinsichtlich der Energieträgerwahl zwischen dem Szenario Innovatives Metzinger II (IM2) und dem Szenario Strom-autarkes Metzinger (SAM) mit Ziel der Maximierung der Strom-Autarkie. In beiden Szenarien werden das Erdgas und die Ölprodukte (Heizöl sowie Kraftstoffe) bis 2050 genutzt. Im Szenario Strom-autarkes Metzinger (SAM) vergrößert sich sogar der Anteil des verbrauchten Erdgases um 35 TJ im Vergleich zu 2012 (725 TJ). Die Nutzung von Ölprodukten nimmt im Szenario Strom-autarkes Metzinger (SAM) im Vergleich zu 2012 um 44 % ab (445 TJ in 2050), liegt jedoch oberhalb des Wertes des Szenarios Innovatives Metzinger II (IM2) (+37 TJ im Vergleich zu IM2 in 2050). Dies ist auf die Vermeidung der Nutzung von stromgeführten Anwendungen im Szenario Strom-autarkes Metzinger (SAM) zurückzuführen. Ebenfalls höher fällt die Nachfrage nach auf Biomasse basierenden Energieträgern im Szenario Strom-autarkes Metzinger (SAM) aus. Im Vergleich dazu erfolgt eine starke Veränderung der Energieträgerstruktur im Szenario Endenergie-autarkes Metzinger (EAM). Durch die ganzheitliche Optimierung der Autarkie über alle Bereiche und somit alle Energieträger erfolgt eine verstärkte Nutzung von strombetriebenen Anwendungen auf Kosten konventioneller Möglichkeiten. Dies betrifft z. B. die Ölprodukte, auf die bis 2050

fast vollständig verzichtet wird oder die steigende Nutzung der sonstigen Erneuerbaren Energien (Luft- und Erdwärme in Wärmepumpen).



**Abbildung 68: Entwicklung des Gesamtendenergieverbrauchs nach Energieträgern in Metzingen von 2012 bis 2050 (Vergleich der extremen Autarkieszenarien (SAM, EAM) mit dem Szenario Innovatives Metzingen II (IM2))**

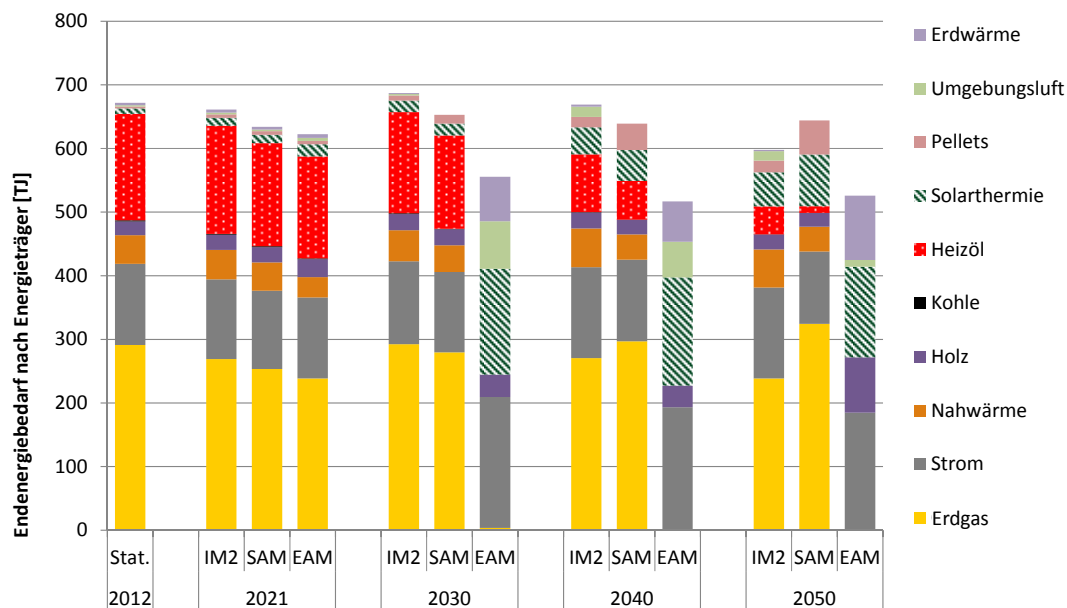
Zu erkennen ist, dass sich der Endenergieverbrauch im Bilanzraum Metzingen für das Szenario Innovatives Metzingen II (IM2) und für das Szenario Strom-autarkes Metzingen (SAM) nur leicht voneinander unterscheiden. Der Mehrverbrauch im Szenario Innovatives Metzingen II (IM2) beträgt 49 TJ bzw. 3 % in 2050. Im Vergleich dazu sinkt der Endenergieverbrauch im Szenario Endenergie-autarkes Metzingen (EAM) auf 1108 TJ und beträgt somit 54 % des Ausgangszustandes im Jahr 2012. Deutlich wird auch, dass vor allem die Maximierung des Endenergie-Autarkiegrades zu einer merkbaren Verringerung der Endenergienachfrage führt.

Im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) reduziert sich der Endenergieverbrauch im Szenario Strom-autarkes Metzingen (SAM) bis 2030 um 20 % gegenüber 2012. Den größten Beitrag leisten dabei die umgesetzten Sanierungen, die zu einem verringerten Raumwärmebedarf führen, sowie Effizienzverbesserungen der Heizungssysteme. Im Vergleich zum Szenario Innovatives Metzingen II (IM2) nimmt der Bedarf an Erdgas um 48 % zu. Vor allem durch den Einsatz von KWK-Anlagen aber z. B. auch durch die verstärkte Nutzung von Gas zu Kochzwecken steigt die Erdgasnachfrage im Szenario Strom-autarkes Metzingen (SAM). Grund hierfür ist die Substitution der auf Strom basierenden Bereitstellung von Nutzenergie (Kochen, Raumwärme, Warmwasser) durch entsprechende Alternativen zur Maximierung der Strom-autarkie. Der Anteil von Strom am Endenergieverbrauch reduziert sich somit. Dies ist vor allem auf den sinkenden Stromverbrauch zur Raumwärme- und Warmwassererzeugung zurückzuführen. Zu beobachten ist vor allem ein Verzicht auf Wärmepumpen und elektrische Warmwassererzeuger bei gleichzeitiger Erhöhung der Eigenstromproduktion durch gasbetriebene KWK-Anlagen.

In der Industrie finden Effizienzsteigerungen in den Szenarien Strom-autarkes Metzingen (SAM) und Endenergie-autarkes Metzingen (EAM) im Vergleich zum Szenario Innovatives Metzingen II (IM2) früher statt, gleichen sich jedoch ab dem Jahr 2030 einander an. Insgesamt sind die Effizienzgewinne in der Industrie für den betrachteten Bilanzraum Metzingen, verglichen zu anderen Sektoren, gering. In

erster Linie findet eine Substitution von ölbetriebenen durch gasbetriebene Kessel statt. Zusätzlich erfolgt ab 2030 eine vollständige Verdrängung der Kohlenachfrage. Eine Umstellung der Energienachfragestruktur der Industrie auf Erneuerbare Energien ist prozessbedingt nur in sehr geringem Maße umsetzbar. Insgesamt liegt die Endenergienachfrage in der Industrie in den vorliegenden Simulationen 19 % niedriger verglichen zum Basisjahr 2012.

Bei den privaten Haushalten sind vor allem die Entwicklung der Bevölkerung und der zu beheizenden Wohnfläche ausschlaggebend für den Endenergieverbrauch. Die Statistik geht von einem Wachsen der Bevölkerung aus, von 22.036 Einwohnern im Jahr 2012 auf 24.275 im Jahr 2050. Abbildung 69 stellt die resultierende Entwicklung des Gesamtendenergieverbrauchs der privaten Haushalte nach Energieträgern in Metzingen von 2012 bis 2050 im Vergleich der Szenarien dar.

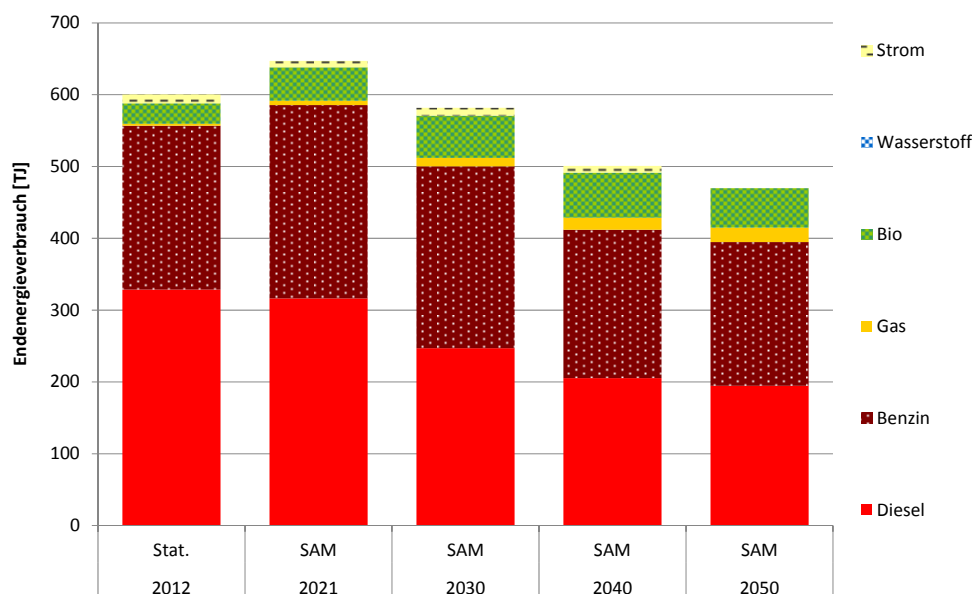


**Abbildung 69: Entwicklung des Gesamtendenergieverbrauchs der privaten Haushalte nach Energieträgern in Metzingen von 2012 bis 2050 (Vergleich der extremen Autarkieszenarien (SAM, EAM) mit dem Szenario Innovatives Metzingen II (IM2))**

Der Endenergieverbrauch der privaten Haushalte bleibt bis 2030 nahezu konstant im Szenario Innovatives Metzingen II (IM2) und sinkt bis 2050 um 11 % bezogen auf 2012, trotz der Zunahme der Wohnfläche um 31 %. Im Szenario Strom-autarkes Metzingen (SAM) nimmt der Endenergieverbrauch in 2050 hingegen nur um 4,1 % gegenüber 2012 ab. Im Szenario Endenergie-autarkes Metzingen (EAM) werden die höchsten Einsparungen in Höhe von 22 % verglichen zu 2012 erzielt. Die Einsparungen sind im Wesentlichen auf die Verstärkung des Wärmeschutzes bei Neubauten und auf Sanierungen von Altbauten zurückzuführen. Der Anteil von Heizöl am Energiemix geht zwischen 2012 und 2050 in allen drei Szenarien deutlich zurück von 25 % auf circa 7 % im Szenario Innovatives Metzingen II (IM2) und gar 2 % im Szenario Strom-autarkes Metzingen (SAM). Der Erdgasanteil bleibt hingegen mit 40 % (Szenario Innovatives Metzingen II (IM2)) nahezu stabil bzw. nimmt mit bis 50 % (Szenario Strom-autarkes Metzingen (SAM)) bis 2050 sogar zu. Die fossilen Energieträger Erdgas und Heizöl werden beide im Szenario Endenergie-autarkes Metzingen (EAM) vollständig durch Erneuerbare Energien und alternative Energieträger ersetzt. Vor allem die Solarthermie mit 142 TJ und die durch Wärmepumpen gewonnene Erdwärme mit 101 TJ tragen zum Endenergieverbrauch bei. Der Stromverbrauch der Haushalte steigt im Szenario Endenergie-autarkes Metzingen (EAM) von 2012 bis 2050 um 45 %. Der spezifische Verbrauch vieler Elektrogeräte reduziert sich durch wachsende Effizienz, jedoch kommt es vor

allem durch die zunehmende Geräteausstattung der Haushalte im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik und den vermehrten Einsatz elektrischer Wärmepumpen zu Steigerungen des Stromverbrauchs.

Neben den privaten Haushalten stellt der Verkehrssektor den größten Anteil am Endenergieverbrauch in Metzingen. Abbildung 70 stellt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor nach Energieträgern von 2012 bis 2050 für das Szenario Strom-autarkes Metzingen (SAM) dar. Dieser sinkt ab dem Jahr 2021 kontinuierlich um circa 22 % bis zum Jahr 2050 verglichen zum Ausgangsjahr. Die auf Mineralöl basierenden Kraftstoffe Diesel und Benzin dominieren die Energieträgerstruktur und repräsentieren im Jahr 2050 noch 84 % des Endenergieverbrauchs. Der Anteil von Erdgas und Flüssiggas am Endenergieverbrauch des Verkehrssektors nimmt kontinuierlich auf 4,3 % im Jahr 2050 zu. Der Biokraftstoffverbrauch entwickelt sich gemäß der gesetzlichen Mindestquote. Zusätzlich kommen vermehrt Biodiesel- und Ethanol- bzw. Flexfuel-Fahrzeuge zum Einsatz, so dass in den Jahren 2030 und 2050 der Biokraftstoffanteil am Otto- und Dieselmotorkraftstoffabsatz 14,8 % beträgt.



**Abbildung 70: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor nach Energieträgern in Metzingen von 2012 bis 2050 (Szenario Strom-autarkes Metzingen (SAM))**

Die Entwicklung der Endenergienachfrage im Verkehrssektor spiegelt sich auch in den Fahrzeugkapazitäten des Szenarios Strom-autarkes Metzingen (SAM) wider (Abbildung 71). Zu erkennen ist dabei, dass durch das bedingte Strom-Autarkieziel nur sehr geringfügig bzw. im Jahr 2050 keine Elektromobilität genutzt wird. Grund dafür ist die Reduzierung des Strombedarfs, die eine Verlagerung hin zu anderen Antriebskonzepten fördert (Ethanol, Biodiesel – siehe unter „andere“). Der zunehmende Verlauf der Anzahl der Fahrzeuge ist auf die wachsende Metzinger Bevölkerung bis 2050 sowie einen Anstieg der gesamten Mobilitätsnachfrage zurückzuführen. Wasserstofffahrzeuge kommen aufgrund der hohen Investitionskosten und den anfallenden Infrastrukturkosten nicht zum Einsatz.

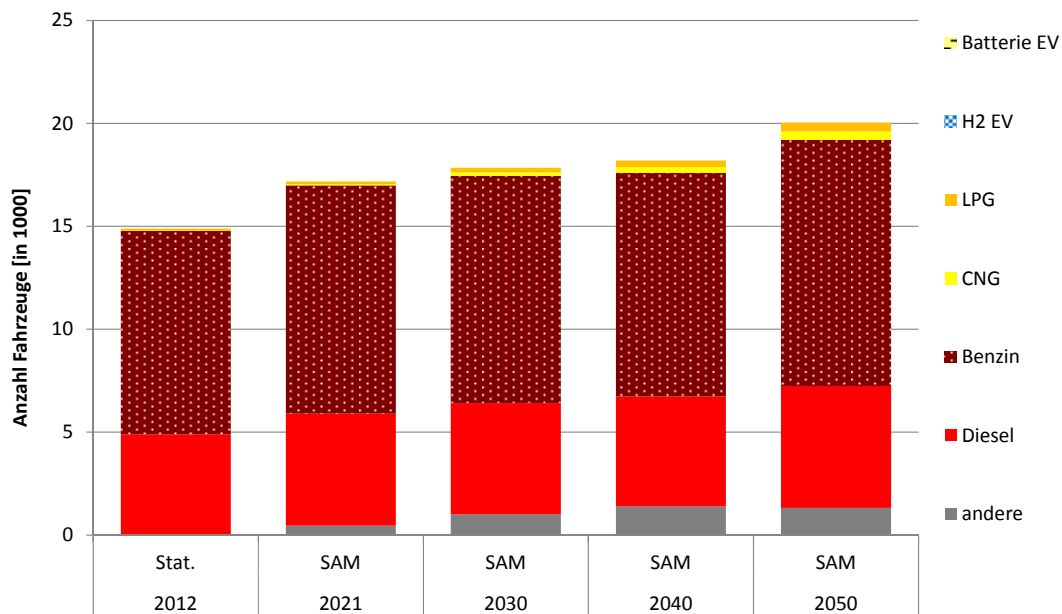


Abbildung 71: Entwicklung der Fahrzeugkapazitäten im Verkehrssektor in Metzingen von 2012 bis 2050 (Szenario Strom-autarkes Metzingen (SAM))

Zum weiteren Vergleich wird in Abbildung 72 die Endenergienachfrage in Metzingen zwischen 2012 und 2050 für das Szenario Endenergie-autarkes Metzingen (EAM) dargestellt.

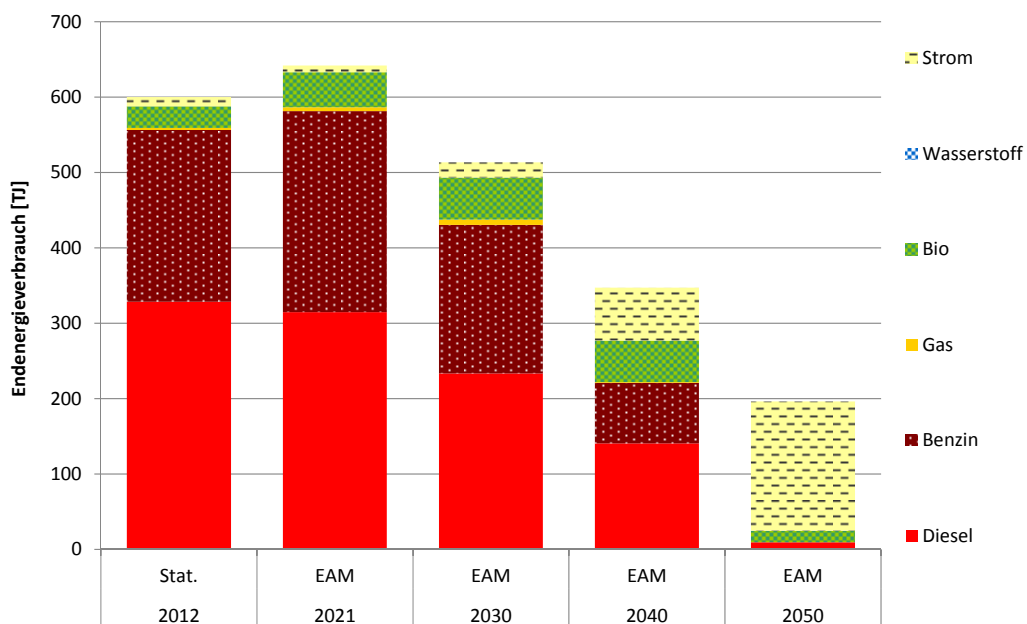
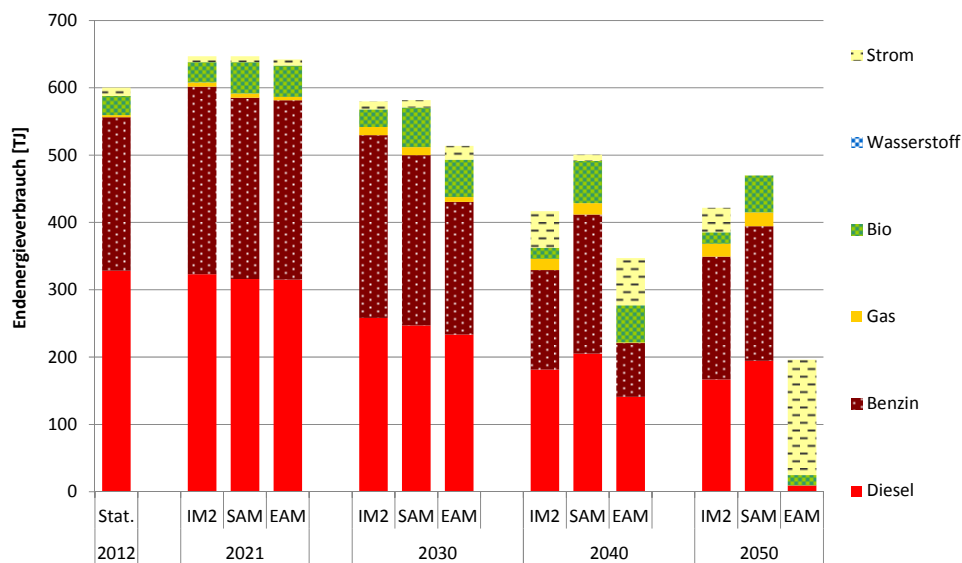


Abbildung 72: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor nach Energieträgern in Metzingen von 2012 bis 2050 (Endenergie-Autarkes Metzingen )

Deutlich zu erkennen ist hier eine starke Verlagerung der Mobilität von konventionellen Energieträgern auf elektrisch betriebene Fahrzeuge. Insgesamt führt dies zu einer Reduktion des Endenergieverbrauchs um 67 % verglichen zu 2012. Dies ist zum einen auf die hohe Effizienz von reinen Elektrofahrzeugen und zum anderen auf den Einsatz von Plug-In Hybriden zu erklären, die auf Kurz- und Mittelstrecken

eingesetzt werden können. Insgesamt beträgt der Stromanteil am Energiemix der Endenergienachfrage im Verkehrssektor im Szenario Endenergie-autarkes Metzingen (EAM) 87 %

In Abbildung 73 werden nun die Endenergieverbräuche im Verkehrssektor in Metzingen der Szenarien Strom-autarkes Metzingen (SAM) und Endenergie-autarkes Metzingen (EAM) im Vergleich zum Szenario Innovatives Metzingen II (IM2) dargestellt. Gut zu erkennen ist, dass, ähnlich der Entwicklung der Endenergienachfrage der privaten Haushalte, die Maximierung der Strom-Autarkie zu einem um 11 % höheren Endenergieverbrauch in 2050 führt im Vergleich zum Szenario Innovatives Metzingen II (IM2). Deutlich wird auch die sich auf den Endenergiebedarf positiv auswirkende gesamtenergetische Autarkiebewertung im Gegensatz zu alleinigen Strom-Autarkie.



