

Hans-Martin Neumann

Szenarien zu energieautonomer Mobilität am Beispiel der Bodenseeregion



Band 21

Harburger Berichte zur Verkehrsplanung und Logistik

Schriftenreihe des Instituts für
Verkehrsplanung und Logistik

Herausgegeben von
Heike Flämig und Carsten Gertz
Technische Universität Hamburg

**Szenarien zu energieautonomer Mobilität
am Beispiel der Bodenseeregion**

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von
Hans-Martin Neumann

aus
München

2021

Erstgutachter:

Prof. Dr.-Ing. Carsten Gertz
Institut für Verkehrsplanung und Logistik
Technische Universität Hamburg

Zweitgutachter:

Prof. Dr.-Ing. Dieter Genske
Fachbereich Ingenieurwissenschaften
Hochschule Nordhausen

Tag der mündlichen Prüfung: 18.12.2020

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische
Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

© 2021 Institut für Verkehrsplanung und Logistik
Alle Rechte vorbehalten
Satz: Institut für Verkehrsplanung und Logistik

DOI: 10.15480/882.3598
ORCID-ID des Autors: 0000-0003-2789-4916

Hans-Martin Neumann
**Szenarien zu energieautonomer Mobilität
am Beispiel der Bodenseeregion**

Band 21

Harburger Berichte zur Verkehrsplanung und Logistik

Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Logistik

Technische Universität Hamburg

herausgegeben von

Heike Flämig und Carsten Gertz

Vorwort

Das Thema Energieautonomie wird bereits seit längerer Zeit diskutiert. Der Sektor Mobilität ist dabei in der Regel jedoch außen vor, bislang stehen der Verbrauch von Haushalten und Gewerbe im Mittelpunkt. Dies ist umso bemerkenswerter, da der Verkehrsbereich für einen besonders hohen Teil der Verbräuche verantwortlich ist. Hieraus ergibt sich auch eine besondere Klimarelevanz. Mit einem Anteil von rund 25 % an den klimaschädlichen Emissionen ist offensichtlich, dass im Verkehrssektor besondere Anstrengungen zur Reduzierung des Energieverbrauchs und damit auch der CO₂-Emissionen erforderlich sind. Das Konzept der Energieautonomie postuliert eine dezentrale regionale Erzeugung auf Basis regenerativer Energien. Als Vorteil gilt bei einer Dezentralisierung des Energiesystems die Stärkung der Rolle der Kommunen. Dies ist vor allem vor dem Hintergrund des hohen Flächenbedarfs für erneuerbare Energiequellen relevant.

Hans-Martin Neumann beschäftigt sich in seiner Arbeit mit der Frage, ob eine Energieautonomie auch für den Verkehrssektor realistisch umsetzbar ist. Zielsetzung ist dabei eine regionale Erzeugung desjenigen Energieaufwandes, der für die regionale Fortbewegung erforderlich ist. Dafür werden unterschiedliche Szenarien mit dem Zeithorizont 2050 entwickelt. Die regionale Schwerpunktsetzung der Untersuchung ist die Bodenseeregion und umfasst damit länderübergreifend Deutschland, Österreich, Liechtenstein und die Schweiz. Abgeleitet werden Handlungsempfehlungen für eine mögliche Umsetzung sowie erforderliche veränderte Rahmensetzungen.

Dabei werden drei Forschungsfragen abgeleitet. Zunächst geht es um das erforderliche Maßnahmenspektrum, um das Verkehrssystem einer Region bis zum Jahr 2050 vollständig zu dekarbonisieren. Die zweite Forschungsfrage adressiert die erforderlichen Voraussetzungen, um den

Energiebedarf des Verkehrs bis zum Jahr 2050 vollständig mit erneuerbaren Energieträgern aus regionaler Erzeugung zu decken. Abschließend geht es um die Umsetzung des Konzeptes auf regionaler Ebene.

Als Methode steht die Szenariotechnik im Mittelpunkt. Dabei findet eine Erweiterung des räumlich-zeitlichen Energiemodells STEM auf den Verkehrsbereich statt. Die gewählte Vorgehensweise mit den wesentlichen Teilmodellen Modal-Split-Modell für den Personenverkehr, Fahrleistungsmodell Güterverkehr, Zulassungsmodell Straßenverkehr, Schienenverkehrsmodell sowie Verkehrsenergiebedarfsmodell ist auf andere Regionen übertragbar. Wenngleich die landesübergreifende Bodenseeregion im Mittelpunkt steht, ist der Arbeit zu wünschen, dass sie die Fachdiskussion insgesamt stimuliert und auch andere Regionen zu vergleichbaren Betrachtungen auf Basis der entwickelten Methodik animiert.

Hamburg, im Juni 2021

Carsten Gertz

Danksagung und Widmung

An dieser Stelle möchte ich allen Menschen danken, die mich bei der Anfertigung meiner Dissertation/Doktorarbeit unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Carsten Gertz (TU Hamburg) und meinem Zweitgutachter Prof. Dr.-Ing. Dieter Genske (Hochschule Nordhausen) für die ausgezeichnete Betreuung. Die zahlreichen Gespräche auf fachlicher und persönlicher Ebene werden mir stets als bereichernder und konstruktiver Austausch in Erinnerung bleiben. Außerdem möchte ich mich bei vielen Kolleginnen und Kollegen bedanken, die mich im auf meinem Weg mit Anregungen und produktiven Gesprächen begleitet haben. Dazu gehörten insbesondere Prof. DI em. Peter Droege (Universität Liechtenstein), Prof. Dr. Ariane Ruff (Hochschule Nordhausen), Dipl.-Geogr. Sven Altenburg, Dipl.-Ing. Max Bohnet und Dr. Thiago Guimaraes (TU Hamburg), Dr. Wolfgang Loibl und DI Ghazal Etminan (AIT Austrian Institute of Technology) sowie Dipl.-Ing. Florian Liese (Bayerische Eisenbahngesellschaft).

Nicht zuletzt möchte ich mich bei Annette Hagel-Ruscher, Thomas Weiner, Nadia Nabaoui-Engelhard und Mariya Harbalieva (TU Hamburg) für die technische und organisatorische Unterstützung bedanken.

Schließlich danke ich meiner Familie, meinen Verwandten und Freunden für ihre Unterstützung während der Arbeit an dieser Dissertation.

Ich widme diese Dissertation meinen Eltern Gerhard Neumann (†) und Bettina Neumann (geb. Brosig), die mich in meiner beruflichen Entwicklung immer gefördert haben und mir stets mit Rat und Tat zur Seite gestanden sind.

Kurzfassung

Aus Sicht einer wachsenden Zahl von Gemeinden und Regionen stellen Energieautarkie und Energieautonomie den Ausweg aus der Klima- und Energiekrise dar. Sie wollen sich aus der Abhängigkeit von klimaschädlichen und zur Neige gehenden fossilen Energieträgern befreien, indem sie ihren Energiebedarf vollständig aus eigenen erneuerbaren und daher CO₂-neutralen Quellen decken. Die meisten dieser Regionen konzentrieren sich dabei auf die Deckung des Strom- und teilweise auch des Wärmebedarfs. Nur sehr wenige ziehen in Betracht, zukünftig auch den Energiebedarf der Mobilität aus erneuerbaren Quellen zu decken, obwohl die Mobilität ca. ein Drittel des Primärenergiebedarfs und der CO₂-Emissionen verursacht und der Endenergiebedarf dieses Sektors zu weit über 90 % mit fossilen Treibstoffen wie Benzin, Diesel und Erdgas gedeckt wird. In der Arbeit wird daher am Beispiel der Bodenseeregion diskutiert, ob und unter welchen Voraussetzungen sich der Verkehrsenergiebedarf einer Region vollständig aus heimischen, erneuerbaren Quellen decken lässt. In diesem Zusammenhang sollen folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

- ▶ Welche Maßnahmen sind erforderlich, um das Verkehrssystem einer Region bis zum Jahr 2050 vollständig zu dekarbonisieren?
- ▶ Unter welchen Voraussetzungen ist es möglich, den Endenergiebedarf des Verkehrs bis zum Jahr 2050 vollständig mit erneuerbaren Energieträgern aus regionaler Erzeugung zu decken?
- ▶ Welche Möglichkeiten haben Regionen, die Dekarbonisierung des Verkehrssystems zu gestalten?