**Abbildung 73: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor nach Energieträgern in Metzingen von 2012 bis 2050 (Vergleich der extremen Autarkieszenarien (SAM, EAM) mit dem Szenario Innovatives Metzingen II (IM2))**

Der hohe Anteil der Elektromobilität im Szenario Endenergie-autarkes Metzingen (EAM) in 2050 ermöglicht durch intelligente Vehicle-to-Grid Kopplung einen Stromverbrauch am Ort der lokalen Stromerzeugung. Die ans Stromnetz angeschlossenen Elektrofahrzeuge eignen sich als Kurzzeitspeicher bei negativen Residuallasten, die aus Stromerzeugungsüberschüssen auf Basis Erneuerbarer Energien resultieren. Zudem reduziert die Nutzung von Elektromobilität zum einen den Verbrauch von fossilen Kraftstoffen und zum anderen die Importabhängigkeit von diesen.

Durch den starken Ausbau der Erneuerbaren Energien, allen voran PV und Wind, ist in den Szenarien Strom-autarkes Metzingen (SAM) und Endenergie-autarkes Metzingen (EAM) Metzingen bereits ab 2012 ein bilanzieller Strom-Exporteur. Abbildung 74 stellt hierzu die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs nach Energieträgern in Metzingen von 2012 bis 2050 dar. Für das Szenario Innovatives Metzingen II (IM2) tritt dieser Zustand ab 2030 ein. Die hohen Erträge durch den Ausbau der PV und der Windkraft führen zu einer Stromüberschussproduktion. Das maximale Potenzial der Windkraft wird bereits in 2040 in allen drei Szenarien vollständig erschlossen.

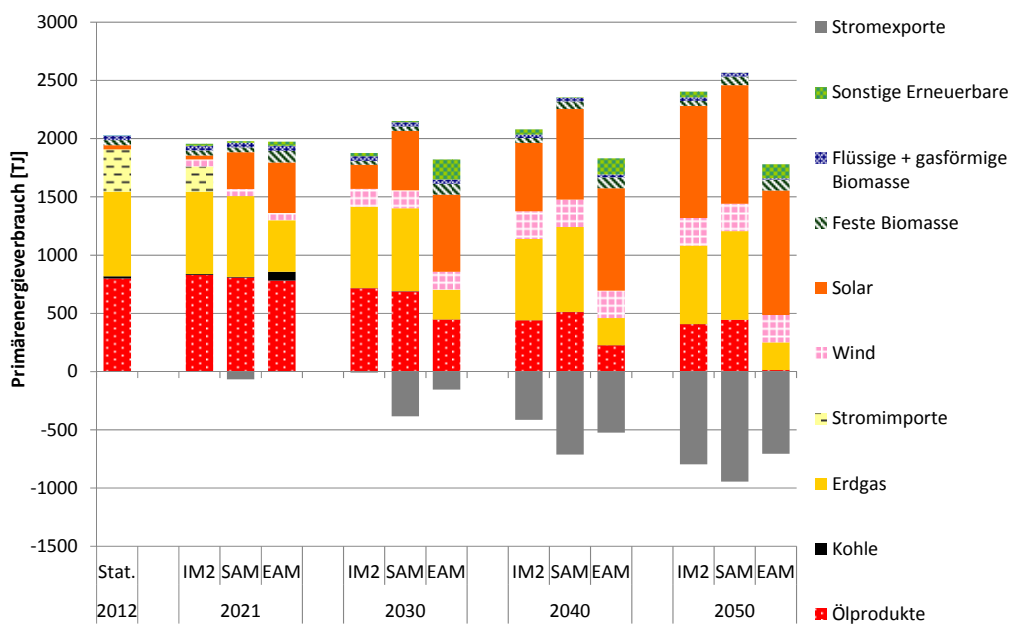


Abbildung 74: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs nach Energieträgern in Metzgingen von 2012 bis 2050 (Vergleich der extremen Autarkieszenarien (SAM, EAM) mit dem Szenario Innovatives Metzgingen II (IM2))

Die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Metzgingen werden in Abbildung 75 dargestellt. Dabei verlaufen die gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen als auch der Pro-Kopf Ausstoß für die drei Szenarien kontinuierlich abfallend bis 2050. Während die Emissionswerte für das Szenario Strom-autarkes Metzgingen (SAM) 9,7 % oberhalb des Szenarios Innovatives Metzgingen II (IM2) in 2050 liegen, können die Pro-Kopf Emissionen im Szenario Endenergie-autarkes Metzgingen (EAM) auf bis zu 0,6 t CO<sub>2</sub> pro Kopf und Jahr reduziert werden.

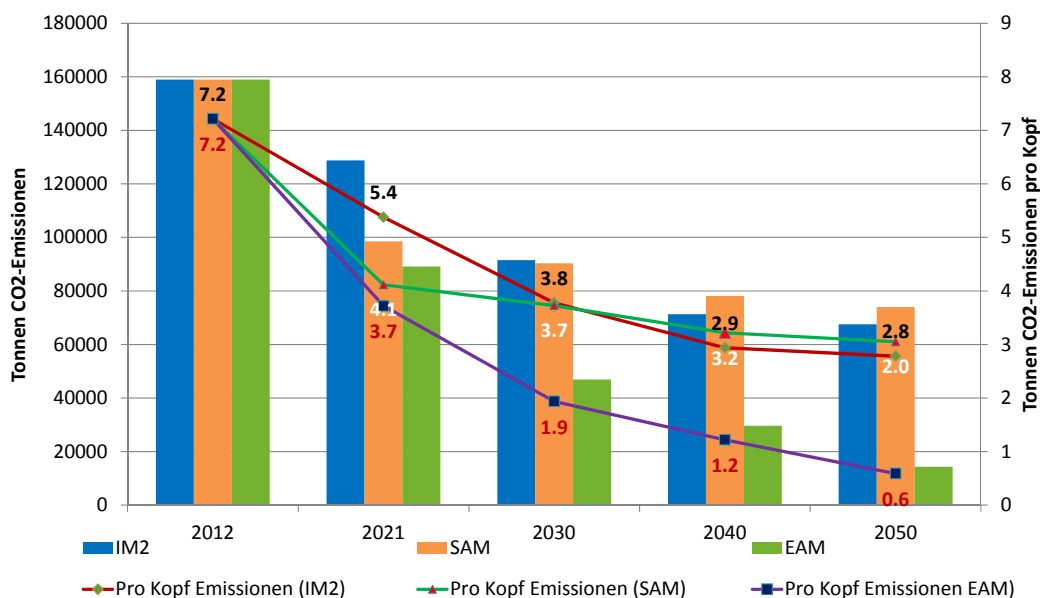


Abbildung 75: Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Metzgingen von 2012 bis 2050 (Vergleich der extremen Autarkieszenarien (SAM, EAM) mit dem Szenario Innovatives Metzgingen II (IM2))

Nach der detaillierten Betrachtung der energetischen Ergebnisse der verschiedenen Szenarien liefert Tabelle 32 eine Übersicht der für Metzgingen erzielten Strom-Autarkiegrade und Energie-Autarkiegrade.



Tabelle 32: Vergleich der Autarkiegrade der fünf für Metzingen analysierten Szenarien

	2012	2021	2030	2040	2050
<b>BAU-Szenario:</b> Stromautarkiegrad	10,7 %	14,5 %	46,6 %	67,7 %	80,9 %
<b>BAU-Szenario:</b> Energieautarkiegrad	4,3 %	5,3 %	10,8 %	15,9 %	20,2 %
<b>IM1-Szenario:</b> Stromautarkiegrad	10,7 %	31,4 %	102,6 %	201,8 %	297,1 %
<b>IM1-Szenario:</b> Energieautarkiegrad	4,3 %	8,0 %	23,1 %	55,6 %	82,3 %
<b>IM2-Szenario:</b> Stromautarkiegrad	10,7 %	31,4 %	102,4 %	204,6 %	309,5 %
<b>IM2-Szenario:</b> Energieautarkiegrad	4,3 %	8,2 %	23,2 %	54,9 %	80,2 %
<b>SAM-Szenario:</b> Stromautarkiegrad	10,7 %	121,6 %	239,1 %	370,8 %	497,7 %
<b>SAM-Szenario:</b> Energieautarkiegrad	4,3 %	23,6 %	41,9 %	65,3 %	80,1 %
<b>EAM-Szenario:</b> Stromautarkiegrad	10,7 %	100,0 %	136,4 %	220,4 %	248,6 %
<b>EAM-Szenario:</b> Energieautarkiegrad	4,3 %	33,4 %	66,8 %	103,9 %	141,0 %

Zu erkennen ist dabei, dass ein hoher Strom-Autarkiegrad in der Tendenz auch einen hohen Energie-Autarkiegrad zur Folge hat, da der Strombereich einen sehr relevanten Bestandteil des Energiesystems darstellt. Dieser Anteil wird mit der zukünftig zunehmenden Elektrifizierung bestimmter Sektoren zunehmen, z. B. Elektromobilität oder Wärmeversorgung durch Wärmepumpen. Zudem wird ersichtlich, dass eine Strom-Autarkie mit den gegebenen Rahmenbedingungen und den ermittelten Potenzialen in Metzingen technisch machbar ist. Insgesamt stellt die bilanzielle Strom-Autarkie keine bedeutsame Hürde dar. Deutlich ambitionierter hingegen stellt sich durch den relativ gesehen hohen Anteil des Wärmebedarfs an der gesamten Nutzenergiestruktur sowie der zusätzlichen betrachteten Mobilitätsnachfrage Metzingens das Ziel der Energie-Autarkie heraus. Dabei muss betont werden, dass es sich hierbei lediglich um eine bilanzielle Betrachtung handelt. Gleichzeitigkeits-effekte werden nur oberflächlich in die Optimierung einbezogen. Deutlich erkennbar ist auch, dass die Definition des primären Entwicklungsziels des Energiesystems eine wichtige Bedeutung einnimmt. Z. B. sind die in 2050 erreichten Energie-Autarkiegrade des Szenarios Innovatives Metzingen II (IM2) und des Szenarios Strom-autarkes Metzingen (SAM) vergleichbar, jedoch unterscheiden sich beide Zustände in der Struktur des Energiesystems deutlich voneinander.

### Systemkosten

Abbildung 75 zeigt die auf 2012 abdiskontierten Systemkosten je Einwohner für die fünf für Metzingen analysierten Szenarien im Vergleich. Die in Relation zum Szenario Stagnierendes Metzingen (BAU) jährlichen Systemkosten liegen für die beiden Szenarien Innovatives Metzingen I (IM1) und Innovatives Metzingen II (IM2) um 4,2 % bzw. 4,7 % pro Person und pro Jahr oberhalb der Basis. Deutlich höher hingegen steigen die Kosten bei dem Ziel der Maximierung der Strom-Autarkie im Szenario Strom-autarkes Metzingen (SAM) (+9,1 % mehr pro Jahr und Person). Die Maximierung der Energie-Autarkie



(Szenario Endenergie-autarkes Metzinger (EAM)) ist das mit Abstand teuerste Szenario mit knapp 20 % jährlichen Mehrkosten gegenüber dem Szenario Stagnierendes Metzinger (BAU).

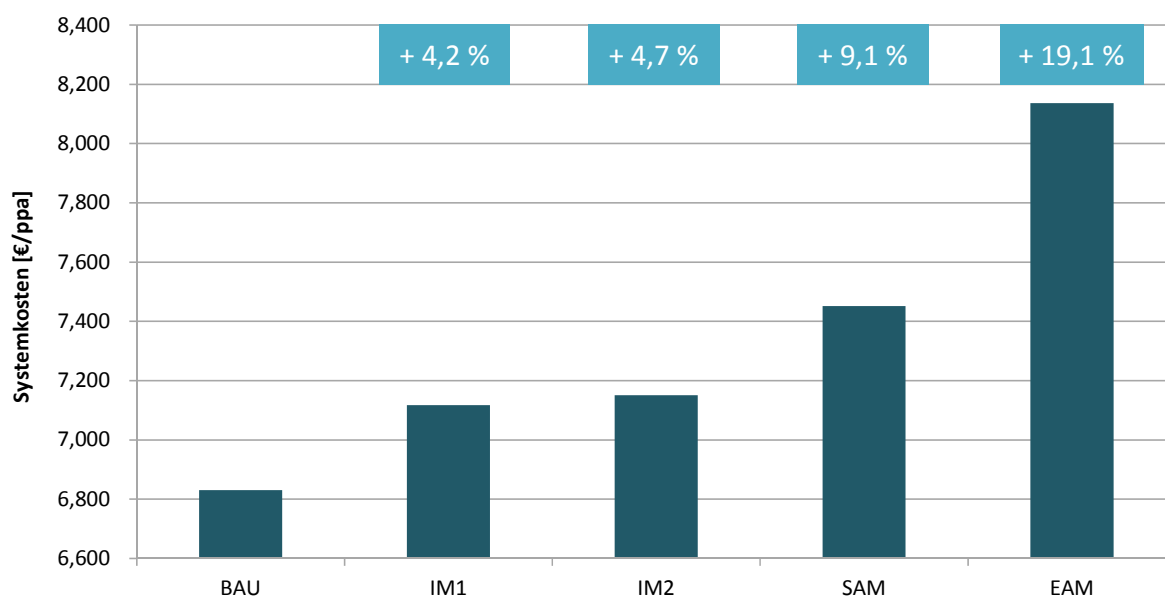


Abbildung 76: Auf das Basisjahr 2012 abdiskontierte Systemkosten pro Einwohner und Jahr im Vergleich der fünf für Metzinger analysierten Szenarien

#### 4.6 Ökologisches Gesamtmodell für Metzinger

Zunächst wird das Energiesystem „Metzinger“ in Hinblick auf die Strombereitstellung untersucht. Abbildung 77 zeigt die Gegenüberstellung des Treibhauspotenzials (GWP) der ausgewerteten Szenarien für die Bereitstellung von 1 kWh Strom durch das jeweilige Energiesystem in Metzinger.

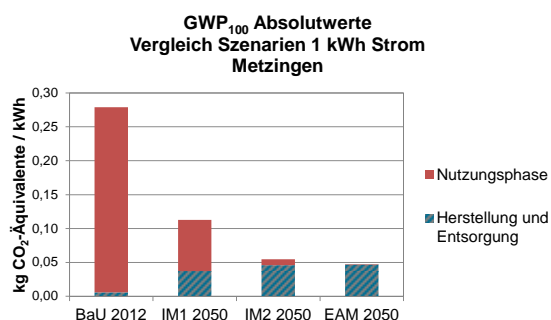
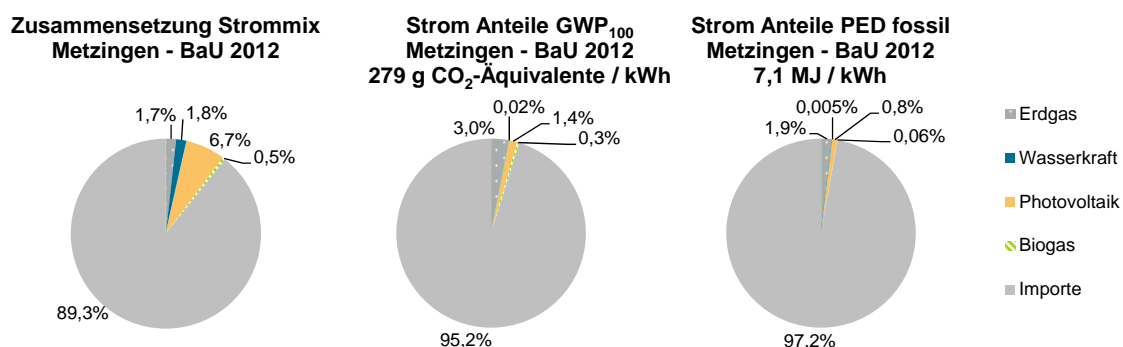


Abbildung 77: Vergleich der Szenarien für Metzinger für die Bereitstellung von 1 kWh Strom in der Wirkungskategorie Treibhauspotenzial (GWP)

Es wird deutlich, dass sich die Umweltwirkungen, die auf die Bereitstellung von 1 kWh Strom zurückzuführen sind, im Vergleich zum betrachteten Referenzjahr 2012 in den untersuchten Szenarien deutlich verringern. Die Reduktionspotenziale der Szenarien bewegen sich im Vergleich zum Referenzzustand BAU 2012 in der Wirkungskategorie Treibhauspotenzial (GWP) zwischen 60 und 80 %. Auffällig ist zudem die steigende Relevanz von Herstellung und Entsorgung im Vergleich zur Nutzungsphase. Ist bei der Referenz BAU 2012 die Nutzungsphase für 92 % der Umweltwirkungen verantwortlich, sind

bei den Energiesystemen, die bei den Szenarien untersucht werden, nur noch zwischen 67 und 2 % auf die Nutzungsphase zurückzuführen. In gleichem Maße steigt die Relevanz von Herstellung und Entsorgung. Im Szenario Endenergie-autarkes Metzinger (EAM) trägt diese in 2050 zu 98 % der klimawirksamen Emissionen bei. Zurückzuführen ist dies auf den den jeweiligen Energiesystemen zugrunde liegenden Strommix. Wie Abbildung 78 bis Abbildung 81 zeigen, steigen in den Szenarien die Anteile der erneuerbaren Energietechnologien Photovoltaik und Windkraft in erheblichem Maße. Eine detaillierte Darstellung der Energiebilanz der untersuchten Systeme wird in Kapitel 4.5 geleistet. Im Referenzzustand BAU 2012 besteht der Strommix in Metzinger zu großen Teilen aus Importen. Durch die Einbindung in das baden-württembergische Stromnetz ist für die Importe das Umweltprofil des baden-württembergischen Strommix besonders relevant. Importe aus umgebenden Systemen in den baden-württembergischen Bilanzraum werden dabei ebenfalls berücksichtigt. Mit steigendem Autarkiegrad sinken die Importanteile und in den Szenarien Innovatives Metzinger II (IM2) und Endenergie-autarkes Metzinger (EAM) kann das Energiesystem innerhalb der Bilanzgrenzen versorgt werden, so dass es zu keinen Stromimporten in das System mehr kommt. Die Steigerung des Autarkiegrads wird durch eine Steigerung von vor Ort anwendbaren Technologien zur Stromerzeugung realisiert. Diese Technologien gründen zu weiten Teilen auf erneuerbare Energiequellen. Erneuerbare Energietechnologien charakterisieren sich durch sehr geringe Umweltwirkungen während ihrer Nutzungsphase. Hauptsächlich sind ihre Umweltwirkungen in der Wirkungskategorie Treibhauspotenzial (GWP) auf den Anlagenbau bzw. auf die Produktionsprozesse zurückzuführen (Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, 2016).

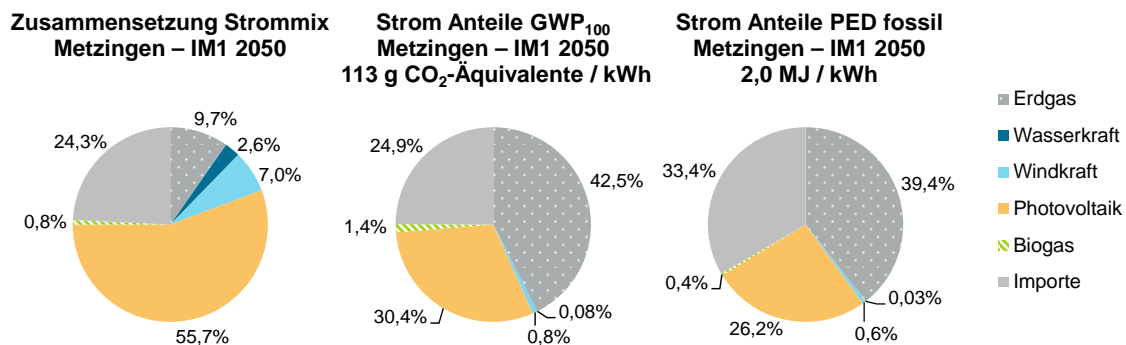
Für den Referenzzustand BAU 2012 zeigt Abbildung 78, dass der große Anteil der Importe im Metzinger Energiesystem auch in relevanten Anteilen an den Bewertungskategorien Treibhauspotenzial (GWP) und fossiler Primärenergiebedarf (PED) resultiert. So tragen die Importe zu fast 90 % des Strommix bei, aber zu 95 bzw. 97 % der Umweltwirkungen in den berücksichtigten Kategorien. Bedingt wird dies durch die Zusammensetzung des Importstromes, der, bedingt durch den baden-württembergischen und gesamtdeutschen Kraftwerksmix, einen erheblichen Anteil an fossil befeuerten Kraftwerken enthält. Die fossil basierte Stromerzeugung trägt in erheblichem Maß zu den Umweltprofilen bei.