In der Arbeit werden drei Szenarien für das künftige Verkehrs- und Energiesystem in der Bodenseeregion entwickelt:

- ▶ Ein Trendszenario, in dem sich die gegenwärtigen Verkehrs- und Mobilitätstrends sowie Trends bei der Entwicklung und Einführung

erneuerbarer Energietechnologie fortsetzen. Die Region schwimmt mit diesen (globalen) Trends mit, agiert aber nicht als »Trend Setter«.

- ▶ Ein Alternativszenario, in dem sich alternative Mobilitätsformen und erneuerbare Energietechnologie aufgrund günstiger Rahmenbedingungen rasch verbreiten.
- ▶ Ein Zielszenario, in dem sich die Entscheidungsträger darauf verständigen, den Fahrzeugbestand bis zum Jahr 2050 vollständig auf alternative Antriebe umzustellen. Fahrzeuge mit konventionellen Antrieben, die fossile Brennstoffe verwenden, müssen bis zum Jahr 2050 stillgelegt werden.

Die Szenarien zeigen, dass eine vollständige Dekarbonisierung des Personenverkehrs möglich ist, wenn in den nächsten 5 bis spätestens 10 Jahren die dazu notwendigen Rahmenbedingungen in legislativer, fiskalisch-regulatorischer und institutioneller Hinsicht geschaffen werden. Eine Deckung des Verkehrsenergiebedarfs mit erneuerbaren Energieträgern aus der Region erscheint unter sehr günstigen Rahmenbedingungen möglich. Sie erfordert allerdings sehr starke Effizienzsteigerungen im regionalen Verkehrssystem sowie den massiven Ausbau der erneuerbaren Energieerzeugung. Im Hinblick auf den Personenverkehr lassen sich deutliche Effizienzsteigerungen durch den Ausbau des Öffentlichen Nahverkehrs und die Förderung des Fuß- und Radverkehrs erreichen.

Abstract

In der Arbeit wird am Beispiel der Bodenseeregion diskutiert, ob und unter welchen Voraussetzungen sich der Verkehrsenergiebedarf einer Region vollständig aus heimischen, erneuerbaren Quellen decken lässt. Hierfür werden mehrere Szenarien entwickelt. Es kann gezeigt werden, dass eine vollständige Dekarbonisierung des Verkehrssystems möglich ist, wenn in den nächsten 5 bis spätestens 10 Jahren die dafür notwendigen Rahmenbedingungen geschaffen werden. Auch eine Deckung des Verkehrsenergiebedarfs mit erneuerbaren Energieträgern aus der Region erscheint unter sehr günstigen Rahmenbedingungen möglich.

Using the example of the Lake Constance region, the thesis discusses whether and under what conditions the transport energy demand of a region can be completely covered by domestic, renewable sources. Several scenarios are being developed for this. It can be shown that a complete decarbonization of the transport system is possible if the necessary framework conditions are created in the next 5 to 10 years at the latest. Covering the transport energy demand with renewable energy sources from the region also appears possible under very favorable framework conditions.

Inhalt

1	Anlass, Ziel und Struktur der Arbeit	25
2	Stand der Forschung	31
2.1	Die Klimakrise und ihre Bedeutung für die Zukunft der Energie- und Verkehrssysteme	31
2.2	Energie- und Klimaziele der DACH+-Staaten	35
2.3	Zero-Carbon Mobility	39
2.4	Regionale Energieautonomie – ein Konzept für ein zukünftiges Energiesystem	43
2.5	Energieautonome Regionen	49
2.6	Bewertung des Forschungsstandes und Forschungsfragen	51
3	Methoden	54
3.1	Szenarioanalyse	54
3.2	Modellierung und Simulation	57
4	Szenariofeldbestimmung	62
4.1	Betrachtungszeitraum	62
4.2	Beispiel Bodenseeregion	63
5	Identifikation der Schlüsselfaktoren und Modellbildung	66
5.1	Modal-Split-Modell für den Personenverkehr	66
5.2	Fahrleistungsmodell für den Güterverkehr	70
5.3	Zulassungsmodell für den Straßenverkehr	70
5.4	Schienenverkehrsmodell	84
5.5	Verkehrsenergieverbrauchsmodell	85
5.6	Space Type Energy Model (STEM)	86
5.7	Verknüpfung der Modelle	91