**Abbildung 78: Gegenüberstellung der Anteile der Energieträger an der Stromerzeugung und ihre Anteile an den Umweltwirkungen für Metzinger im Referenzzustand BAU 2012**

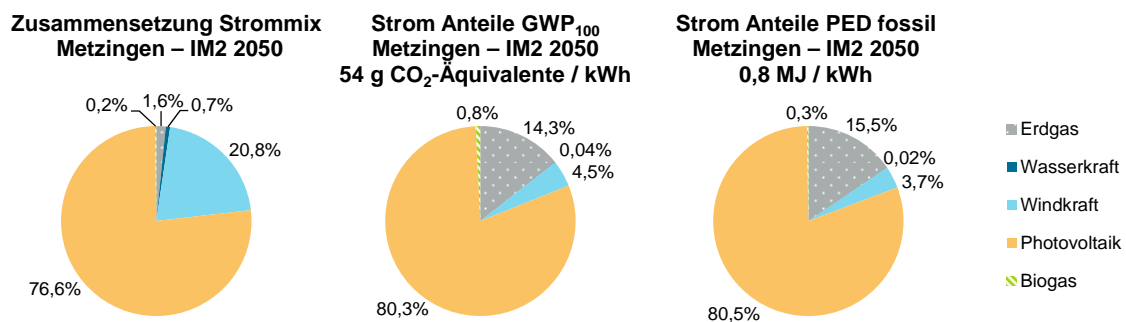
Deutlich wird der Zusammenhang zwischen der Verbrennung fossiler Energieträger und dem Umweltprofil auch bei der Analyse des Szenarios Innovatives Metzinger I (IM1) für das Jahr 2050 (Abbildung 79). Der erhebliche Anteil von Strom aus Photovoltaikanlagen von 60 % resultiert nur in Beiträgen von

ca. 30 % zum gesamten Umweltprofil der Bereitstellung von 1 kWh Strom. Im Vergleich dazu resultieren aus fast 10 % Strom aus Erdgaskraftwerken ca. 40 % der gesamten Umweltwirkungen. Dies erklärt sich durch die klimawirksamen Emissionen, die bei der Verbrennung von Erdgas freigesetzt werden. Die Relevanz der Importe kann im Vergleich zum Referenzzustand BAU 2012 verringert werden. Neben der Reduktion der Anteile am Energiesystem weisen auch die Importe im Szenario Innovatives Metzingen I (IM1) für 2050 ein verbessertes Umweltprofil auf. Zurückzuführen ist dies auf bis zum Jahr 2050 steigende Anteile an erneuerbaren Energien im baden-Württembergischen und gesamtdeutschen Strommix im Zuge der Energiewende.



**Abbildung 79: Gegenüberstellung der Anteile der Energieträger an der Stromerzeugung und ihre Anteile an den Umweltwirkungen für Metzingen im Szenario Innovatives Metzingen I (IM1) in 2050**

Das Szenario Innovatives Metzingen II (IM2) geht von einer völlig autarken Stromversorgung für 2050 aus, sodass keine Importe notwendig sind. Bei der Gegenüberstellung in Abbildung 80 wird nochmal die Relevanz der fossilen Verbrennung bezüglich der Umweltwirkungen aufgezeigt. Außerdem zeigt sich bei Strom aus Windkraft, mit einem relevanten Anteil von mehr als 20 % am Strommix und gleichzeitig nur ca. 4 % der Umweltwirkungen, das günstige Umweltprofil dieser Stromerzeugungsart.



**Abbildung 80: Gegenüberstellung der Anteile der Energieträger an der Stromerzeugung und ihre Anteile an den Umweltwirkungen für Metzingen im Szenario Innovatives Metzingen II (IM2) in 2050**

Im Szenario Endenergie-autarkes Metzingen (EAM) wird in 2050 bei der Stromversorgung nur auf erneuerbare Energien zurückgegriffen, die innerhalb des Bilanzraumes zur Verfügung stehen. Wie in Abbildung 81 zu sehen ist, sind die Umweltwirkungen in den berücksichtigten Kategorien in diesem Fall fast ausschließlich auf Photovoltaikstrom zurückzuführen.

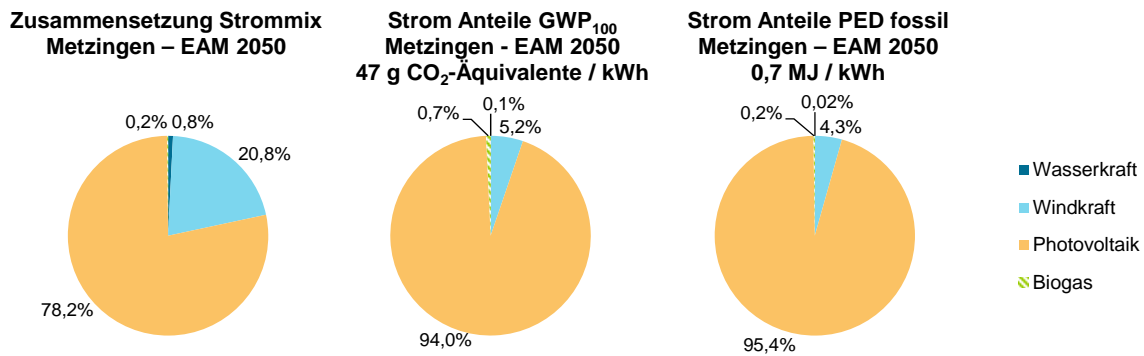


Abbildung 81: Gegenüberstellung der Anteile der Energieträger an der Stromerzeugung und ihre Anteile an den Umweltwirkungen für Metzungen im Szenario Endenergie-autarkes Metzungen (EAM) in 2050

Die absoluten Werte sind im Szenario Endenergie-autarkes Metzungen (EAM) gegenüber den anderen Szenarien nochmals reduziert. Durch die Strombereitstellung rein aus erneuerbaren Energien kann somit das niedrigste Umweltprofil realisiert werden. Der noch bestehende geringe fossile Primärenergieverbrauch begründet sich durch die Vorketten, zum Beispiel durch die Energieaufwendungen in der Herstellungsphase. Verdeutlicht wird dies in Abbildung 82. In diesem Vorhaben wurden die Vorketten der Strombereitstellung statisch ausgewertet, eine Dynamisierung über die Betrachtungsjahre wäre hier zukünftig sehr interessant. Analog der Abbildung der Wärmebereitstellung könnten durch Anpassung der verwendeten Strommixe in den Hintergrundsystemen auch weitere Optimierungspotenziale in Herstellung und Entsorgung aufgezeigt werden.

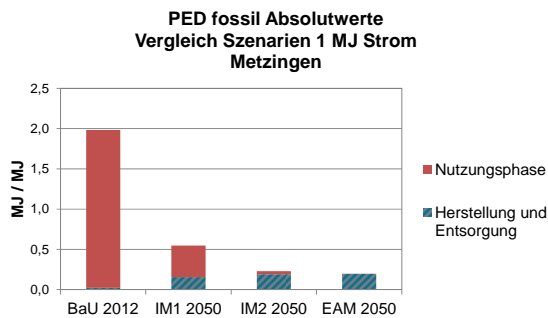
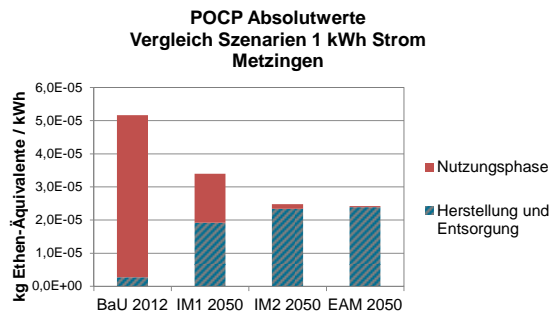


Abbildung 82: Vergleich der Szenarien für Metzungen für die Bereitstellung von 1 kWh Strom in der Kategorie fossiler Primärenergiebedarf (PED)

Es zeigt sich, dass mit steigendem Autarkiegrad der Verbrauch fossiler Energieträger für die Bereitstellung von 1 kWh Strom um bis zu 90 % reduziert werden kann. Zudem werden die Herstellung und die Entsorgung analog zur Wirkungskategorie Treibhauspotenzial (GWP) immer dominanter. Abbildung 82 zeigt die Effizienz der untersuchten Energiesysteme auf. Im Referenzzustand BAU 2012 ist noch der Faktor 2 an Einsatz von fossilen Energieträgern notwendig, um 1 MJ Strom Endenergie bereitzustellen. In den Autarkieszenarien kann dieser Faktor immer weiter reduziert werden. So ist im Szenario Endenergie-autarkes Metzungen (EAM) in 2050 der Faktor von 0,2 MJ Einsatz von fossilen Energieträgern notwendig, um 1 MJ Strom an Endenergie zu liefern.

Neben der Untersuchung von Treibhauspotenzial (GWP) und fossilem Primärenergiebedarf (PED) ist auch die Darstellung weiterer Umweltwirkungskategorien relevant für die Untersuchung von Energie-

systemen. Im Technologieatlas wird für die untersuchten Schwerpunkttechnologien ein breiteres Spektrum an Umweltprofilen analysiert (Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, 2016). Beispielhaft wird in Abbildung 83 das Photochemische Oxidantienbildungspotenzial (POCP) dargestellt, das den Beitrag von lokalen Emissionen (wie z. B.  $\text{NO}_x$  oder CO) zur Bildung von Sommersmog abbildet.



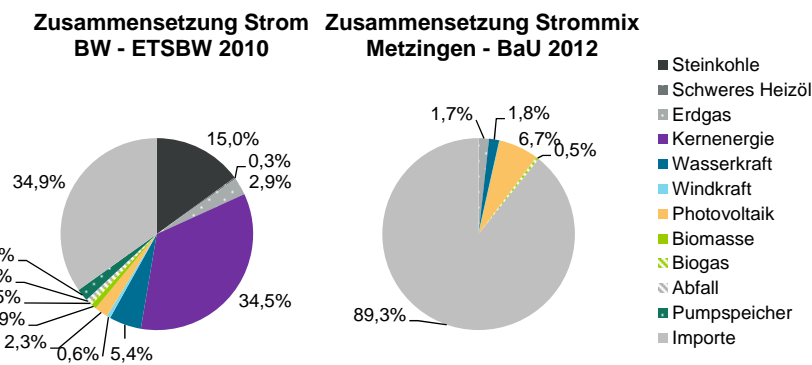
**Abbildung 83: Vergleich der Szenarien für Metzingen für die Bereitstellung von 1 kWh Strom in der Wirkungskategorie Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP)**

In der Wirkungskategorie Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP), die in Abbildung 83 dargestellt wird, zeigt sich, dass die Reduktion der zu lokalem Sommersmog beitragenden Emissionen des Bilanzraums Metzingen ähnlich wie im größeren Bilanzraum Baden-Württemberg (dargestellt in Kapitel 3.6) ausfällt. Allerdings ist die Relevanz der Nutzungsphase deutlich niedriger, da im Vergleich zu Baden-Württemberg sowohl der Anteil an Strom aus Biomasse- und Biogaskraftwerken (mit lokal wirkenden Verbrennungsemissionen) niedriger, als auch der Anteil von Strom aus PV-Anlagen, die eine aufwändigere Herstellung aufweisen als Windkraftanlagen, höher ist, was zusätzlich zu einer größeren Bedeutung von Herstellung und Entsorgung führt.

Durch den wachsenden Anteil an erneuerbaren Energien am Energiesystem kann das Photochemische Oxidantienbildungspotenzial (POCP) um 34 bis 53% reduziert werden. Die im Vergleich zum Treibhauspotenzial (GWP) geringeren Reduktionspotenziale erklären sich aus der größeren Relevanz, die die untersuchten Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien in dieser Wirkungskategorie aufzeigen. Hier sind besonders Biogas sowie PV zu nennen. Analog zum Treibhauspotenzial (GWP) und fossilen Primärenergiebedarf (PED) steigt die Relevanz von Herstellung und Entsorgung an.

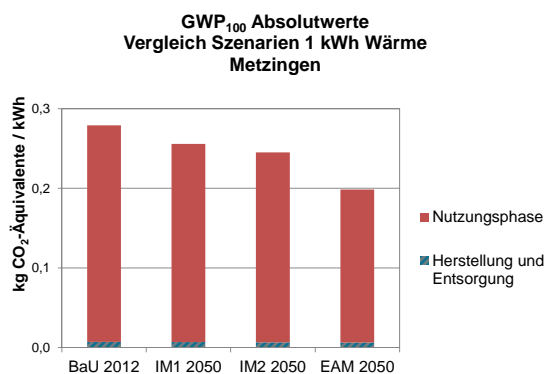
Aktuell besteht für den Bilanzraum Metzingen eine Abhängigkeit von dem größeren Bilanzraum Baden-Württemberg durch die geleisteten Importe. Somit beeinflusst das baden-württembergische Umweltprofil auch jenes von Metzingen. Allerdings zeigt Abbildung 84, dass der Bilanzraum von Metzingen bereits 2012 einen erheblichen Anteil an Strom aus Photovoltaik aufweist, der deutlich über dem baden-württembergischen Gesamtmix liegt. Der Anteil an erneuerbaren Energien liegt somit höher und führt bereits im Referenzzustand BAU 2012 zu reduzierten Umweltauswirkungen.

Beim Vergleich der Bilanzräume ist zu beachten, dass aufgrund der Datenverfügbarkeit unterschiedliche Basisjahre (2010 für Baden-Württemberg und 2012 für Metzingen) herangezogen wurden.



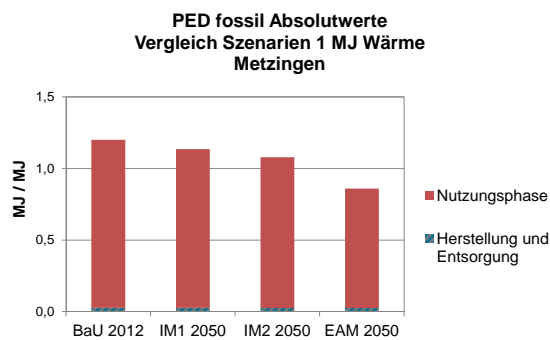
**Abbildung 84: Vergleich der Zusammensetzung der Stromerzeugung der Bilanzräume Metzingen 2012 und Baden-Württemberg 2010**

Die Wärmebereitstellung stellt für das Energiesystem Metzingen den zweiten großen Teil der Energieversorgung dar. Abbildung 85 bis Abbildung 87 zeigen durch den Vergleich der Szenarien wie sich das Umweltprofil der Bereitstellung von 1 kWh Wärme mit steigender Autarkie verändert. In der Wirkungskategorie Treibhauspotenzial (GWP) sind relevante Reduktionspotenziale von bis zu 39 % zu erkennen, auch wenn diese nicht die Größenordnung des Stroms (vgl. Abbildung 77) erreichen. Auffällig ist, dass grundsätzlich die Ergebnisse der Nutzungsphase dominieren. Der Anteil von Herstellung und Entsorgung ist mit durchgängig weniger als 5 % sehr gering. Die Dominanz der Nutzungsphase bei den Ergebnissen der untersuchten Kategorien lässt sich durch eine für Metzingen deutlich geringere Umstellung auf regenerative Energieträger erklären. Wie in Abbildung 89 bis Abbildung 92 zu sehen ist, bleibt der Anteil an Technologien auf Basis fossiler Energieträger mit dominanter Nutzungsphase mit 45 % bis 78 % relativ groß.



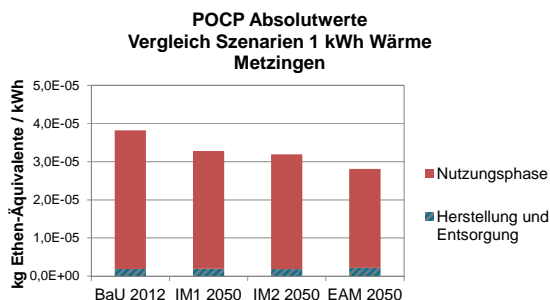
**Abbildung 85: Vergleich der Szenarien für Metzingen für die Bereitstellung von 1 kWh Wärme in der Wirkungskategorie Treibhauspotenzial (GWP)**

Für den fossilen Primärenergiebedarf gestalten sich die Ergebnisse, wie in Abbildung 86 zu sehen ist, ähnlich. Hier können potenziell mit steigendem Autarkiegrad bis zu 41 % des fossilen Primärenergiebedarfs eingespart werden. Hierbei zeigt sich bereits der Referenzzustand BAU 2012 im Hinblick auf den Einsatz von Primärenergien für die Bereitstellung von Wärme effizient. So sind 2012 in Metzingen nur der Einsatz von knapp 1,2 MJ an fossilen Energien notwendig, um 1 MJ Wärme zu gewinnen. Dominierender Lebenszyklusabschnitt ist wiederum aufgrund des fossilen Anteils die Nutzungsphase.



**Abbildung 86: Vergleich der Szenarien für Metzingen für die Bereitstellung von 1 kWh Wärme in der Kategorie fossiler Primärenergiebedarf (PED)**

Die geringsten Reduktionspotenziale ergeben sich mit bis zu 37 % beim Photochemischen Oxidantienbildungspotenzial (POCP). In Abbildung 87 wird deutlich, dass hier das Szenario Endenergie-autarkes Metzingen (EAM) in 2050 gegenüber den anderen Szenarien vergleichsweise geringe Optimierungspotenziale aufweist. Dies ist zum einen darin begründet, dass bereits die Szenarien mit geringerem Autarkiegrad (Innovatives Metzingen I (IM1), Innovatives Metzingen II (IM2)) gegenüber dem Referenzzustand BAU 2012 hohe Reduktionspotenziale zeigen, zum anderen ist auch ein deutlicher Anstieg der Relevanz von Herstellung und Entsorgung zu fast 10 % zu vermerken.



**Abbildung 87: Vergleich der Szenarien für Metzingen für die Bereitstellung von 1 kWh Wärme in der Wirkungskategorie Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP)**

Bei der Untersuchung des Wärmesystems wird, wie in Abbildung 14 in Kapitel 2.3.5 gezeigt, in gebäudeintegrierte Systeme und in Fernwärme unterschieden. Beide Kategorien werden innerhalb der ökobilanziellen Untersuchungen berücksichtigt. In der weiteren Ergebnisdarstellung werden die Energieträger, die zur Fernwärmeversorgung beitragen, immer zur Überkategorie „Fernwärme“ zusammengefasst. Abbildung 88 zeigt, wie die Zusammensetzung der Fernwärme in den verschiedenen Szenarien variiert. Je nach Anteil der Fernwärme am gesamten Heizungsmix wirken diese Technologien auch auf das gesamte Umweltprofil ein.



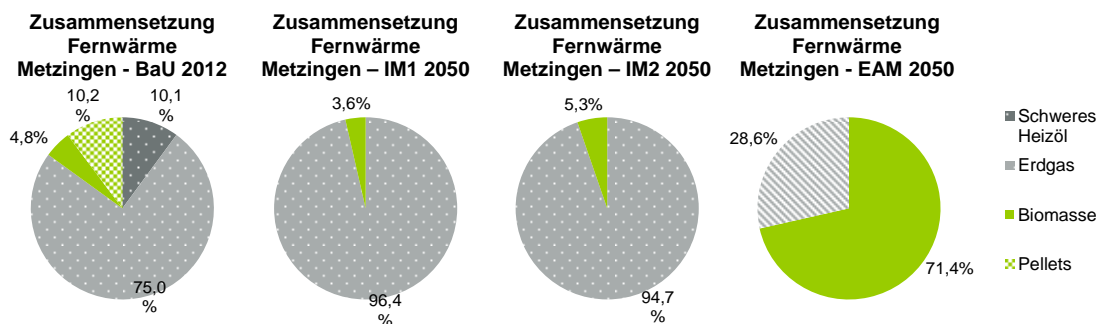


Abbildung 88: Zusammensetzung der Fernwärmeerzeugung in den verschiedenen Szenarien für Metzingen

In Abbildung 89 zeigt sich, dass im Referenzzustand BAU 2012 die verbrennungstechnischen Wärmeerzeugungen klar dominierend sind. Auch die dargestellte Fernwärme wird nur durch einen geringen Anteil (15 %) an Erneuerbaren Energien erzeugt und beruht zu großen Teilen auf Erdgas. Die Anteile an den untersuchten Umweltkategorien verhalten sich ähnlich zu den Anteilen des Erzeugungsmix. Im Vergleich zur Stromerzeugung zeigt sich eine höhere Diversität der Erzeugungstechnologien.