6	Analyse der Schlüsselfaktoren	94
6.1	Geografie und Siedlungsstruktur der Bodenseeregion	94
6.2	Bevölkerungsentwicklung	95
6.3	Wirtschaftliche Entwicklung	97
6.4	Verkehrsverhalten	99
6.5	Bestand der Kraftfahrzeuge	109
6.6	Fahrleistung der Kraftfahrzeuge	116
6.7	Kraftstoffverbrauch und CO ₂ -Emissionen der Kraftfahrzeuge	120
6.8	Schienenverkehr	127
6.9	Potenzial für die Erzeugung erneuerbarer Energie	132
7	Szenario-Generierung	146
7.1	Merkmale des Trendszenarios	146
7.2	Merkmale des Alternativszenarios	153
7.3	Merkmale des Zielszenarios	162
8	Bewertung und Diskussion der Szenarien	172
8.1	Trendszenario	172
8.1.1	Verkehrsnachfrage	172
8.1.2	Fahrzeugbestandsentwicklung	177
8.1.3	Endenergieverbrauch	181
8.1.4	Regenerative Erträge	182
8.2	Alternativszenario	186
8.2.1	Verkehrsnachfrage	186
8.2.2	Fahrzeugbestandsentwicklung	191
8.2.3	Endenergieverbrauch	196
8.2.4	Regenerative Erträge	197
8.3	Zielszenario	200
8.3.1	Verkehrsnachfrage	200
8.3.2	Fahrzeugbestandsentwicklung	204
8.3.3	Endenergieverbrauch	208
8.3.4	Regenerative Erträge	209

9	Szenario-Transfer	218
9.1	Akteursanalyse	218
9.2	Handlungsempfehlungen	235
10	Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick	248
10.1	Maßnahmen zur Dekarbonisierung des Verkehrssystems bis 2050	249
10.2	Voraussetzungen regional autonomer Endenergiebedarfsdeckung des Verkehrs	256
10.3	Möglichkeiten regionaler Gestaltung der Verkehrssystem-Dekarbonisierung	263
10.4	Übertragbarkeit der Ergebnisse	276
10.5	Limitationen und Vorschläge zu weiterer Forschung	278
10.6	Schlussbemerkung	280
	Quellen	282
	Anhang	301

Abbildungen

Abbildung 1:	Zusammenhänge zwischen Treibhausgasemissionen und Klimawandel	33
Abbildung 2:	Direkte Treibhausgas-Emissionen des Verkehrssektors 1970-2010	34
Abbildung 3:	Verwendete Modelle	58
Abbildung 4:	Die Bodenseeregion	65
Abbildung 5:	Bruttoregionalprodukt pro Kopf und PKW-Dichte europäischer NUTS-2-Regionen 2010	74
Abbildung 6:	Bruttoregionalprodukt und PKW-Dichte von NUTS-3-Regionen in den Bodenseeanrainerstaaten Deutschland, Österreich, Schweiz und Liechtenstein 2010	75
Abbildung 7:	Überlebenswahrscheinlichkeiten der PKW nach Altersjahren – Kurvenfunktion und Zulassungsdaten des KBA	81
Abbildung 8:	Überlebenswahrscheinlichkeiten der LKW nach Altersjahren – Kurvenfunktion und Zulassungsdaten des KBA	81
Abbildung 9:	Überlebenswahrscheinlichkeiten der Krafträder nach Altersjahren	82
Abbildung 10:	Überlebenswahrscheinlichkeiten der Omnibusse nach Altersjahren	83
Abbildung 11:	Energieparteien im Space Type Energy Modell (STEM)	89
Abbildung 12:	Vorgehensweise zur Ermittlung der städtischen Flächen- und Energiepotenziale	90
Abbildung 13:	Entwicklungspfade für den Strombedarf der Mobilität 2010-2050	92
Abbildung 14:	Entwicklungspfade für den Kraftstoffbedarf der Mobilität 2010-2050	92