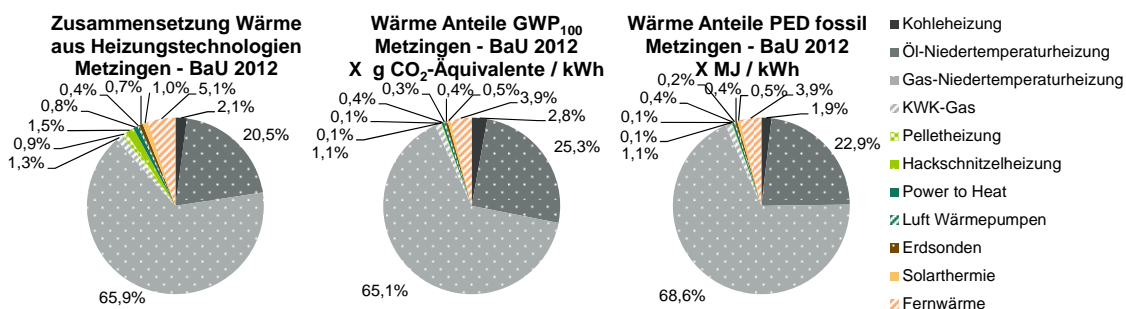


Abbildung 89: Gegenüberstellung der Anteile der Energieträger an der Wärmeerzeugung und ihre Anteile an den Umweltwirkungen für Metzingen im Referenzzustand BAU 2012

In Abbildung 90 ist für das Szenario Innovatives Metzingen I (IM1) für 2050 eine Diversifizierung des Erzeugungsmix der Fernwärme gegenüber dem Referenzzustand BAU 2012 zu sehen. Der Kohleanteil nimmt deutlich ab und wird durch größere Anteile erneuerbarer Technologiepfade wie beispielsweise Solarthermie ersetzt. Bedingt durch den Strombedarf dieser Wärmeerzeugungstechnologien tragen sie entsprechend ihrem Anteil an der Zusammensetzung der Heizungstechnologien auch zu den Umweltkategorien Treibhauspotenzial (GWP) und fossilem Primärenergiebedarf (PED) bei.

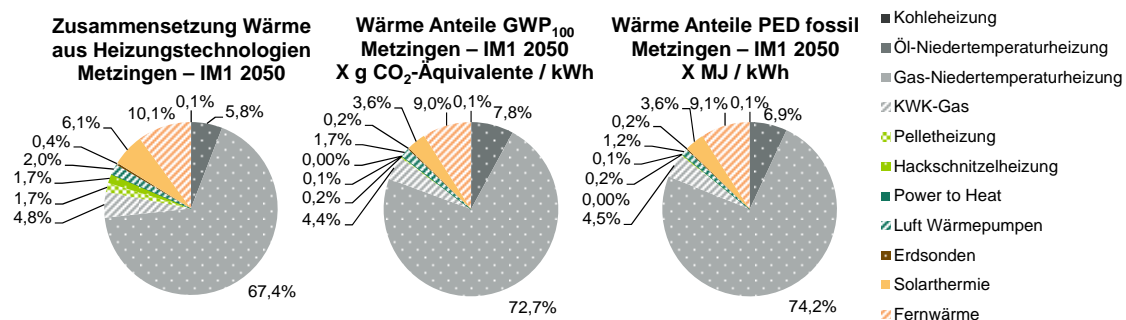


Abbildung 90: Gegenüberstellung der Anteile der Energieträger an der Wärmeerzeugung und ihre Anteile an den Umweltwirkungen für Metzingen im Szenario Innovatives Metzingen I (IM1) in 2050



Mit steigendem Autarkiegrad wächst der Anteil an Heizungstechnologien, die entweder auf Umweltwärme zurückgreifen oder regenerative Brennstoffe verwenden. Unter anderem durch das verbesserte Umweltprofil des Stromerzeugungsmix im Szenario Innovatives Metzingen II (IM2) tragen Technologien mit erheblichem Strombedarf in der Nutzungsphase potenziell in geringerem Maße zum Klimawandel bei. Abbildung 91 zeigt, dass Gas-Niedertemperaturheizungen das Umweltprofil der Wärmeerzeugung dominieren.

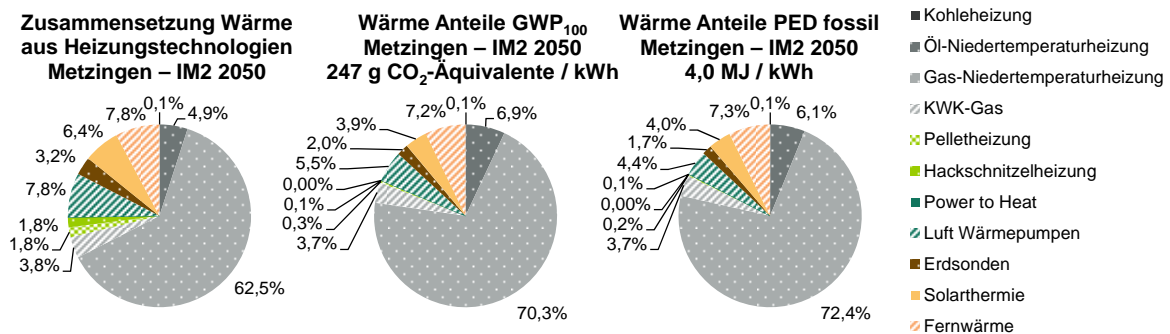


Abbildung 91: Gegenüberstellung der Anteile der Energieträger an der Wärmeerzeugung und ihre Anteile an den Umweltwirkungen für Metzingen im Szenario Innovatives Metzingen II (IM2) in 2050

In Abbildung 92 zeigt sich, dass im Szenario Endenergie-autarkes Metzingen (EAM) in 2050 der Fernwärmeanteil praktisch irrelevant ist, durch die rein auf erneuerbaren Energien basierte Erzeugung trägt die Fernwärme in noch geringerem Maße zum Treibhauspotenzial (GWP) und fossilen Primärenergiebedarf (PED) bei. Dominierende Technologien sind neben Gasheizungen in diesem Szenario die Solarthermie und Erdsonden. Während der Anteil der Erdsonden an den untersuchten Umweltkategorien im Vergleich zum Beitrag gering ist, kann bei Solarthermie aufgrund der technisch notwendigen Unterstützung durch eine Gastherme nur wenig Einsparung dargestellt werden. Das Umweltprofil der Wärmeerzeugung wird durch die Gasheizung mit fast 75 % bestimmt.

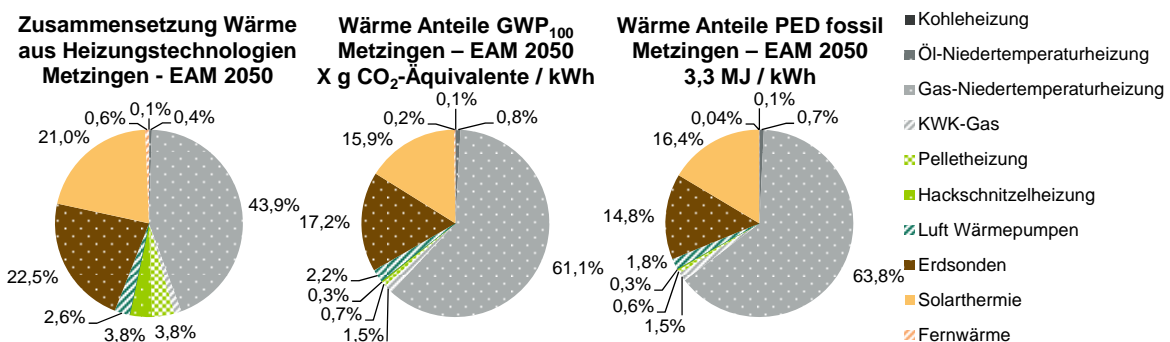


Abbildung 92: Gegenüberstellung der Anteile der Energieträger an der Wärmeerzeugung und ihre Anteile an den Umweltwirkungen für Metzingen im Szenario Endenergie-autarkes Metzingen (EAM) in 2050

Beim Vergleich der beiden Bilanzräume Metzingen und Baden-Württemberg wird deutlich, dass der größere Bilanzraum Baden-Württemberg im Falle der Energie-Autarkie ein von fossilen Energien unabhängigeres Wärmesystem nutzen kann. Für Baden-Württemberg dominieren im Szenario Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW) in der Wärmeerzeugung daher Technologien, die auf erneuerbaren Energien basieren, wenn sie auch zu Teilen auf konventionelle Unterstützung angewiesen sind. Durch die Verknüpfung der Wärmebereitstellung mit dem Umweltprofil der Stromerzeugung profitiert

der Bilanzraum Baden-Württemberg zudem. Im Wärmesystem Baden-Württembergs ist im Szenario Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW) in 2050 nur der Einsatz von 0,3 MJ fossiler Primärenergie notwendig, um 1 MJ Wärme zu gewinnen, während in Metzingen im Szenario Endenergie-autarkes Metzingen (EAM) in 2050 immer noch fast 1 MJ an fossiler Primärenergie notwendig ist, um 1 MJ Wärme bereit zu stellen. Im untersuchten Fall erweist sich das größere System Baden-Württemberg mit nur 22 g emittierten CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro kWh Wärme im Vergleich zu 150 g emittierten CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro kWh Wärme in Metzingen in der Wirkungskategorie Treibhauspotenzial (GWP) als ökologisch deutlich vorteilhafter.

## 5 Schlussfolgerungen

Die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Nutzung erneuerbarer Energien, zur Energieeinsparung und zur Emissionsminderung von Kommunen, Regionen, aber auch Bundesländern werden unter dem Schlagwort der „Energie-Autarkie“ diskutiert. Die vorliegende Studie untersucht, in wie weit Autarkie im Energiebereich auf der Ebene einer Kommune, am Beispiel der Stadt Metzingen, und eines Bundeslandes, am Beispiel von Baden-Württemberg, sinnvoll bzw. möglich ist, welche Speicher-Dimensionen und -Technologien dazu in welchen Bereichen notwendig sind und wie derartige Versorgungsstrukturen von der Bevölkerung akzeptiert werden.

Das interdisziplinäre Projekt ermöglicht durch die Einbindung von Praxispartnern und die Partizipation von betroffenen Gruppen eine bestmögliche Einschätzung der Ist-Situation und der möglichen Widerstände und Probleme im Zuge der Steigerung der Energie-Autarkie. Die Umsetzung erfolgte u. a. durch intensive Bürgerbeteiligungsprozesse und Öffentlichkeitsarbeit.

Es zeigt sich, dass die Begriffe „Energie-Autarkie“ und „Energie-Autonomie“ im Sprachgebrauch und in der Literatur meist deckungsgleich und ohne genaue Definition verwendet werden. Daher wurde eine grundlegende Diskussion und Abgrenzung der Begriffe „Autonomie“ und „Autarkie“ erstellt und ein Definitionsvorschlag zur Verwendung des Begriffes „Energie-Autarkie“ erarbeitet und in einem Artikel veröffentlicht. Spricht man von Energie-Autarkie, ist zunächst einmal zwischen bilanzieller und lastgerechter Energie-Autarkie zu trennen. Überdies kann die Grenze des Autarkie-Begriffs unterschiedlich weit gefasst werden. Als mögliche Betrachtungsweisen können die Versorgung mit Wärme und/oder Strom genannt werden. Seltener wird der Aspekt des Energieverbrauchs im Mobilitätssektor (Treibstoffe) in die Autarkiebetrachtung mit eingeschlossen. Die unterschiedlichen „Wertigkeiten“ verschiedener Energieträger sollten hierbei beachtet werden.

Unterschiedliche Entwicklungen in Hinblick auf Energie-Autarkiebestrebungen wurden zunächst mittels der Cross-Impact-Bilanzanalyse auf eine reduzierte Anzahl von plausiblen Kombinationen von Deskriptoren im Entwicklungsraum reduziert. Die Auswertung der Cross-Impact-Matrix ergab für Metzingen drei vollkonsistente Szenarien, welche – auch auf Grund der geringen Anzahl – den Möglichkeitsraum aller Deskriptoren nicht komplett ausschöpfen. Für Strom und Wärme erscheinen nur bilanzielle Autarkieformen mit bilanzneutralen Biomasseimporten als plausibel. Diese drei Szenarien Stagnierendes Metzingen (BAU), Innovatives Metzingen I (IM1) und Innovatives Metzingen II (IM2) wurden für die Untersuchungen mit dem neu entwickelten Energiesystemmodell TEAM-Metzingen um zwei extreme Autarkieszenarien ergänzt, einem Szenario Strom-autarkes Metzingen (SAM) und einem Szenario Endenergie-autarkes Metzingen (EAM). Tabelle 33 zeigt die ermittelten Autarkiegrade für Strom und Endenergie im Vergleich der Szenarien.

Zu erkennen ist dabei, dass ein hoher Strom-Autarkiegrad in der Tendenz auch einen hohen Energie-Autarkiegrad zur Folge hat, da der Strombereich einen sehr relevanten Bestandteil des Energiesystems darstellt. Insgesamt stellt die bilanzielle Strom-Autarkie keine bedeutsame Hürde dar. Deutlich ambitionierter hingegen stellt sich durch den relativ gesehen hohen Anteil des Wärmebedarfs an der gesamten Nutzenergiestruktur sowie der zusätzlichen betrachteten Mobilitätsnachfrage Metzingens das Ziel der Energie-Autarkie heraus.

Dies wird auch bei einer Betrachtung der ökonomischen Auswirkungen der unterschiedlichen Entwicklungen in den Szenarien deutlich. Im Szenario Stagnierendes Metzingen (BAU) entstehen pro erzeugtem

TJ Kosten von rund 85 Mio. €. Im Szenario Innovatives Metzingen I (IM1) steigen diese auf 92 Mio. € pro TJ an, nahezu vergleichbar mit dem Szenario Innovatives Metzingen II (IM2) mit 93 Mio. € pro TJ. Im Szenario Strom-autarkes Metzingen (SAM) ergeben sich nochmals höhere Kosten als in den drei vorangegangenen Szenarien: 95 Mio. € pro TJ. Das Szenario Endenergie-autarkes Metzingen (EAM) weist schließlich mit ca. 118 Mio. € pro TJ die mit Abstand höchsten Kosten auf.

**Tabelle 33: Vergleich der Autarkiegrade der fünf für Metzingen analysierten Szenarien**

	2012	2021	2030	2040	2050
<b>BAU-Szenario:</b> Stromautarkiegrad	10,7 %	14,5 %	46,6 %	67,7 %	80,9 %
<b>BAU-Szenario:</b> Energieautarkiegrad	4,3 %	5,3 %	10,8 %	15,9 %	20,2 %
<b>IM1-Szenario:</b> Stromautarkiegrad	10,7 %	31,4 %	102,6 %	201,8 %	297,1 %
<b>IM1-Szenario:</b> Energieautarkiegrad	4,3 %	8,0 %	23,1 %	55,6 %	82,3 %
<b>IM2-Szenario:</b> Stromautarkiegrad	10,7 %	31,4 %	102,4 %	204,6 %	309,5 %
<b>IM2-Szenario:</b> Energieautarkiegrad	4,3 %	8,2 %	23,2 %	54,9 %	80,2 %
<b>SAM-Szenario:</b> Stromautarkiegrad	10,7 %	121,6 %	239,1 %	370,8 %	497,7 %
<b>SAM-Szenario:</b> Energieautarkiegrad	4,3 %	23,6 %	41,9 %	65,3 %	80,1 %
<b>EAM-Szenario:</b> Stromautarkiegrad	10,7 %	100,0 %	136,4 %	220,4 %	248,6 %
<b>EAM-Szenario:</b> Energieautarkiegrad	4,3 %	33,4 %	66,8 %	103,9 %	141,0 %

Auch für Baden-Württemberg zeigen die Autarkiebestrebungen höhere Kostenbelastungen im Vergleich zum Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW). Die notwendige Investition in neue Technologien und Anwendungen im Bundesland Baden-Württemberg und die damit verbundenen höheren fixen Betriebskosten können durch die Einsparungen bei den Kosten für die zu importierenden Brennstoffen bzw. den Stromimport nicht kompensiert werden. Die Zusatzkosten belaufen sich auf bis zu 2,1 Mrd. €<sub>2010</sub> pro Jahr, d. h. bis zu 200 €<sub>2010</sub> pro Kopf und Jahr, im Szenario Strom-autarkes Baden-Württemberg (SABW) bzw. auf bis zu 6,1 Mrd. €<sub>2010</sub> pro Jahr, d. h. bis zu 580 €<sub>2010</sub> pro Kopf und Jahr, im Szenario Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW). Kumuliert über den gesamten Betrachtungszeitraum weist das Szenario Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW) gegenüber dem Basisszenario mit ETS-Zielen (ETSBW) (nicht-abdiskontierte) Zusatzbelastungen von nahezu 100 Mrd. €<sub>2010</sub> auf, im Szenario Strom-autarkes Baden-Württemberg (SABW) betragen sie ca. 46 Mrd. €<sub>2010</sub>.

Tabelle 34 zeigt die mit diesen Aufwendungen erreichbaren Strom-Autarkiegrade und Primärenergie-Autarkiegrade für Baden-Württemberg. Zu erkennen ist dabei, gegenläufig zu den Ergebnissen für Metzingen, dass ein hoher Strom-Autarkiegrad nicht automatisch auch einen hohen Primärenergie-Autarkiegrad zur Folge hat, da der Strombereich zwar einen relevanten Bestandteil des baden-württembergischen Energiesystems darstellt, die alleinige Betrachtung der Strom-Autarkie wie im Szenario Strom-autarkes Baden-Württemberg (SABW) aber nicht gewährleistet, dass dies mit der Nutzung heimischer

Energiequellen einhergeht. Anders herum führt eine Fokussierung auf die Primärenergie-Autarkie wie im Szenario Primärenergie-autarkes Baden-Württemberg (PABW) dazu, dass auch im Strombereich ein hoher Anteil der Strombereitstellung aus heimischen Erneuerbaren Energiequellen erfolgt. Teilweise wird jedoch auch eine Verringerung des Strom-Autarkiegrades in Kauf genommen, um eine weitere Erhöhung des Primärenergie-Autarkiegrades erreichen zu können. Dies zeigt die Bedeutung einer generelleren Betrachtung der Autarkie Thematik inklusive der Bereiche Wärme und Mobilität.

**Tabelle 34: Vergleich der Autarkiegrade der drei für Baden-Württemberg analysierten Szenarien**

	2012	2020	2030	2040	2050
<b>ETSBW-Szenario:</b> Stromautarkiegrad	81,7 %	66,3 %	64,0 %	67,6 %	57,1 %
<b>ETSBW-Szenario:</b> Primärenergieautarkiegrad	12,2 %	19,0 %	27,0 %	31,5 %	38,8 %
<b>SABW-Szenario:</b> Stromautarkiegrad	81,7 %	100,0 %	99,9 %	99,9 %	99,0 %
<b>SABW-Szenario:</b> Primärenergieautarkiegrad	12,2 %	17,8 %	24,7 %	29,1 %	35,6 %
<b>PABW-Szenario:</b> Stromautarkiegrad	81,7 %	66,5 %	63,7 %	86,4 %	96,7 %
<b>PABW-Szenario:</b> Primärenergieautarkiegrad	12,2 %	26,2 %	43,6 %	66,9 %	74,7 %

Die für Baden-Württemberg und für Metzingen untersuchten Schwerpunkttechnologien wurden technisch, aber auch ökobilanziell charakterisiert und ihr potenzieller Beitrag zu den jeweiligen Energiesystemen der Bilanzräume Metzingen und Baden-Württemberg mittels Ausbaupotenzialanalysen identifiziert. Ein Schwerpunkt lag auch auf der projektbegleitenden zielgruppengerechten Aufbereitung der Ergebnisse um die Bürgerbeteiligung zu unterstützen. Durch die Integration von Schwerpunkttechnologien sowie weiterer Technologieoptionen in ein neu entwickeltes Ökobilanz-Systemmodell wurden ökologische Bewertungen der Energiesystemszenarien in den Bilanzräumen Baden-Württemberg und Metzingen vorgenommen. Dabei wurde die Bereitstellung von Wärme und von Strom implementiert.

Es zeigt sich, dass sich grundsätzlich das Umweltprofil mit steigendem Autarkiegrad verbessert. Bedingt durch den steigenden Anteil an erneuerbaren Energien steigt die Bedeutung der Herstellung und der Entsorgung gegenüber der Nutzungsphase bei der Stromversorgung deutlich an. Im Wärmesystem ist dieser Effekt nicht zu sehen. Sowohl für die Bereitstellung von Wärme als auch für die Bereitstellung von Strom hat sich der größere Bilanzraum Baden-Württemberg als vorteilhaft gezeigt. Der potenzielle Beitrag an klimawirksamen Emissionen sowie der potenziell notwendige Einsatz an fossiler Primärenergie sind im Vergleich zum Bilanzraum Metzingen geringer.