Abbildung 15: Siedlungsdichte nach NUTS-3-Regionen 2015	94
Abbildung 16: Bevölkerung der Bodenseeregion 2015 nach Teilregionen	95
Abbildung 17: Bevölkerungsvorausrechnung (EUROSTAT- Hauptszenario) für die Bodenseeregion 2015 bis 2050 nach NUTS-3-Regionen	96
Abbildung 18: Altersstruktur der Bodenseeregion 2015 und 2050	97
Abbildung 19: Bruttoinlandsprodukt der NUTS-3-Regionen zu laufenden Marktpreisen 2016	98
Abbildung 20: Siedlungsstrukturelle Kreistypen des BBSR	103
Abbildung 21: Durchschnittliche Unterwegszeit nach Teilregionen	105
Abbildung 22: Modalsplit (distanzbasiert) nach Teilregionen	106
Abbildung 23: Modalsplit (reisezeitbasiert) nach Teilregionen	108
Abbildung 24: Fahrzeugtypen in der Bodenseeregion 2010	110
Abbildung 25: PKW-Dichte in der Bodenseeregion 2010 nach NUTS-3-Regionen	110
Abbildung 26: PKW in der Bodenseeregion 2010 nach Antriebsarten	111
Abbildung 27: Bestand an PKW mit Elektroantrieb in der Bodenseeregion zur Jahreswende 2011/2012	113
Abbildung 28: Neuzulassungen von E-PKW in der Bodenseeregion 2006-2012	113
Abbildung 29: Baseline-Analyse für den Energieverbrauch des Straßenverkehrs	121
Abbildung 30: Baseline-Analyse des Schienenverkehrs	127
Abbildung 31: Das Eisenbahnnetz in der Bodenseeregion	128
Abbildung 32: Fahrleistung des Schienenverkehrs 2010 nach Verkehrsarten	129

Abbildung 33: Fahrleistung des Schienenverkehrs 2010 nach Teilregionen und Verkehrsarten	130
Abbildung 34: Endenergieverbrauch und CO ₂ -Emissionen nach Traktionsarten	130
Abbildung 35: Endenergieverbrauch und CO ₂ -Emissionen des Schienenverkehrs 2010 nach Teilräumen und Verkehrsarten	131
Abbildung 36: Relative Verteilung der Siedlungs- und Landschaftsraumtypen in der Bodenseeregion	134
Abbildung 37: Einteilung der Gemeinden in der Bodenseeregion in Raumkategorien	135
Abbildung 38: Relative Verteilung der Siedlungsraumtypen	136
Abbildung 39: Siedlungs- und Landschaftsraumtypen in der Bodenseeregion	138
Abbildung 40: Tatsächlich nutzbares Potenzial für die Optionen der regenerativen Stromerzeugung	140
Abbildung 41: Tatsächlich Nutzbares Potenzial für die Optionen der regenerativen Wärmeerzeugung	140
Abbildung 42: Standorte der untersuchten Parkplätze in Frauenfeld	144
Abbildung 43: CO ₂ -Emissionen neuzugelassener PKW in Österreich 2000-2050	152
Abbildung 44: Liniennetz-Konzept BODAN-RAIL	156
Abbildung 45: TEN-Ergänzungskonzept	157
Abbildung 46: Entwicklung der mittleren Reisezeit je Person im Trendszenario	173
Abbildung 47: Entwicklung der Gesamtreisezeit im Trendszenario	173
Abbildung 48: Entwicklung der Verkehrsleistung des Straßenpersonenverkehrs im Trendszenario	174
Abbildung 49: Trendszenario Bodenseeregion: Personenverkehrsleistung nach Teilregionen 2010-2050	174

Abbildung 50: Entwicklung der Fahrleistung des Straßenpersonenverkehrs im Trendszenario	175
Abbildung 51: Entwicklung der Fahrleistung des Schienengüterverkehrs im Trendszenario	176
Abbildung 52: Entwicklung der Fahrleistung des Schienenpersonenverkehrs im Trendszenario	176
Abbildung 53: Entwicklung des Kraftrad-Bestands im Trendszenario	178
Abbildung 54: Entwicklung des PKW-Bestands im Trendszenario 2010-2050	178
Abbildung 55: Entwicklung des Omnibus-Bestands im Trendszenario 2010-2050	179
Abbildung 56: Entwicklung des Bestands Leichter Straßengüterverkehrsfahrzeuge im Trendszenario 2010-2050	180
Abbildung 57: Entwicklung des Bestands Schwerer Straßengüterverkehrsfahrzeuge im Trendszenario 2010-2050	180
Abbildung 58: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Verkehr beim Trendszenario 2010-2050	181
Abbildung 59: Regenerative Stromerträge und Strombedarf im Trendszenario	183
Abbildung 60: Regenerative Treibstofferträge und Treibstoffbedarf im Trendszenario	184
Abbildung 61: Regenerative Wärmeerträge und Wärmebedarf im Trendszenario	185
Abbildung 62: Entwicklung der mittleren Reisezeit je Person im Alternativszenario	187
Abbildung 63: Entwicklung der Gesamtreisezeit im Alternativszenario	187
Abbildung 64: Entwicklung der Verkehrsleistung des Straßenpersonenverkehrs im Alternativszenario	189