Wenn auch die im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes durchgeführten Methoden- und Modellkopplungen mit Cross-Impact-Bilanzanalysen, Energiesystemmodellen, Stromnetzmodellen und dem ökologischen Gesamtmodell einen deutlichen Entwicklungs- und Erkenntnisfortschritt erbracht haben, bleibt dennoch ein Forschungs- und Entwicklungsbedarf sowohl für die einzelnen Komponenten als auch für die Kopplung selbst. So könnten durch eine höhere zeitliche Auflösung der Untersuchungen, sowohl für Baden-Württemberg als auch für Metzingen, weitere Potenziale identifiziert werden und zum Beispiel auch saisonale Einflüsse der Verbrauchs- und Erzeugungsstruktur auf das System weitreichender berücksichtigt werden. Die Autarkieuntersuchungen und die ökonomische Modellierung könnten im

Abgleich mit den ökologischen Konsequenzen in einer multi-kriteriellen Bewertung zusammengeführt werden, die die Gewichtung der Teilziele aus den Partizipationsprozessen mit einbezieht. Schließlich ist auch die Frage zu analysieren, ob und wie die für Baden-Württemberg und Metzingen erzielten, zum Teil widersprüchlichen, Ergebnisse auf weitere Bilanzräume anwendbar bzw. übertragbar sind. Hierfür würde eine Clusterung der in Baden-Württemberg bzw. in Deutschland vorzufindenden Nachfragestrukturen eine wichtige Grundlage darstellen.

Zukünftig sollten die Systemuntersuchungen noch um weitere Wirkungskategorien erweitert werden, um ein ganzheitlicheres Bild der Umweltauswirkungen der Energiebereitstellung bei verschiedenen Autarkiegraden zu erzeugen. Eine weitere Verbesserung für das Ökobilanz-Energiesystemmodell wäre die durchgängige Verknüpfung von Strom, Wärme und Mobilität. Wichtig wäre zudem auch die Integration von Verbraucherinformationen in das Systemmodell, sowie die Erweiterung der Untersuchungen in Bezug auf die Systemgrenzen. Die konsistente Integration von Gewerbe und Industrie bei Wärme- und Stromversorgung und -bedarf könnte dazu ein erster Schritt sein. Gleichzeitig bedingt eine Integration dieser neuen Verbraucherstrukturen auch, dass die Betrachtung um Kühlungstechnologien erweitert werden muss. Erste Maßnahmen für eine Integration der Kühlung wurden im Ökobilanz-Systemmodell schon vorgenommen.

Als Ergebnis aus der Bürgerbeteiligung in Metzingen zeigt sich, dass Energie-Autarkie als technisch relativer Ausbaupfad betrachtet, aber energiepolitisch als Ideal angesehen wird, um über pragmatische Lösungen sich diesem Ideal zu nähern. Die Relativierung richtet sich nach den Kriterien ökologischer und ökonomischer Machbarkeit. Dies schließt einen moderaten dezentralen, bedarfsnahen und qualitativen Ausbaupfad mit Ökostrom-Importen ein. Eine Autonomie über externe EE-Anlagen soll die Selbstbestimmung und ideale Abstimmung in einen lokalen Smart-System gewährleisten. Metzingen soll eine Smart-City werden. Kollektive Anlagen sollen gegenüber individuellen Anlagen gesondert gefördert werden. Die Akzeptanz und Partizipationsforschung hat zum konkreten Erfolg, dass sich in Metzingen relativ viele Bürger/innen für die Detaildiskussion einfanden. Der Rücklauf der Bürgerumfrage zeigt jedoch ein geringes Interesse am Thema Energiewende. Die Ergebnisse erscheinen äquivalent zu den technischen Analysen und Szenarien: moderater Ausbau der Erneuerbaren Energien, relative Autarkie und angestrebte Autonomie. Das vom Modellprojekt Rottweil-Hausen übernommene Design bewährte sich jedoch.

Auch in den auf Ebene des Bundeslandes Baden-Württemberg durchgeführten Befragungen zeigt sich ein ähnliches Bild. Autarkiebestrebungen sind keinem der Befragten ein zentrales Anliegen. Lastgerechte Autarkie wird durchweg als nicht sinnvoll bzw. erstrebenswert erachtet. Bilanzielle Autarkie erscheint dagegen in einem positiveren Licht. Sie stellt jedoch auch kein Primärziel dar. Manche Befragten betrachten sie als positiven Nebeneffekt bei der Verwirklichung ihrer Ziele (z. B. Ausbau erneuerbarer Energien, Energiewende). Hinsichtlich Energie-Autarkiebemühungen existiert auf Ebene des Bundeslandes kein Akteur, den alle Befragten als zentrale treibende Kraft identifizieren. Manche betrachten Kommunen (Stichwort „Bioenergiedörfer“) und Stadtwerke als zentrale Akteure, andere wollen diesen wiederum keine herausragende Rolle zugestehen. Allein die politischen Institutionen, die für die politisch-regulatorische Rahmensetzung im Energiebereich zuständig sind (Bundes- und Landesregierung), werden von allen Befragten als zentrale Akteure betrachtet, obwohl diese selbst keine Energie-Autarkieziele verfolgen. Sie sind jedoch entscheidend dafür, was im Energiebereich wirtschaftlich sowie erlaubt und damit letztendlich möglich ist.

## Literaturverzeichnis

**Arbeitskreis Klima und Energie Metzingen, Stadt Metzingen, Stadtwerke Metzingen, Regionen Aktiv. 2005.** *Erneuerbare Energien in Metzingen*. Metzingen : s.n., 2005.

**Baumann, M., et al. 2016a.** *Methodenband: Ökobilanzielle Untersuchung der ökologischen Auswirkungen des gesamten Fahrzeugbestandes in verschiedenen Autarkie-Szenarien*. Stuttgart : s.n., 2016a.

**Baumann, M., et al. 2016b.** *Methodenband: Ökobilanzielle Untersuchung von verschiedenen Sanierungsoptionen*. Stuttgart : s.n., 2016b.

**Blesl et al. 2010.** *Verfahren zur Entwicklung einer digitalen Wärmebedarfskarte, Kurzbericht*. Frankfurt : AGFW, 2010.

**Blesl, Markus. 2011.** *Kraft-Wärme-Kopplung im Wärmemarkt Deutschlands und Europas - eine Energiesystem- und Technikanalyse*. Stuttgart : Forschungsbericht des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, 2011.

**Blesl, Markus, et al. 2010.** *Effects of climate and energy policy related measures and targets on the future structure of the European energy system in 2020 and beyond*. s.l. : Energy Policy 38 6278-6292, 2010.

**BMEL und Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe e.V.** Bundeswettbewerb Bioenergie-Kommunen 2016. [Online] [Zitat vom: 02. 09 2017.] <http://www.bioenergie-kommunen.de/>.

**Born, Rolf, Diefenbach, Nikolaus und Loga, Tobias. 2003.** *Energieeinsparung durch Verbesserung des Wärmeschutzes und Modernisierung der Heizungsanlage für 31 Musterhäuser der Gebäudetypologie*. Darmstadt : Institut für Wohnen und Umwelt (IWU), 2003.

**Bragagnolo, et al. Januar 2009.** Präsentation "Energieverbrauch und CO2 Emissionen in Metzingen Entwicklung 1990 - 2007". [Buchverf.] AKE Metzingen AG CO2. Januar 2009.

**Brodecki, Lukasz, et al. 2016.** *Metzingen will 2! Integriertes Klimaschutzkonzept für die Stadt Metzingen*. Stuttgart : Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, 2016.

**Centre of Environmental Science – Leiden University (CML). 2001.** Characterization and normalization factors. [Online] 2001. <http://cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html>.

**Conseil international des grands réseaux électriques (CIGRÉ). 2014.** *Benchmark for network integration of renewable and distributed energy resources*. Paris : s.n., 2014.

**Deutscher Bundestag. 2015.** *Studien zum Thema ökologischer Fußabdruck von Bauprodukten im Baubereich – Teil 1 – Graue Energie ( Allgemeine Darstellung) – Teil 2. Aktenzeichen WD 8 - 3000 - 010/15. WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, Bildung und Forschung.* s.l. : Wissenschaftliche Dienste, 2015.

**Deuschle, Jürgen, et al. 2015.** *Energie-Autarkie und Energie-Autonomie.* Wiesbaden : Springer Fachmedien, 2015.

**DIN EN ISO 14040. 2006.** *Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen.* 2006.

**DIN EN ISO 14044. 2006.** *Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen.* 2006.

**ETSAP und IEA. 2002.** *Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP).* Contributing to the Kyoto Protocol, Summary of Annex VII (1999-2002) : s.n., 2002.

**Fahl et al. 2012.** *Integriertes Energie- und Klimaschutzkonzept für die Region Neckar-Alb.* Stuttgart : s.n., 2012.

**Frank, Thomas. 2012.** *Abwasser-Wärmenutzung am Beispiel des Abwassersammlers Ermstal.* Esslingen : Fakultät Versorgungs- und Umwelttechnik der Hochschule Esslingen, 2012.

**Fritz Technik GmbH & Co. KG. März 2014.** *Machbarkeitsstudie zur Nutzung Erneuerbarer Energien in Metzingen.* Bad Urach : Auftraggeber Stadtwerke Metzingen, März 2014.

**Held. 2010.** *Photovoltaik aus Sicht der Ökobilanz (Präsentation).* Bauzentrum München : s.n., 2010.

**Held und Baumann. 2011.** *Assessment of the environmental impacts of electric vehicle concepts (Presentation). Towards Life Cycle Sustainability Management.* s.l. : Dordrecht: Springer, 2011, S. 8 pp.

**Held und Ilg. 2011.** *Update of environmental indicators and energy payback time of CdTe PV systems in Europe. Progress in Photovoltaics: Research and Applications.* 2011.

**Institut für dezentrale Energietechnologien, Fachgebiet VWL, Universität Kassel. 2016.** *100ee-Regionen.* [Online] 12. 08 2016. [Zitat vom: 09. 02 2017.] <http://www.100-ee.de/>.

**Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Lehrstuhl für Bauphysik-Ganzheitliche Bilanzierung, Universität Stuttgart. 2016.** *Technologieatlas.* Stuttgart : s.n., 2016.

**Kearney und Kaplan. 1997.** *Toward a Methodology for the Measurement of Knowledge Structures of Ordinary People: The Conceptual Content Cognitive Map (3CM).* *Environment and Behavior* 29 (5). 1997, S. 579-617.



**Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. 2014.**

*Potentialatlas Erneuerbaren Energien*. Karlsruhe : LUBW, 2014.

**Loga, Tobias, et al. 2015.** *Deutsche Wohngebäudetypologie - Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden*. Darmstadt : Institut für Wohnen und Umwelt (IWU), 2015.

**McKane, Aimee und Hasanbeigi, Ali. 2011.** *Motor systems energy efficiency supply curves: A methodology for assessing the energy efficiency potential of industrial motor systems*. Berkeley : Energy Policy, vol. 39, issue 10, pages 6595-6607 , 2011.

**NEEDS working paper RS2, WP2.3. 2006.** Key Drivers for Energy Trends in EU: specification of the Baseline and Policy Scenarios. [Online] 2006. [www.needs-project.org](http://www.needs-project.org).

**PE-International in Zusammenarbeit mit der Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Bauphysik. 2012.** GaBi 7: Software-System und Datenbanken zur Ganzheitlichen Bilanzierung. Stuttgart und Echterdingen : s.n., 2012.

**Pfenning, Uwe. 2016.** *Energieautarkie ist kein Mythos!* Tübingen : Stadt+Werk Nr.7/8 2016, K21 Media Verlag ISSN 2193-195X, 2016.

**Pfenning, Uwe und Benighaus, Christina. 2008.** *Partizipativer Wandel – methodischer Wandel: Neue und klassische Formen der Bürgerbeteiligung im Vergleich*. Wiesbaden : Vetter Angelika, Erfolgsbedingungen lokaler Bürgerbeteiligung, Verlag für Sozialwissenschaften S.216-237, 2008.

**Pfenning, Uwe und Schröter, Regina. 2016.** Von Energiewenden und neuen Energiebürgern. *ISSN 1867 9935*. Neu-Isenburg : Genossenschaftsverband e.V. Netzwerk Magazin für Kooperation & Management, Ausgabe 02/2016 , 2016, S. S.10-12.

**Remme, U, et al. 2001.** MESAP/-TIMES - Advanced decision support for energy and environmental planning. *Operations Research Proceedings*. Berlin : Springer-Verlag, 2001, S. pp.59-66.

**Saidur, R und Mahlia, T. 2010 .** *Energy, economic and environmental benefits of using high-efficiency motors to replace standard motors for the Malaysian industries*. Kuala Lumpur : Energy Policy 38 (2010) 4617–4625, 2010 .

**Schlesinger , Michael , et al. 2014.** *Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose*. Basel, Köln, Osnabrück : Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, 2014.

**Schlomann, Barbara, et al. Februar 2015.** *Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2011 bis 2013*. Karlsruhe, München, Nürnberg : s.n., Februar 2015.

**Schnabel, Sascha. 2016.** *Erstellung einer städtischen Energiebilanz für den GHD-Sektor anhand branchenspezifischer Kennwerte und Erweiterung durch Datenerhebung.* Stuttgart : s.n., 2016.

**Statistisches Bundesamt Destatis. 2015.** *Umweltnutzung und Wirtschaft.* Wiesbaden : s.n., 2015.

**Statistisches Landesamt Baden Württemberg. 2016.** [Online] 2016. [Zitat vom: 01. 06 2016.] <http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/>.

**Stuttgart, IER Universität und Rottenburg, Hochschule für Forstwirtschaft. 2010.** Integriertes Klimaschutz- und Energiekonzept. Rottenburg : s.n., 2010.

**Umweltbundesamt. 2016.** Verbrauch Energiebereitstellung. [Online] 12. 08 2016. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energiebereitstellung-verbrauch#strap1>.

**Weimer - Jehle, Wolfgang. 2016.** ScenarioWizard 4.2 - Programm zur qualitativen System- und Szenarienanalyse mit der Cross-Impact Bilanzanalyse (CIB) - Bedienungsanleitung. [Online] 2016. [Zitat vom: 09. 02 2016.] [http://cross-impact.de/Ressourcen/ScenarioWizardManual\\_dt.pdf](http://cross-impact.de/Ressourcen/ScenarioWizardManual_dt.pdf).

**Weimer -Jehle, Wolfgang. 2014.** Methodenblätter zur Cross-Impact Bilanzanalyse - Blatt Nr.1. [Online] 2014. [Zitat vom: 09. 02 2017.] [http://www.cross-impact.de/Ressourcen/Methodenblatt\\_Nr\\_1.pdf](http://www.cross-impact.de/Ressourcen/Methodenblatt_Nr_1.pdf).

**Weimer- Jehle, Wolfgang. 2009.** *Szenarientwicklung mit der Cross-Impact-Bilanzanalyse.* Paderborn : Vorausschau und Technologieplanung, 2009. S. 435-454.

**Weimer-Jehle, Wolfgang. 2006.** Cross-Impact Balances: A System-Theoretical Approach to Cross-Impact Analysis. *Technological Forecasting and Social Change* 77:3. 2006, S. 334-361.

**Weimer-Jehle, Wolfgang, et al. 2016.** *Context scenarios and their usage for the construction of socio-technical energy scenarios.* s.l. : Energy 111, 956-970. DOI: 10.1016/j.energy.2016.05.073., 2016.

**ZSW Universität Stuttgart, DLR Stuttgart. 2010.** *Bürgerbeteiligung schafft Akzeptanz – Pilotprojekt zur Biogas-Nahwärmeversorgung im Gebäudebestand* S.22-26. Stuttgart : Landesanstalt für Umwelt/Umweltministerium Baden-Württemberg – Leuchtturmprojekte aus der Umweltforschung, 2010.

## Anhang

### Deskriptorenessays Autarkie Baden-Württemberg

#### A Ausbau des Verteilnetzes

Der Ausbau Erneuerbarer Energien (EE) ist eng verknüpft mit einem Aus- bzw. Umbau der Stromnetze. Abhängig von dem Grad der Dezentralität des EE-Ausbaus müssen neben den Übertragungsnetzen auch die Verteilnetze mehr oder weniger stark ausgebaut werden.

Für den Ausbau der Verteilnetze kommen mehrere technische Strategien in Frage, um deren Leistungsfähigkeit zu erhöhen. Die Anwendung der in einer Variante beschriebenen technischen Strategie bedeutet, dass zunächst alle Leistungszugewinne, die ohne die beschriebene Maßnahme erreicht werden können ausgeschöpft sind. Hierbei bauen die Varianten entsprechend der Reihenfolge aufeinander auf. Der technologische Aufwand sowie der Vernetzungsgrad nehmen dabei zu:

- A1 Klassischer Netzausbau:** Die Leistungsfähigkeit wird in erster Linie durch das Verlegen von neuen Kabeln bzw. Leitungen erhöht.
- A2 Stand der Technik:** Ein Einwirken auf die Netzspannung über regelbare Transformatoren und aktives Blindleistungsmanagement erlauben eine Reduktion notwendiger Netzausbaumaßnahmen.
- A3 Smart Grid Ansatz:** Es wird eine Kombination verfügbarer innovativer Technologien genutzt um aktiv auf das Verteilnetz einzuwirken. Schaltbare Lasten und die Integration von Speichern erhöhen die Flexibilität. Voraussetzung sind hierfür ein hoher Vernetzungsgrad sowie Kenntnis des aktuellen Netzzustandes.

## **B Ausbau Erneuerbare Energien**

Der Anteil von Erneuerbaren Energien am Strommix in Baden-Württemberg hat sich von 2003 bis 2012 von 7,4 % auf 23,9 % gesteigert. Um die Klimaschutzziele des Landes zu erreichen sollen bis 2050 80% der (gesamten) Energie in Baden-Württemberg aus erneuerbaren Quellen gewonnen werden, wozu auch die Nachfrage um 50% gesenkt werden soll. Neben dieser Zielvorstellung soll als zweite Variante eine Entwicklung berücksichtigt werden, in der dieses Ziel nicht erreicht wird.

Wie sich dieser Anteil auf welche Techniken verteilt ist Bestandteil der Deskriptoren „Ausbau Photovoltaik“, „Ausbau Windkraft“, „Entwicklung Biokraftstoffe“ und „Eigenerzeugung Strom und Wärme“.

- B1** Bis 2050 werden 80% der Endenergie in Baden-Württemberg aus erneuerbaren Quellen gewonnen.
- B2** Bis 2050 werden 50% der Endenergie in Baden-Württemberg aus erneuerbaren Quellen gewonnen.

## C Autarkiegrad Strom

Bei der Beurteilung der Energie-Autarkie, lassen sich zwei grundlegende Konzepte unterscheiden: Bilanzielle Autarkie beschreibt einen Zustand, in dem innerhalb des Bilanzkreises über einen längeren Zeitraum (meist ein Jahr) mindestens soviel Strom generiert wie verbraucht wird; solange sie in der Summe nicht höher als die Exporte sind, sind Importe dabei zulässig. Bei lastgerechter Autarkie hingegen, sind (außer dem Eintrag von Wind-, Wasser- und Sonnenkraft) keine Importe zulässig und der Verbrauch innerhalb des Bilanzkreises wird zu jedem Zeitpunkt auch aus einer innerhalb gelegenen Produktion gedeckt.

Für die zukünftige Entwicklung des Autarkiegrades in Bezug auf Strom in Baden-Württemberg wollen wir folgende Varianten untersuchen:

- C1 50% bilanzielle Stromautarkie:** Bis 2050 wird in Baden-Württemberg über das Jahr gemessen mindestens die Hälfte der verbrauchten elektrischen Leistung in Baden-Württemberg generiert.
- C2 100% bilanzielle Stromautarkie:** Bis 2050 wird in Baden-Württemberg über das Jahr gemessen mindestens so viel elektrische Leistung generiert, wie hier verbraucht wird.
- C3 33% lastgerechte Stromautarkie:** Bis 2050 wird in Baden-Württemberg zu jedem Zeitpunkt mindestens ein Drittel der elektrischen Leistung, die hier verbraucht wird, auch generiert.
- C4 66% lastgerechte Stromautarkie:** Bis 2050 wird in Baden-Württemberg zu jedem Zeitpunkt mindestens zwei Drittel der elektrischen Leistung, die hier verbraucht wird, auch generiert.
- C5 100% lastgerechte Stromautarkie:** Bis 2050 wird in Baden-Württemberg zu jedem Zeitpunkt mindestens soviel elektrische Leistung bereitgestellt, wie verbraucht wird.

## D Autarkiegrad Wärme

Bei der Beurteilung der Energie-Autarkie, lassen sich zwei grundlegende Konzepte unterscheiden: Bilanzielle Autarkie beschreibt einen Zustand, in dem innerhalb des Bilanzkreises über einen längeren Zeitraum (meist ein Jahr) mindestens soviel Wärme generiert wie verbraucht wird; solange sie in der Summe nicht höher als die Exporte sind, sind Importe dabei zulässig. Bei lastgerechter Autarkie hingegen, sind (außer dem Eintrag von Wind-, Wasser- und Sonnenkraft) keine Importe zulässig und der Verbrauch innerhalb des Bilanzkreises wird zu jedem Zeitpunkt auch aus einer innerhalb gelegenen Produktion gedeckt.

Bei der für Raumwärme benötigten Energie ist der Anteil der Erneuerbaren in Baden-Württemberg im Moment geringer als im Strommix. Da gleichzeitig ca. 2/3 der von Haushalten verbrauchten Energie für Raumwärme eingesetzt werden, ist eine Autarkie in diesem Bereich schwerer zu realisieren als im Strombereich.

Für die zukünftige Entwicklung des Autarkiegrades der Energie für Wärme wollen wir folgende Entwicklungsmöglichkeiten betrachten:

- D1 50% bilanzielle Wärmeautarkie:** Bis 2050 wird in Baden-Württemberg über das Jahr gemessen mindestens die Hälfte der hierfür verbrauchten Energie in Baden-Württemberg generiert.
- D2 100% bilanzielle Wärmeautarkie:** Bis 2050 wird in Baden-Württemberg über das Jahr gemessen mindestens so viel Energie generiert, wie hier für Raumwärme verbraucht wird.
- D3 33% lastgerechte Wärmeautarkie:** Bis 2050 wird in Baden-Württemberg zu jedem Zeitpunkt mindestens ein Drittel der Energie, die hier für Raumwärme verbraucht wird, auch generiert.
- D4 66% lastgerechte Stromautarkie:** Bis 2050 wird in Baden-Württemberg zu jedem Zeitpunkt mindestens zwei Drittel der Energie, die hier für Raumwärme verbraucht wird, auch generiert.
- D5 100% lastgerechte Wärmeautarkie:** Bis 2050 wird in Baden-Württemberg zu jedem Zeitpunkt mindestens soviel Energie generiert, wie für Raumwärme verbraucht wird.

## **E Autarkiegrad Mobilität**

Bei der Beurteilung der Energie-Autarkie, lassen sich zwei grundlegende Konzepte unterscheiden: Bilanzielle Autarkie beschreibt einen Zustand, in dem innerhalb des Bilanzkreises über einen längeren Zeitraum (meist ein Jahr) mindestens soviel Endenergie für Mobilität generiert, wie verbraucht wird; solange sie in der Summe nicht höher als die Exporte sind, sind Importe dabei zulässig. Bei lastgerechter Autarkie hingegen, sind (außer dem Eintrag von Wind-, Wasser- und Sonnenkraft) keine Importe zulässig und der Verbrauch innerhalb des Bilanzkreises wird zu jedem Zeitpunkt auch aus einer innerhalb gelegenen Produktion gedeckt.

Für die zukünftige Entwicklung des Autarkiegrades der Energie für Mobilität wollen wir folgende Entwicklungsmöglichkeiten betrachten:

- E1 50% bilanzielle Mobilitätsautarkie:** Bis 2050 wird in Baden-Württemberg über das Jahr gemessen mindestens die Hälfte der hierfür verbrauchten Energie in Baden-Württemberg generiert.
- E2 100% bilanzielle Mobilitätsautarkie:** Bis 2050 wird in Baden-Württemberg über das Jahr gemessen mindestens so viel Energie generiert, wie hier für Mobilität verbraucht werden.
- E3 33% lastgerechte Mobilitätsautarkie:** Bis 2050 wird in Baden-Württemberg zu jedem Zeitpunkt mindestens ein Drittel der Energie, die hier für Mobilität verbraucht wird, auch generiert.
- E4 66% lastgerechte Mobilitätsautarkie:** Bis 2050 wird in Baden-Württemberg zu jedem Zeitpunkt mindestens zwei Drittel der Energie, die hier für Mobilität verbraucht wird, auch generiert.
- E5 100% lastgerechte Mobilitätsautarkie:** Bis 2050 wird in Baden-Württemberg zu jedem Zeitpunkt mindestens soviel Energie generiert, wie hier für Mobilität verbraucht wird.

## F Gesetzgebung Strommarkt

Der deutsche Strommarkt ist im Moment am ehesten als „Energy-Only“ Markt zu bezeichnen: es wird nur die gelieferte Leistung bezahlt, für das Vorhalten von Kapazitäten erfolgt – außer implizit über die höheren Preise am Regelenergiemarkt – keine besondere Vergütung. Im Moment gibt es Diskussionen darüber, dass ein solcher Markt die, sich durch einen steigenden Anteil Erneuerbarer verschärfende, Problematik der Versorgungssicherheit zukünftig nicht genügend Anreize bietet um ausreichende Back-up-Kapazitäten zu installieren.<sup>5</sup> Als Alternative werden insbesondere die Strategische Reserve und der Kapazitätsmarkt diskutiert.

Als zukünftige Entwicklung werden deshalb folgende Alternativen für Möglich gehalten:

- F1 Energy-Only-Market:** Das gegenwärtige Marktmodell wird beibehalten, es wird nur Leistung vergütet und keine vorgehaltenen Kapazitäten.
- F2 Kapazitätsmarkt:** Es wird eine explizite Vergütung von vorgehaltenen Kapazitäten eingeführt.
- F3 Strategische Reserve:** Es erfolgt eine Aufteilung des Strommarktes in Gütermarkt und Strategische Reserve. Falls über den Gütermarkt keine ausreichende Kapazität für die gewünschte Versorgungssicherheit entsteht, werden diese von einer zentralen (staatlichen) Instanz beschafft.

---

<sup>5</sup> EWI (2012): Untersuchungen zu einem zukunftsfähigen Strommarktdesign.



## G Entwicklung Biokraftstoffe

Im Bereich des motorisierten Straßenverkehrs ist für die Energiebilanz – neben der Effizienz – die Beimischung von Biokraftstoffen von besonderer Bedeutung. Seit 2015 gelten in Deutschland hierfür nicht mehr die kalorischen Mindestanteile, sondern eine Klimaschutzquote zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen durch Biokraftstoffe (2015:3%; 2020: 6%).<sup>6</sup>

Das zukünftige Potenzial für die Nutzung von Biokraftstoffen wird sehr unterschiedlich eingeschätzt: Langfristszenarien zur Energieversorgung in Deutschland verwenden für 2050 eine Spannweite von 6% bis knapp 100% der im Verkehrssektor benötigten Kraftstoffe.<sup>7 8 9</sup> Da die Gesetzgebung jedoch mittlerweile schon für 2020 einen Anteil von ca. 10% vorschreibt, soll für 2050 15% als untere Grenze der Varianten gelten.

**G1 Geringe Beimischung:** Der Anteil von Biokraftstoffen wächst bis 2050 nicht über 15%.

**G2 Mittlere Beimischung:** Der Anteil von Biokraftstoffen wächst weiter und erreicht 2050 einen Anteil von ca. 50%.

**G3 Starke Beimischung/Substitution:** Bis 2050 werden konventionelle Kraftstoffe durch Biotreibstoffe fast vollständig ersetzt und erreichen einen Anteil von über 85%.

---

<sup>6</sup> Gesetz zur Änderung der Förderung von Biokraftstoffen vom 15. Juli 2009 (BGBl. I. S.1804)

<sup>7</sup> BMU 2010: „Beitrag der Elektromobilität zu langfristigen Klimaschutzziele und Auswirkungen auf die Automobilindustrie.“ Mc Kinsey Company, Abschlussbericht für das BMU, April 2010.

<sup>8</sup> WWF 2009: Modell Deutschland. Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken

<sup>9</sup> Nitsch et al. 2012: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global

## H Struktur des ÖPNV

Mit öffentlichen Nahverkehrsmitteln legten die Einwohner Baden-Württembergs im Jahr 2010 ca. 1180 km zurück; ca. 7 % der jährlichen Wege werden damit über den ÖPNV bewältigt. Dieser Wert stagniert seit 2008 und stellt den 4. Rang unter den Flächenländern in Deutschland dar.<sup>1011</sup> Zukünftig steht der ÖPNV gerade in der Fläche vor großen Herausforderungen, da durch den erwarteten Rückgang des Schülerverkehrs die wichtigste Finanzierungssäule des ÖPNV in diesem Bereich brüchig wird und zudem mit einer weiteren Konzentration der Bevölkerung in Ballungszentren zu rechnen ist.<sup>12</sup>

**H1 Rückgang:** Die Herausforderungen um den ÖPNV in der Fläche auf jetzigem Niveau erhalten zu können werden nicht bewältigt. In den Städten bleibt der Anteil des ÖPNV konstant.

**H2 Konstanter Anteil:** Der Anteil des ÖPNV an den zurückgelegten Wegstrecken bleibt in etwa konstant. Die Versorgung im ländlichen Raum bleibt auf jetzigem Niveau erhalten.

**H3 Anstieg:** Die Verkehrsverbünde schaffen einen erfolgreichen Wandel zum Mobilitätsverbund, in dem auch abgestimmte Angebote von Carsharing, Taxen und Fahrradverleih integriert werden und schaffen es im städtischen und ländlichen Raum ihre Attraktivität zu erhöhen.<sup>13</sup>

---

<sup>10</sup> STALA-BW (2012): Zukunft Baden-Württemberg. Indikatoren im Vergleich. <https://www.statistik-bw.de/Veroeffentl/806212001.pdf>.

<sup>11</sup> Mobilität in Deutschland 2008. Abschlussbericht. [http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2008\\_Abschlussbericht\\_I.pdf](http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2008_Abschlussbericht_I.pdf)

<sup>12</sup> Lars Schnieder (2014): Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis 23. Jg., Heft 1, April 2014

<sup>13</sup> Gertz, C.; Gertz, E., 2012: Vom Verkehrs- zum Mobilitätsverbund. Die Vernetzung von inter- und multimodalen Mobilitätsdienstleistungen als Chance für den ÖV; <http://www.vdv.de/vdv-positionspapier-mmm.pdf?forced=true>

## I CO<sub>2</sub>-Preise

Bisher sind in Deutschland Abgaben auf den CO<sub>2</sub>-Ausstoß nur über den europäischen Zertifikatehandel (EU ETS) in Kraft. Momentan belaufen sich die Kosten pro Tonne CO<sub>2</sub> auf ca. 5 €/t und bleiben damit unter dem angestrebten Preis.<sup>14</sup> In Europa gibt jedoch mehrere Länder (z. B. Schweiz, Frankreich, Schweden), die neben dem Zertifikatehandel eigene CO<sub>2</sub>-Steuern oder – Abgaben erheben, die meist deutlich über den Kosten der europäischen Zertifikate liegen, deren Preise allerdings auch weit hinter den ursprünglichen Erwartungen bleiben.

Auch in Deutschland wird hin und wieder über die Einführung einer CO<sub>2</sub>-Abgabe diskutiert. Für die ihre Wirkung innerhalb der Szenarien ist an dieser Stelle nicht wichtig, wo eine solche Abgabe beschlossen wird, sondern in welcher Höhe sie CO<sub>2</sub>-Ausstoß in Deutschland verteuert. Szenarien, in denen die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Abgabe bis 2050 berücksichtigt wird, variieren zwischen 47 €/t<sup>15</sup> und 130 €/t<sup>16</sup>. Da die CO<sub>2</sub>-Preise bisher eher unter den Erwartungen und Planungen geblieben sind, wird dieses Spektrum nach unten etwas erweitert. Dafür werden folgende Möglichkeiten berücksichtigt in denen sich der aktuelle Preis für CO<sub>2</sub>-Ausstoß bis 2050 kontinuierlich auf den in der Variante angegebenen Betrag steigert.

- I1 Niedriger Preispfad:** In Deutschland sind bis 2050 auf ausgestoßenes CO<sub>2</sub> geringe Abgaben zu entrichten (ca. 20 €<sub>(2010)</sub>/t).
- I2 Mittlerer Preispfad:** In Deutschland sind bis 2050 auf ausgestoßenes CO<sub>2</sub> mittelhohe Abgaben zu entrichten (ca. 40 €<sub>(2010)</sub>/t).
- I3 Hoher Preispfad:** In Deutschland sind bis 2050 auf ausgestoßenes CO<sub>2</sub> hohe Abgaben zu entrichten (ca. 120 €<sub>(2010)</sub>/t).

---

<sup>14</sup> Schäuble et al. (2014): CO<sub>2</sub>-Emissionsgrenzwerte für Kraftwerke – Ausgestaltungsansätze und Bewertung einer möglichen Einführung auf nationaler Ebene. IASS Working Paper. [http://www.iass-potsdam.de/sites/default/files/files/working\\_paper\\_emissionsgrenzwerte\\_0.pdf](http://www.iass-potsdam.de/sites/default/files/files/working_paper_emissionsgrenzwerte_0.pdf)

<sup>15</sup> Nitsch et al. 2010

<sup>16</sup> Öko-Institut/Fraunhofer ISE (2014): Klimaschutzszenario 2050. <http://www.oeko.de/oekodoc/2065/2014-638-de.pdf>

## J Sanierungsrate und -tiefe

In Bezug auf die Klimaschutzziele sind die derzeitige Sanierungsrate und -tiefe ungenügend, um die geplante Verbrauchsreduktion der Privathaushalte zu erreichen. Die Energieeffizienz der Wohngebäude hat einen sehr starken Einfluss auf den privaten Energieverbrauch, da ca. 3/4 des direkten Endenergieverbrauches durch Heizen verursacht wird. Da viele Maßnahmen daher auf die Steigerung der Sanierungsrate und der Energieeffizienz zielen, stellt die Fortschreibung des gegenwärtigen Trends die untere Variante dieses Deskriptors dar, wie es auch in den gesichteten Szenarien der Fall ist.<sup>17 18 19 20</sup>

Eine Sanierungstiefe von 100% bedeutet hier, dass alle sanierten Gebäude eine Vollsanierung<sup>21</sup> unterlaufen.

- J1 Schwache Effizienzentwicklung:** Eine geringe Effizienzentwicklung bedeutet eine Fortschreibung der momentanen Praxis mit einer Sanierungsrate von ca. 1% und einer Sanierungstiefe von 30%.
- J2 Moderate Effizienzentwicklung:** Eine moderate Effizienzentwicklung in diesem Bereich würde einen leichten Anstieg der in den letzten Jahren zu beobachtenden Sanierungspraxis bedeuten. Jährlich werden dann ca. 1,5% der Wohngebäude saniert. Die Sanierungstiefe beträgt dabei 50%.
- J3 Starke Effizienzentwicklung:** Eine starke Effizienzentwicklung bedeutet eine Sanierungsrate von ca. 2%, die Sanierungstiefe liegt bei 70%.

---

<sup>17</sup> WWF 2009: Modell Deutschland. Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken

<sup>18</sup> Nitsch et al. 2012: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global

<sup>19</sup> Exxon 2012: Energieprognose 2012 – 2040. Deutschland

<sup>20</sup> Shell 2011: Shell Hauswärme-Studie.

<sup>21</sup> Austausch aller Fenster und des Heizungssystems, sowie Isolierung der kompletten Gebäudehülle (auch des Daches).

## K Mobilitätsverhalten und modal split

Der Modal-Split beschreibt die Verkehrsmittelwahl; meist mit Bezug auf die insgesamt zurückgelegten Kilometer – manchmal auch in Bezug auf die Anzahl der Fahrten. Hier ist durchgängig die erste Variante gemeint. 2008 wurden von Baden-Württembergern rund 18% der motorisierten Verkehrsleistung (ca. 150 Mrd. Personenkilometer) mit ÖPNV und ÖPFV zurückgelegt und 82 mittels MIV (davon 68% als Fahrer).<sup>22</sup>

Landesspezifische Mobilitätsszenarien liegen für Baden-Württemberg für den hier betrachteten Zeitraum nicht vor. Deshalb orientieren sich die Varianten an Trends aus bundesweiten Szenarien. Das Potenzial einer Verlagerung des Personenverkehrs auf die Schiene wird hierbei als eher gering eingeschätzt.<sup>23 24 25</sup>

**K1 Rückgang des MIV, sinkende Personenkilometer:** Die gesamte Personenverkehrsleistung sinkt bis 2050 um ca. 10% gegenüber 2010. Bis 2050 nimmt der Anteil des MIV und ÖPNV an der Personenverkehrsleistung leicht ab, der Anteil des Luft- und Eisenbahnverkehrs nimmt leicht zu.<sup>26</sup>

Jahr	2010	2020	2030	2040	2050
<b>Personenverkehrsleistung insgesamt</b> (2010=100)	100	98.6	97.2	94.1	89.3
<b>Index (2010=100)</b>					
Motirisierter Individualverkehr	100	97	96	93	88
Eisenbahnverkehr	100	96	96	94	90
ÖPNV	100	95	90	87	84
Luftverkehr	100	127	128	125	119

**K2 Konstanter MIV, steigende Personenkilometer:** Die Personenverkehrsleistung steigt bis 2030 um ca. 8% gegenüber 2010, danach sinkt sie bis 2050 wieder bis auf einen Anstieg von 2,5% gegenüber 2010 ab. Der Anteil des MIV ist in dieser Variante 2050 etwas geringer als oben, insgesamt werden aber rund 10% mehr Personenkilometer per MIV bewältigt.<sup>27</sup>

<sup>22</sup> Mobilität in Deutschland 2008: Eigene Auswertung über MiT 2008; <http://html5-hosting.de/pls/html5/f?p=283:1>

<sup>23</sup> WWF 2009: Modell Deutschland. Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken

<sup>24</sup> Nitsch et al. 2010; verwendet die gleichen Verkehrsszenarien

<sup>25</sup> Knörr et al. (2012): Aktualisierung "Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030" (TREMOM) für die Emissionsberichterstattung 2013 (Berichtsperiode 1990-2011)

<sup>26</sup> Innovationsvariante aus WWF 2009: Modell Deutschland. Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken

<sup>27</sup> Daten aus:

- Schubert et al. 2014: Verkehrsverflechtungsprognose 2030
- Schlesinger et al. 2014: Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose
- European Commission 2013: EU Energy, Transport and GHG Emissions. Trends to 2050. [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/trends\\_to\\_2050\\_update\\_2013.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/trends_to_2050_update_2013.pdf)

<b>Jahr</b>	<b>2010</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>
<b>Personenverkehrsleistung insgesamt</b>					
(2010=100)	100	105.0	107.8	106.1	102.5
<b>Index (2010=100)</b>					
Motirisierter Individualverkehr	100	104	105	104	100
Eisenbahnverkehr	100	108	115	113	110
ÖPNV	100	103	104	101	97
Luftverkehr	100	120	144	144	140

## L Eigenerzeugung Strom u. Wärme

Bisher ist der Anteil der Eigenerzeugung beim Energieverbrauch von Privathaushalten immer noch sehr gering, obwohl er in den letzten Jahren prozentual stark gewachsen ist: 2012 Betrag der Anteil des Selbstverbrauches am Nettostromverbrauch privater Haushalte in Deutschland 0,5%; er war damit mehr als doppelt so groß wie 2011: 0,2% (2010: 0,0%).<sup>28</sup> Sollten die momentanen Wachstumsraten sich auch zukünftig zeigen, wird sich der Anteil der Eigenerzeugung sehr bald auch im Privatbereich zu einer relevanten Größe entwickeln. In der Industrie ist er das bereits.

- L1 Umfassende Privilegierung (wie vor 2014):** Eigenerzeugter und selbstverbraucher Strom ist umfassend von Umlagen und Steuern (Konzessionsabgabe, Offshore-Haftungsumlage, Stromsteuer, KWK-Umlage, § 19-Umlage, Netzentgelten und EEG-Umlage) befreit. Direkte Netzeinspeisung des PV-Stroms und Stromerzeugung aus KWK-Anlagen wird entsprechend aktueller Fördersätze vergütet.
- L2 Teilweise Privilegierung:** Eigenerzeugter und selbstverbraucher Strom wird entlang der Regelungen teilweise mit der EEG-Umlage belastet.
- L3 Keine Privilegierung:** Anlagen erhalten weder eine direkte Förderung im Rahmen des EEG und KWKG, noch eine indirekte Förderung durch Ausnahmetatbestände beim Selbstverbrauch. Eigenerzeugter und selbstverbraucher Strom wird mit allen Umlagen und Steuern belastet.

---

<sup>28</sup> Bardt et al. (2014): Eigenerzeugung und Selbstverbrauch von Strom. Stand, Potentiale und Trends.

## M Ausbau Photovoltaik

Der Ausbau der Photovoltaik (PV) ist in Baden-Württemberg sehr rasant erfolgt. Im Jahr 2005 wurden hier 272 GWh erzeugt. Nach dem Plan des Energiekonzepts von 2009 sollten diese bis 2020 auf 2,7 TWh gesteigert werden, was zum Zeitpunkt der Veröffentlichung annähernd einer Verdreifachung der Erzeugung bedeutet hätte und als ambitioniert galt. Durch die Diskussion um die Absenkung der EEG-Vergütung und durch stark gefallen Preise wurde der Ausbau stark beschleunigt und das Ziel für 2020 schon 2011 mit 3,3 TWh leicht übertroffen<sup>29 30</sup>(ZSW 2011: 21ff, Umweltministerium 2015: Erneuerbare Energien in BW: 5). In den folgenden Jahren hat sich der Ausbau wieder verlangsamt, dennoch stieg die Stromerzeugung aus PV bis 2014 auf 4,6 TWh an und erreicht damit aktuell einen Anteil an der Bruttostromerzeugung von 7,7 % der Bruttostromerzeugung<sup>22</sup>. Dabei wurde das Potenzial für PV in Baden-Württemberg bei weitem noch nicht ausgeschöpft: Die Dachflächen in BW haben Potenzial für die Erzeugung von rund 29 TWh (Potentialatlas 36 TWh<sup>31</sup>) pro Jahr, unter Einbeziehung von Freiflächen besteht das Potenzial von bis zu 50 TWh (Potentialatlas 37 TWh) pro Jahr aus PV in BW zu gewinnen<sup>32</sup>. Da es gegen die Nutzung von Freiflächen stärkere Vorbehalte gibt als gegen die Nutzung von Dachflächen<sup>33</sup>, ist davon auszugehen, dass eine weitreichende Nutzung dieser Flächen erst nach weit fortgeschrittener Nutzung des Dachflächenpotenzials erfolgt.

**M1 Geringer Ausbaupfad:** Bis 2050 wird nur die Hälfte des Potenzial an Dachflächen genutzt, weitere Freiflächen werden gar nicht genutzt. Die Stromerzeugung aus PV in BW liegt damit bei ca. 15 TWh.

**M2 Mittlerer Ausbaupfad:** Bis 2050 wird das gesamte Potenzial an Dachflächen erschlossen und rund 35 TWh aus PV-Anlagen bereitgestellt.

**M3 Starker Ausbaupfad:** Neben den Dachflächen wird auch das Freiflächenpotenzial über die derzeit EEG-Förderfähigen genutzt, die Stromerzeugung aus PV liegt damit 2050 bei bis zu 50 TWh.<sup>34</sup>

---

<sup>29</sup> Vogel-Sperl et al. (2011): Erneuerbare Energien und Energieeffizienz in Baden-Württemberg – Sachstand und Entwicklungsperspektiven, p. 21ff

<sup>30</sup> UMBW (2015): Erneuerbare Energien in Baden-Württemberg 2014, p. 5

<sup>31</sup> LUBW ( ): Potentialatlas Erneuerbare Energien, <http://rips-app.lubw.baden-wuerttemberg.de/maps/?lang=de&app=potenzialatlas>

<sup>32</sup> Vogel-Sperl et al. (2011): Erneuerbare Energien und Energieeffizienz in Baden-Württemberg – Sachstand und Entwicklungsperspektiven, p. 29

<sup>33</sup> NBBW (2012): Energiewende: Implikationen für Baden-Württemberg.

<sup>34</sup> „Im Potenzialatlas werden nur Bestand und Potenzial der nach dem Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) förderfähigen Freiflächen ausgewiesen.“ (LUBW) In Bezug auf die Langfristigkeit der Szenarien, ist eine Änderung der Gesetzeslage aber durchaus möglich und es wird deshalb auf die Annahmen von ZSW (2011) zurückgegriffen.



## N Ausbau Windkraft

Bisher liegt der Beitrag der Windkraft zur Stromerzeugung in BW bei rund 1% (680 GWh), bezogen auf die Erneuerbaren Energien bei ca. 5%. Um den – bisher vergleichsweise zögerlichen Ausbau zu beschleunigen, wurde das Landesplanungsgesetz 2012 reformiert und zukünftig die Festlegung von Ausschlussgebieten ausgeschlossen. Die Festlegung von Standorten kann jetzt nur noch über die Ausweisung von Vorranggebieten erfolgen, in denen andere raumbedeutende Nutzungen, die sich nicht mit der Windenergienutzung vereinbaren lassen, ausgeschlossen sind.<sup>35</sup> Zudem wurde durch die Erstellung des Windatlas die Planung neuer Anlagen erleichtert und im Energiekonzept 2020plus eine Zielvorgabe von einem Anteil der Windkraft zur Stromerzeugung von 10% ausgegeben. Bisher haben sich diese Änderungen aber noch nicht in einem beschleunigten Ausbau niedergeschlagen: der jährliche Zubau an installierter Leistung liegt seit 2008 zwischen 20-30 MW.

- N1 Schwacher Ausbau:** Das technische Potenzial der laut Potentialatlas überwiegend geeigneten Flächen – die sich vor allem im Nordosten Baden-Württembergs befinden – kann bis 2050 nur die Hälfte genutzt werden. Ein weiterer Ausbau auf der Schwäbischen Alb und im Schwarzwald findet nicht statt. Dadurch können ca. 10 TWh pro Jahr aus Windkraft erzeugt werden.
- N2 Mittlere Ausbau:** Entsprechend dem Klimaschutzkonzept 2020plus wird das technische Potenzial der überwiegend geeigneten Flächen bis 2050 ausgeschöpft. Dazu werden z. T. auch neue Standorte auf der Schwäbischen Alb und im Schwarzwald genutzt. Dadurch können rund 20 TWh pro Jahr aus Windkraft erzeugt werden.
- N3 Starker Ausbau:** Der Ausbau erstreckt sich auch auf bisher bezüglich der Nutzung nur bedingt geeignete Flächen mit hoher Windhöfigkeit (z. B. Landschaftsschutzgebietsflächen) im Schwarzwald und auf der Schwäbischen Alb. Dadurch können 2050 ca. 30 TWh pro Jahr aus Windkraft erzeugt werden.

---

<sup>35</sup> Windenergieerlass Baden-Württemberg 2012: Az.: 64-4583/404

## **O Biomasseimporte**

Dem Anbau von Biomasse zur Energiegewinnung stehen konkurrierende Flächennutzungsmöglichkeiten z. B. zur Produktion von Nahrungsmitteln gegenüber. Dieser Konflikt besteht nicht nur regional, sondern natürlich auch beim Import von Biomasse und Insbesondere beim Import von Biomasse aus Energiepflanzen. Mit Bezug zur Energie-Autarkie eines Gebietes ist es nicht nur fraglich, ob Importe von Energiepflanzen generell befürwortet werden, sondern auch, ob diese – wie etwa der Eintrag von Sonne und Wind – aus der Bilanz ausgenommen werden oder nicht.

**O1 Keine Importe:** Import von Energiepflanzen findet nicht statt, andere Biomasse könnte importiert werden.

**O2 Bilanzierte Importe:** Import von Biomasse findet statt und wird auch bilanziert.<sup>36</sup>

**O3 Bilanzneutrale Importe:** Import von Biomasse findet – wie der Eintrag von Wind und Sonne – bilanzneutral statt.<sup>30</sup>

---

<sup>36</sup> Der Import von Energiepflanzen zur Biogasgewinnung unterliegt dabei den Einschränkungen aus BauGB (1) 6.a-b. beim Betrieb von Biogasanlage muss der überwiegende Teil der Biomasse aus dem eigenen oder nahegelegenen (15km) Betrieben stammen.

## P Energetische Rohstoffpreise

Die Einfuhrpreise für die fossilen Energieträger Erdöl, Erdgas und Steinkohle beeinflussen in der Gesellschaft Wahrnehmungen, Zukunftserwartungen, Verhalten und Investitionsentscheidungen. Leitimpulse für die Entwicklungstrends aller fossilen Energieträger werden wohl auch in der Zukunft von der Entwicklung des Ölpreises (gemessen in \$/b, Dollar pro Barrel) ausgehen. Die Varianten orientieren sich dabei an den Szenarien der Energy Technology Perspectives 2015 der IEA<sup>37</sup>, wodurch sehr extreme Entwicklungen ausgeschlossen bleiben<sup>38,39</sup>.

- P1 Niedriger Preispfad:** Hier wird eine stabile Tendenz angenommen. Das mittelfristige Preismittel bleibt bis 2050 auf dem Niveau der letzten Jahre (bei Erdöl: rund 100 \$<sub>(2010)</sub>/b).
- P2 Mittlerer Preispfad:** Es wird ein allmählicher Anstieg des Preisniveaus bis zum Jahr 2050 angesetzt (bei Erdöl: rund 140 \$<sub>(2010)</sub>/b).
- P3 Hoher Preispfad:** Hier wird ein starker Anstieg des Preisniveaus bis zum Jahr 2050 angenommen (bei Erdöl: rund 170 \$<sub>(2010)</sub>/b).

In allen Fällen ist davon auszugehen, dass der jeweilige Trend von starken kurzfristigen Schwankungen überlagert ist.

---

<sup>37</sup> OECD/IEA 2015: Energy Technology Perspectives 2015.

<sup>38</sup> Die niedrige Preisvariante des EIA International Energy Outlook 2013 geht sogar von einem Rückgang auf 75 \$/b aus. Unter Vermeidung von Extremvarianten wird hier lediglich eine tendenzielle Stabilisierung des Ölpreises angenommen.

<sup>39</sup> Z. B. Vögele et al. 2012 „Entwicklung der Rahmenbedingungen für neue Energietechnologien, STE Report, Jülich. Wert 2050: WWF 2009 „Modell Deutschland“ S. 45 (vgl. EIA International Energy Outlook 2013). Preise in Euro (Preisbasis 2007): 1259 €/t Öl, 18,3 €/GJ Erdgas, 199 €/t SKE Steinkohle in 2050.

## Q EU-Integration

Der europäische Kontext wird durch die drei Global Europe 2050 Szenarien definiert.<sup>40</sup>

- Q1 EU Renaissance:** Die europäische Integration geht weiter voran und die EU kann dadurch auch auf globaler Ebene die Durchsetzung von Rechtsstaatlichkeit und Menschenrechten forcieren. Sie dehnt sich weiter nach Osten und Süden aus und schafft eine politische, militärische und fiskalpolitische Integration. Auf EU-Ebene kommt es zu Klimaabkommen und zur smarten Integration der nationalen Versorgungsnetze sowie zum koordinierten Ausbau der Erneuerbaren. Die hohe Innovationskraft führt zu steigender Produktivität, so dass die EU wirtschaftlich und politisch leicht mit anderen Regionen mithalten kann.
- Q2 Nobody Cares:** Stillstand der europäischen Integration. Durch das Fehlen einer leitenden Vision bleiben Politikreformen auf EU-Ebene aus, wodurch auch gemeinsame Klima und Energieziele nicht zustande kommen. Die Herausforderung des demographischen Wandels wird nicht angenommen und die europäische Gesellschaft altert weiter. Die EU fällt dadurch im Wirtschaftswachstum weit hinter die USA und China; eine vollständige Integration des europäischen Marktes wird nicht erreicht.
- Q3 EU under threat:** Fragmentierte Integration der Nationalstaaten. Die EU sieht sich einer wirtschaftlichen Rezession ausgesetzt, die protektionistische Reaktionen hervorruft. Der Infrastrukturausbau wird dadurch stark verlangsamt. Nationale Regierungen radikalieren sich und es kommt zum Austritt wichtiger Staaten aus der EU. Klima- und Energiepolitik wird auf europäischer Ebene nicht betrieben, wodurch sich Nahrungsmittel- und Ölpreisschocks manifestieren und die europäische Netzinfrastruktur fehlerbehaftet und störanfällig werden. Die Produktivität im EU-Gebiet wird dadurch noch stärker als in „Nobody cares“ gehemmt und Europa fällt wirtschaftlich noch weiter hinter den anderen Weltregionen zurück.

---

<sup>40</sup> Europäische Kommission 2011: Global Europe 2050

## **R Wirtschaftswachstum Baden-Württemberg**

Als Maß für die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit einer Volkswirtschaft gibt das Bruttoinlandsprodukt den Gesamtwert aller Güter und Dienstleistungen an, die innerhalb eines Jahres hergestellt wurden und dem Endverbrauch dienen.

- R1 Schwache Entwicklung:** Für die schwache Entwicklung wird ein jährliches Wachstum von 0,7 % /a angenommen auf Grund von ungünstigen Einflüssen oder durch gewollten Wandel zum qualitativen Wachstum.
- R2 Moderate Entwicklung:** Für die mittlere Entwicklung wird ein durchschnittliches jährliches Wachstum von ca. 1,3 %/a angenommen.
- R3 Starke Entwicklung:** Die starke Entwicklung, eine sehr optimistische Variante, liegt bei durchschnittlich ca. 1,8 %/a.<sup>41</sup>

---

<sup>41</sup> Langfristszenarien mit Bezug auf das Wirtschaftswachstum in Baden-Württemberg gibt es kaum. Auf Ebene des Bundeslandes konnten nur zwei relevante Studien gefunden werden, eine davon (HWWI) rechnet mit 2030 nur bis zu einem Zeitpunkt, zu dem der Demographische Wandel in Baden-Württemberg noch nicht mit voller Kraft durchschlägt und prognostiziert in drei Varianten 1,0 %/a, 1,5%/a und 2,0%/a. Die zweite Studie (Roland Berger) vermutet in einem Basisszenario ca. 0,65 %/a, sieht aber ein Zielszenario mit ca. 1,25% als erreichbar an.

## S Bevölkerungsentwicklung

Die Bevölkerungsentwicklung wird durch den Bestand, die Geburtenrate, die Lebenserwartung sowie durch Migration bestimmt. Bei der Voraussrechnung ist dabei die Migration der am schwierigsten abzuschätzende Faktor, da die anderen Größen sich ohne gravierende gesellschaftliche Umbrüche nur relativ kontinuierlich und träge innerhalb enger Grenzen verändern. Heute leben rund 10,5 Mio. Personen in Baden-Württemberg. Für die zukünftige Entwicklung in Baden-Württemberg greifen wir auf die letzte Voraussrechnung des Statistischen Landesamtes zurück, die auf Basis des Zensus 2008 erstellt wurden.<sup>42</sup> Für beide Varianten wird davon ausgegangen, dass sich die durchschnittliche Haushaltsgröße bis 2050 von heute 2,17 Personen auf 2,0 Personen reduziert.<sup>43</sup>

- S1 Stärkerer Bevölkerungsrückgang:** Diese Variante geht von einem positiven, jährlichen Wanderungssaldo von 10.000 Personen aus. Für das Jahr 2050 würde das bedeuten, dass die Bevölkerung in Baden-Württemberg auf ca. 9,5 Mio. Personen schrumpft. Das Durchschnittsalter würde sich auf 49 Jahre erhöhen; 16,0 % der Bevölkerung wäre dann jünger als 20 Jahre, 46,8 % zwischen 20 und 60 Jahre alt und 37,2 % über 60 Jahre alt.
- S2 Schwacher Bevölkerungsrückgang:** Diese Variante geht von einem positiven, jährlichen Wanderungssaldo von 20.000 Personen aus. Für das Jahr 2050 würde das bedeuten, dass die Bevölkerung in Baden-Württemberg auf ca. 10 Mio. Personen schrumpft. Das Durchschnittsalter läge dann bei 48,6 Jahren; 16,2 % der Bevölkerung wäre dann jünger als 20 Jahre, 47,5 % zwischen 20 und 60 Jahren alt und 36,3 % über 60 Jahre alt.

---

<sup>42</sup> Brachat-Schwarz (2010): Neue Bevölkerungsvoraussrechnung für Baden-Württemberg bis 2060; Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg 2/2010

<sup>43</sup> Brachat-Schwarz (2010): Struktur und Entwicklung der Privathaushalte; Eine Modellrechnung für Baden-Württemberg bis zum Jahr 2050; Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg 8/2010

## Deskriptorenassays Autarkie Metzingen

### A Akzeptanz der Energiewende in der Bevölkerung

Die Energiewende erfährt aktuell überwiegend Zustimmung<sup>44 45</sup>, wenngleich durchaus starke NIMBY-Tendenzen (NIMBY = „Not In My Backyard“) zu beobachten sind. Bei den Narrativen zur Energiewende („Auffassungen“, die mit der Energiewende verbunden werden, wie z. B. „Wir selbst haben das der Erde angetan, wir müssen das auch wieder ‚gerade biegen‘“ oder „Die Energiewende wirft uns im internationalen Wettbewerb zurück“) ist im Moment noch kein vorherrschender Trend erkennbar.

- A1. Trend zu sinkender Akzeptanz:** Abstrakt wird zwar die Energiewende weiterhin befürwortet, aber die Implikationen vor Ort oder in der Region werden überwiegend abgelehnt<sup>46</sup>. Negative Narrative zur Energiewende, als negativ wahrgenommene Erfahrungen und Befürchtungen im Zusammenhang mit der Energiewende lenken die Einstellung der Bevölkerung zur Energiewende in eine allgemein skeptische Richtung. Auf infrastrukturelle Maßnahmen reagieren die Menschen mit starken NIMBY-Tendenzen.
- A2. Kein Trend erkennbar:** Die Einstellung der Bevölkerung zur Energiewende ist positiv, aber es gibt kein klares Bekenntnis, die damit verbundenen Implikationen mitzutragen. Positive wie negative Narrative zur Energiewende konkurrieren miteinander, keine Richtung setzt sich als Allgemeinbild durch. Vor allem dort, wo die Notwendigkeit einer Investition für die Energiewende unter den gesellschaftlichen Gruppen stark umstritten ist (etwa in der Frage, welche Stromtrassen benötigt werden) treten vermehrt NIMBY-Tendenzen auf, was die Umsetzung der für die Energiewende geplanten infrastrukturellen Maßnahmen erschwert.
- A3. Trend zu steigender Akzeptanz:** Die Einstellung der Bevölkerung zur Energiewende ist zunehmend positiv. Die Menschen sind gewillt, die „Kosten“ der Energiewende mitzutragen, um den Klimawandel zu stoppen bzw. dessen Auswirkungen abzumildern und wollen weltweit mit gutem Beispiel vorangehen. Narrative, welche die Energiewende befürworten haben mehr Gewicht als die negativen. Starkes NIMBY-Verhalten bleibt aus, da es in Bezug auf die Energiewende als sozial nicht akzeptabel angesehen wird.

---

<sup>44</sup> BDEW-Umfrage: <http://www.bdew.de/internet.nsf/id/20140211-pi-bdew-umfrage-grosse-mehrheit-unterstuetzt-die-energiewende--umsetzung-wird-kritisch-be> [Stand: 2014-03-19]

<sup>45</sup> Allensbach-Umfrage: <http://www.wiwo.de/politik/deutschland/allensbach-umfrage-hohe-zustimmung-fuer-energiewende/10037578.html> [Stand: 2014-06-17]

<sup>46</sup> Kaiser, G., Byrka, K. and Hartig, T. 2010: Reviving Campbell's Paradigm for Attitude Research. Personality and Social Psychology Review 2010 14: 351

## **B Ausbau des Verteilnetzes**

Der Ausbau Erneuerbarer Energien (EE) ist eng verknüpft mit einem Aus- bzw. Umbau der Stromnetze. Abhängig von dem Grad der Dezentralität des EE-Ausbaus müssen neben den Übertragungsnetzen auch die Verteilnetze mehr oder weniger stark ausgebaut werden.

Für den Ausbau der Verteilnetze kommen mehrere technische Strategien in Frage, um deren Leistungsfähigkeit zu erhöhen. Die Anwendung der in einer Variante beschriebenen technischen Strategie bedeutet, dass zunächst alle Leistungszugewinne, die ohne die beschriebene Maßnahme erreicht werden können ausgeschöpft sind. Hierbei bauen die Varianten entsprechend der Reihenfolge aufeinander auf. Der technologische Aufwand sowie der Vernetzungsgrad nehmen dabei zu.

**A4 Stand der Technik:** Ein Einwirken auf die Netzspannung über regelbare Transformatoren und aktives Blindleistungsmanagement erlauben eine Reduktion notwendiger Netzausbaumaßnahmen. Wo nötig wird die Leistungsfähigkeit durch das Verlegen von neuen Kabeln bzw. Leitungen erhöht.

**A5 Smart Grid Ansatz:** Es wird eine Kombination verfügbarer innovativer Technologien genutzt um aktiv auf das Verteilnetz einzuwirken. Schaltbare Lasten und die Integration von Speichern erhöhen die Flexibilität. Voraussetzung sind hierfür ein hoher Vernetzungsgrad sowie Kenntnis des aktuellen Netzzustandes.



## C Ausbau Photovoltaik

Der Ausbau der Photovoltaik (PV) ist in Metzingen rasant erfolgt. Im Jahr 2011 wurden in Metzingen 6418 MWh/a Strom erzeugt (Quelle: LUBW EE-Atlas). Als Potenzial steht die Installation weiterer PV-Anlagen auf Dachflächen und auf Freiflächen zur Verfügung.

Lt. Berechnungen des IER kann auf Dachflächen mit einem Ertrag von bis zu 100,185 GWh/a gerechnet werden (mit monokristallinen Modulen). Auf Freiflächen liegt der potenzielle Ertrag bei 2,299 GWh/a. Zudem könnten in Metzingen Lärmschutzwände genutzt werden, bspw. an der 320 m langen Lärmschutzwand nördlich der Bundesstraße 313 (Quelle: Seckinger BA). Die installierbare Leistung liegt dort bei 842,7 kW und der potenzielle Ertrag liegt somit bei 0,870 GWh/a (Annahme: Wirkungsgrad 15%). Ein weiterer potenzieller Standort stellt die 700 m lange Lärmschutzwand im Süden der Stadt bei der Bundesstraße 28 dar (Quelle: IER). Dort liegt die installierbare Leistung bei 1647 kW und der potenzielle Ertrag bei 1,715 GWh/a. Da es gegen die Nutzung von Freiflächen stärkere Vorbehalte gibt als gegen die Nutzung von Dachflächen<sup>47</sup>, ist davon auszugehen, dass eine weitreichende Nutzung dieser Flächen erst nach weit fortgeschrittener Nutzung des Dachflächenpotenzials erfolgt.

Daher kann von folgenden möglichen Entwicklungen ausgegangen werden:

- C1. Geringer Ausbau:** Bis 2050 wird nur die Hälfte des Potenzials an Dachflächen genutzt, weitere Freiflächen werden nicht genutzt. Die Stromerzeugung aus PV in Metzingen liegt damit bei ca. 50 GWh/a.
- C2. Mittlerer Ausbau:** Bis 2050 wird das gesamte Potenzial an Dachflächen und auch das Freiflächenpotenzial erschlossen und damit rund 100 GWh/a aus PV-Anlagen in Metzingen bereitgestellt.
- C3. Hoher Ausbau:** Neben allen Dachflächen wird auch das Freiflächenpotenzial genutzt, allerdings mit Modulen aus Galliumarsenitzellen (GaAs). Die Stromerzeugung aus PV liegt 2050 dann bei bis zu 257 GWh/a.

---

<sup>47</sup> NBBW (2012): Energiewende: Implikationen für Baden-Württemberg.

## D Ausbau Windkraft

Bisher sind in Metzingen keine Windkraftanlagen in Betrieb. Um den – bisher vergleichsweise zögerlichen Ausbau zu beschleunigen, wurde das Landesplanungsgesetz 2012 reformiert und zukünftig die Festlegung von Ausschlussgebieten ausgeschlossen. Die Festlegung von Standorten kann jetzt nur noch über die Ausweisung von Vorranggebieten erfolgen, in denen andere raumbedeutende Nutzungen, die sich nicht mit der Windenergienutzung vereinbaren lassen, ausgeschlossen sind.<sup>48</sup>

Die Studie vom Ingenieurbüro Fritz weist einen weiteren Standort Wippberg aus mit einem potenziellen Jahresertrag von 6.600 MWh und 6,6 MW installierbarer Leistung (2 Anlagen bei 1000 Volllaststunden).

Nach dem EE-Atlas der LUBW gibt es in Metzingen im Süden der Stadt mehrere Flächen von insgesamt 18,92 Hektar, die „bzgl. Nutzung bedingt geeignet“ sind. Der potenzielle Jahresertrag liegt dort bei 15.300 MWh bei 6 MW installierbarer Leistung.

Als „bzgl. Wind und Nutzung bedingt geeignete Flächen“ werden 31,09 ha (im Nordosten und Südosten der Stadt) ausgewiesen. Hier wird der potenzielle Jahresertrag mit 42.600 MWh angegeben bei einer installierbaren Leistung von 21 MW (4 Anlagen, durchschnittlich 2181 Volllaststunden).

Damit ergeben sich folgende mögliche zukünftige Entwicklungen für Metzingen:

- D1 Geringer Ausbau:** Das technische Potenzial wird nur auf dem laut Ingenieurbüro Fritz ausgewiesenen Standort „Wippberg“ ausgenutzt. Dadurch können 6,6 GWh/a aus Windkraft erzeugt werden.
- D2 Mittlerer Ausbau:** Zusätzlich zum Standort Wippberg werden die laut LUBW-Potentialatlas „bzgl. Nutzung bedingt geeigneten Flächen“ ausgenutzt. Damit können ca. 21,9 GWh/a (=6,6+15,3 GWh) aus Windkraft erzeugt werden.
- D3 Hoher Ausbau:** Der Ausbau erstreckt sich auf die in D1 und D2 genannten Flächen und zusätzlich wird das Potenzial auf die „bzgl. Wind und Nutzung bedingt geeigneten Flächen“ ausgeweitet. Dadurch können 2050 ca. 64,5 GWh/a (=6,6+15,3+42,6 GWh) aus Windkraft erzeugt werden.

---

<sup>48</sup> Windenergieerlass Baden-Württemberg 2012: Az.: 64-4583/404

## **E Autarkiegrad Mobilität**

Bei der Beurteilung der Energie-Autarkie, lassen sich zwei grundlegende Konzepte unterscheiden: Bilanzielle Autarkie beschreibt einen Zustand, in dem innerhalb des Bilanzkreises über einen längeren Zeitraum (meist ein Jahr) mindestens soviel Endenergie für Mobilität generiert, wie verbraucht wird; solange sie in der Summe nicht höher als die Exporte sind, sind Importe dabei zulässig. Bei lastgerechter Autarkie hingegen, sind (außer dem Eintrag von Wind-, Wasser- und Sonnenkraft) keine Importe zulässig und der Verbrauch innerhalb des Bilanzkreises wird zu jedem Zeitpunkt auch aus einer innerhalb gelegenen Produktion gedeckt.

Für die zukünftige Entwicklung des Autarkiegrades der Energie für Mobilität wollen wir folgende Entwicklungsmöglichkeiten betrachten:

**E6 bilanzielle Mobilitätsautarkie:** Bis 2050 wird in Metzingen über das Jahr gemessen mindestens so viel Energie generiert, wie hier für Mobilität verbraucht werden.

**E7 lastgerechte Mobilitätsautarkie:** Bis 2050 wird in Metzingen zu jedem Zeitpunkt mindestens so viel Energie generiert, wie hier für Mobilität verbraucht wird.

## **F Autarkiegrad Strom**

Bei der Beurteilung der Energie-Autarkie, lassen sich zwei grundlegende Konzepte unterscheiden: Bilanzielle Autarkie beschreibt einen Zustand, in dem innerhalb des Bilanzkreises über einen längeren Zeitraum (meist ein Jahr) mindestens soviel Strom generiert wie verbraucht wird; solange sie in der Summe nicht höher als die Exporte sind, sind Importe dabei zulässig. Bei lastgerechter Autarkie hingegen, sind (außer dem Eintrag von Wind-, Wasser- und Sonnenkraft) keine Importe zulässig und der Verbrauch innerhalb des Bilanzkreises wird zu jedem Zeitpunkt auch aus einer innerhalb gelegenen Produktion gedeckt.

Für die zukünftige Entwicklung des Autarkiegrades in Bezug auf Strom in Metzingen wollen wir folgende Varianten untersuchen:

**F1 bilanzielle Stromautarkie:** Bis 2050 wird in Metzingen über das Jahr gemessen mindestens so viel elektrische Leistung generiert, wie hier verbraucht wird.

**F2 lastgerechte Stromautarkie:** Bis 2050 wird in Metzingen zu jedem Zeitpunkt mindestens soviel elektrische Leistung bereitgestellt, wie verbraucht wird.

## **G Autarkiegrad Wärme**

Bei der Beurteilung der Energie-Autarkie, lassen sich zwei grundlegende Konzepte unterscheiden: Bilanzielle Autarkie beschreibt einen Zustand, in dem innerhalb des Bilanzkreises über einen längeren Zeitraum (meist ein Jahr) mindestens soviel Wärme generiert wie verbraucht wird; solange sie in der Summe nicht höher als die Exporte sind, sind Importe dabei zulässig. Bei lastgerechter Autarkie hingegen, sind (außer dem Eintrag von Wind-, Wasser- und Sonnenkraft) keine Importe zulässig und der Verbrauch innerhalb des Bilanzkreises wird zu jedem Zeitpunkt auch aus einer innerhalb gelegenen Produktion gedeckt.

Bei der für Raumwärme benötigten Energie ist der Anteil der Erneuerbaren in Baden-Württemberg im Moment geringer als im Strommix. Da gleichzeitig ca. 2/3 der von Haushalten verbrauchten Energie für Raumwärme eingesetzt werden, ist eine Autarkie in diesem Bereich schwerer zu realisieren als im Strombereich.

Für die zukünftige Entwicklung des Autarkiegrades der Energie für Wärme wollen wir folgende Entwicklungsmöglichkeiten betrachten:

**G1 bilanzielle Wärmeautarkie:** Bis 2050 wird in Metzingen über das Jahr gemessen mindestens so viel Energie generiert, wie hier für Raumwärme verbraucht wird.

**G2 lastgerechte Wärmeautarkie:** Bis 2050 wird in Metzingen zu jedem Zeitpunkt mindestens soviel Energie generiert, wie für Raumwärme verbraucht wird.

## **H Biomasseimporte**

Dem Anbau von Biomasse zur Energiegewinnung stehen konkurrierende Flächennutzungsmöglichkeiten z. B. zur Produktion von Nahrungsmitteln gegenüber. Dieser Konflikt besteht nicht nur regional, sondern natürlich auch beim Import von Biomasse und insbesondere beim Import von Biomasse aus Energiepflanzen. Mit Bezug zur Energie-Autarkie eines Gebietes ist es nicht nur fraglich, ob Importe von Energiepflanzen generell befürwortet werden, sondern auch, ob diese – wie etwa der Eintrag von Sonne und Wind – aus der Bilanz ausgenommen werden oder nicht.

**H1 Keine Importe:** Import von Energiepflanzen findet nicht statt, andere Biomasse könnte importiert werden.

**H2 Bilanzierte Importe:** Import von Biomasse findet statt und wird auch bilanziert.<sup>49</sup>

**H3 Bilanzneutrale Importe:** Import von Biomasse findet – wie der Eintrag von Wind und Sonne – bilanzneutral statt.

---

<sup>49</sup> Der Import von Energiepflanzen zur Biogasgewinnung unterliegt dabei den Einschränkungen aus BauGB (1) 6.a-b. beim Betrieb von Biogasanlage muss der überwiegende Teil der Biomasse aus dem eigenen oder nahegelegenen (15km) Betrieben stammen.

## I CO<sub>2</sub>-Abgaben

Bisher sind in Deutschland Abgaben auf den CO<sub>2</sub>-Ausstoß nur über den europäischen Zertifikatehandel (EU ETS) in Kraft. Momentan belaufen sich die Kosten pro Tonne CO<sub>2</sub> auf ca. 5 €/t und bleiben damit unter dem angestrebten Preis.<sup>50</sup> In Europa gibt jedoch mehrere Länder (z. B. Schweiz, Frankreich, Schweden), die neben dem Zertifikatehandel eigene CO<sub>2</sub>-Steuern oder –Abgaben erheben, die meist deutlich über den Kosten der europäischen Zertifikate liegen, deren Preise allerdings auch weit hinter den ursprünglichen Erwartungen bleiben.

Auch in Deutschland wird hin und wieder über die Einführung einer CO<sub>2</sub>-Abgabe diskutiert. Für die ihre Wirkung innerhalb der Szenarien ist an dieser Stelle nicht wichtig, wo eine solche Abgabe beschlossen wird, sondern in welcher Höhe sie CO<sub>2</sub>-Ausstoß in Deutschland verteuert. Szenarien, in denen die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Abgabe bis 2050 berücksichtigt wird, variieren zwischen 47 €/t<sup>51</sup> und 130 €/t<sup>52</sup>. Da die CO<sub>2</sub>-Preise bisher eher unter den Erwartungen und Planungen geblieben sind, wird dieses Spektrum nach unten etwas erweitert. Dafür werden folgende Möglichkeiten berücksichtigt in denen sich der aktuelle Preis für CO<sub>2</sub>-Ausstoß bis 2050 kontinuierlich auf den in der Variante angegebenen Betrag steigert.

- I4 Niedrige Abgaben:** In Deutschland sind bis 2050 auf ausgestoßenes CO<sub>2</sub> geringe Abgaben zu entrichten (ca. 20 €<sub>(2010)</sub>/t).
- I5 Mittlere Abgaben:** In Deutschland sind bis 2050 auf ausgestoßenes CO<sub>2</sub> mittelhohe Abgaben zu entrichten (ca. 40 €<sub>(2010)</sub>/t).
- I6 Hohe Abgaben:** In Deutschland sind bis 2050 auf ausgestoßenes CO<sub>2</sub> hohe Abgaben zu entrichten (ca. 120 €<sub>(2010)</sub>/t).

---

<sup>50</sup> Schäuble et al. (2014): CO<sub>2</sub>-Emissionsgrenzwerte für Kraftwerke – Ausgestaltungsansätze und Bewertung einer möglichen Einführung auf nationaler Ebene. IASS Working Paper. [http://www.iass-potsdam.de/sites/default/files/files/working\\_paper\\_emissionsgrenzwerte\\_0.pdf](http://www.iass-potsdam.de/sites/default/files/files/working_paper_emissionsgrenzwerte_0.pdf)

<sup>51</sup> Nitsch et al. 2010

<sup>52</sup> Öko-Institut/Fraunhofer ISE (2014): Klimaschutzszenario 2050. <http://www.oeko.de/oekodoc/2065/2014-638-de.pdf>

## **J Eigenerzeugung Strom und Wärme**

Bisher ist der Anteil der Eigenerzeugung beim Energieverbrauch von Privathaushalten immer noch sehr gering, obwohl er in den letzten Jahren prozentual stark gewachsen ist: 2012 Betrag der Anteil des Selbstverbrauches am Nettostromverbrauch privater Haushalte in Deutschland 0,5%; er war damit mehr als doppelt so groß wie 2011: 0,2% (2010: 0,0%).<sup>53</sup> Sollten die momentanen Wachstumsraten sich auch zukünftig zeigen, wird sich der Anteil der Eigenerzeugung sehr bald auch im Privatbereich zu einer relevanten Größe entwickeln. In der Industrie ist er das bereits.

**J1 Keine Privilegierung:** Anlagen erhalten weder eine direkte Förderung im Rahmen des EEG und KWKG, noch eine indirekte Förderung durch Ausnahmetatbestände beim Selbstverbrauch. Eigenerzeugter und selbstverbraucher Strom wird mit allen Umlagen und Steuern belastet.

**J2 Privilegierung (wie vor 2014):** Eigenerzeugter und selbstverbraucher Strom ist umfassend von Umlagen und Steuern (Konzessionsabgabe, Offshore-Haftungsumlage, Stromsteuer, KWK-Umlage, § 19-Umlage, Netzentgelten und EEG-Umlage) befreit. Direkte Netzeinspeisung des PV-Stroms und Stromerzeugung aus KWK-Anlagen wird entsprechend aktueller Fördersätze vergütet.

---

<sup>53</sup> Bardt et al. (2014): Eigenerzeugung und Selbstverbrauch von Strom. Stand, Potentiale und Trends.



## K Energetische Rohstoffpreise

Die Einfuhrpreise für die fossilen Energieträger Erdöl, Erdgas und Steinkohle beeinflussen in der Gesellschaft Wahrnehmungen, Zukunftserwartungen, Verhalten und Investitionsentscheidungen. Leitimpulse für die Entwicklungstrends aller fossilen Energieträger werden wohl auch in der Zukunft von der Entwicklung des Ölpreises (gemessen in \$/b, Dollar pro Barrel) ausgehen. Die Varianten orientieren sich dabei an den Szenarien der Energy Technology Perspectives 2015 der IEA<sup>54</sup>, wodurch sehr extreme Entwicklungen ausgeschlossen bleiben<sup>556</sup>.

**K1. Niedriger Preispfad:** Hier wird eine stabile Tendenz angenommen. Das mittelfristige Preismittel bleibt bis 2050 auf dem Niveau der letzten Jahre (bei Erdöl: rund 100 \$<sub>(2010)</sub>/b).

**K2. Mittlerer Preispfad:** Es wird eine allmählicher Anstieg des Preisniveaus bis zum Jahr 2050 angesetzt (bei Erdöl: rund 140 \$<sub>(2010)</sub>/b).

**K3. Hoher Preispfad:** Hier wird ein starker Anstieg des Preisniveaus bis zum Jahr 2050 angenommen (bei Erdöl: rund 170 \$<sub>(2010)</sub>/b).

In allen Fällen ist davon auszugehen, dass der jeweilige Trend von starken kurzfristigen Schwankungen überlagert ist.

---

<sup>54</sup> OECD/IEA 2015: Energy Technology Perspectives 2015.

<sup>55</sup> Die niedrige Preisvariante des EIA International Energy Outlook 2013 geht sogar von einem Rückgang auf 75 \$/b aus. Unter Vermeidung von Extremvarianten wird hier lediglich eine tendenzielle Stabilisierung des Ölpreises angenommen.

<sup>56</sup> Z. B. Vögele et al. 2012 „Entwicklung der Rahmenbedingungen für neue Energietechnologien, STE Report, Jülich. Wert 2050: WWF 2009 „Modell Deutschland“ S. 45 (vgl. EIA International Energy Outlook 2013). Preise in Euro (Preisbasis 2007): 1259 €/t Öl, 18,3 €/GJ Erdgas, 199 €/t SKE Steinkohle in 2050.

## L Sanierungsrate und -tiefe

In Bezug auf die Klimaschutzziele sind die derzeitige Sanierungsrate und -tiefe ungenügend, um die geplante Verbrauchsreduktion der Privathaushalte zu erreichen. Die Energieeffizienz der Wohngebäude hat einen sehr starken Einfluss auf den privaten Energieverbrauch, da ca. 3/4 des direkten Endenergieverbrauches durch Heizen verursacht wird. Da viele Maßnahmen daher auf die Steigerung der Sanierungsrate und der Energieeffizienz zielen, stellt die Fortschreibung des gegenwärtigen Trends die untere Variante dieses Deskriptors dar, wie es auch in den gesichteten Szenarien der Fall ist.<sup>57 58 59 60</sup>

Eine Sanierungstiefe von 100% bedeutet hier, dass alle sanierten Gebäude eine Vollsanierung<sup>61</sup> unterlaufen.

- L1 Schwache Effizienzentwicklung:** Eine geringe Effizienzentwicklung bedeutet eine Fortschreibung der momentanen Praxis mit einer Sanierungsrate von ca. 1% und einer Sanierungstiefe von 30%.
- L2 Moderate Effizienzentwicklung:** Eine moderate Effizienzentwicklung in diesem Bereich würde einen leichten Anstieg der in den letzten Jahren zu beobachtenden Sanierungspraxis bedeuten. Jährlich werden dann ca. 1,5% der Wohngebäude saniert. Die Sanierungstiefe beträgt dabei 50%.
- L3 Starke Effizienzentwicklung:** Eine starke Effizienzentwicklung bedeutet eine Sanierungsrate von ca. 2%, die Sanierungstiefe liegt bei 70%.

---

<sup>57</sup> WWF 2009: Modell Deutschland. Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken

<sup>58</sup> Nitsch et al. 2012: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global

<sup>59</sup> Exxon 2012: Energieprognose 2012 – 2040. Deutschland

<sup>60</sup> Shell 2011: Shell Hauswärme-Studie.

<sup>61</sup> Austausch aller Fenster und des Heizungssystems, sowie Isolierung der kompletten Gebäudehülle (auch des Daches).

## **M Wirtschaftswachstum Metzingen**

Als Maß für die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit einer Volkswirtschaft gibt das Bruttoinlandsprodukt den Gesamtwert aller Güter und Dienstleistungen an, die innerhalb eines Jahres hergestellt wurden und dem Endverbrauch dienen.

**M1 Schwache Entwicklung:** Für die schwache Entwicklung wird ein jährliches Wachstum von 0,7 % /a angenommen auf Grund von ungünstigen Einflüssen oder durch gewollten Wandel zum qualitativen Wachstum.

**M2 Moderate Entwicklung:** Für die mittlere Entwicklung wird ein durchschnittliches jährliches Wachstum von ca. 1,3 %/a angenommen.

**M3 Starke Entwicklung:** Die starke Entwicklung, eine sehr optimistische Variante, liegt bei durchschnittlich ca. 1,8 %/a.<sup>62</sup>

---

<sup>62</sup> Langfristszenarien mit Bezug auf das Wirtschaftswachstum in Metzingen und Baden-Württemberg gibt es kaum. Auf Ebene des Bundeslandes konnten nur zwei relevante Studien gefunden werden, eine davon (HWWI) rechnet mit 2030 nur bis zu einem Zeitpunkt, zu dem der Demographische Wandel in Baden-Württemberg noch nicht mit voller Kraft durchschlägt und prognostiziert in drei Varianten 1,0 %/a, 1,5%/a und 2,0%/a. Die zweite Studie (Roland Berger) vermutet in einem Basisszenario ca. 0,65 %/a, sieht aber ein Zielszenario mit ca. 1,25% als erreichbar an.