Abbildung 65: Entwicklung der Fahrleistung des Straßenpersonenverkehrs im Alternativszenario	189
Abbildung 66: Entwicklung der Fahrleistung des Schienengüterverkehrs im Alternativszenario	190
Abbildung 67: Entwicklung der Fahrleistung des Schienenpersonenverkehrs im Alternativszenario	190
Abbildung 68: Entwicklung des Kraftrad-Bestands im Alternativszenario	192
Abbildung 69: Entwicklung des PKW-Bestands im Alternativszenario	192
Abbildung 70: Entwicklung des Omnibus-Bestands im Alternativszenario	193
Abbildung 71: Entwicklung des Bestands Leichter Straßengüterverkehrsfahrzeuge (SGF) im Alternativszenario	195
Abbildung 72: Entwicklung des Bestands Schwerer Straßengüterverkehrsfahrzeuge (SGF) im Alternativszenario	195
Abbildung 73: Entwicklung des Endenergieverbrauchs des Verkehrs im Alternativszenario	196
Abbildung 74: Regenerative Stromerträge und Strombedarf im Alternativszenario	197
Abbildung 75: Regenerative Wärmeerträge und Wärmebedarf im Alternativszenario	198
Abbildung 76: Regenerative Treibstofferrträge und Treibstoffbedarf im Alternativszenario	199
Abbildung 77: Entwicklung der mittleren Reisezeit je Person im Zielszenario	200
Abbildung 78: Entwicklung der Gesamtreisezeit im Zielszenario	201
Abbildung 79: Entwicklung der Verkehrsleistung des Straßenpersonenverkehrs im Zielszenario	201

Abbildung 80: Entwicklung der Fahrleistung des Straßenpersonenverkehrs im Zielszenario	202
Abbildung 81: Entwicklung der Fahrleistung des Schienengüterverkehrs im Zielszenario	203
Abbildung 82: Entwicklung der Fahrleistung des Schienenpersonenverkehrs im Zielszenario	203
Abbildung 83: Entwicklung des Kraftrad-Bestands im Zielszenario	204
Abbildung 84: Entwicklung des PKW-Bestands im Zielszenario	205
Abbildung 85: Entwicklung des Omnibus-Bestands im Zielszenario	205
Abbildung 86: Entwicklung des Bestands Leichter Straßengüterverkehrsfahrzeuge im Zielszenario 2010-2050	207
Abbildung 87: Entwicklung des Bestands Schwerer Straßengüterverkehrsfahrzeuge im Zielszenario 2010-2050	207
Abbildung 88: Entwicklung des Endenergieverbrauchs des Verkehrs im Zielszenario	208
Abbildung 89: Regenerative Stromerträge und Strombedarf im Zielszenario	209
Abbildung 90: Regenerative Wärmeerträge und Wärmebedarf im Zielszenario	211
Abbildung 91: Regenerative Treibstofferrträge und Treibstoffbedarf im Zielszenario	212
Abbildung 92: Leitsätze und strategische Schwerpunkte der Internationalen Bodenseekonferenz (IBK)	233
Abbildung 93: Handlungsspielräume der Bodenseeregion bei der Umsetzung der Handlungsempfehlungen	247
Abbildung 94: Klassifizierung von NUTS-3-Regionen nach ihrem Potenzial für die Erzeugung erneuerbarer Energie	278

Tabellen

Tabelle 1:	Nationally Determined Contributions der EU, der Schweiz und Liechtensteins	38
Tabelle 2:	100%-Erneuerbare-Energie-Regionen mit Mobilitätszielen	50
Tabelle 3:	Entwicklungspfade für den Endenergiebedarf der Mobilität 2010-2050	93
Tabelle 4:	Geschätztes Wachstum des BIP pro Kopf in den Bodensee-Anrainerstaaten 2015-2050	99
Tabelle 5:	Merkmal „Verkehrsmittel“ im Wegedatensatz „Mobilität in Vorarlberg“	100
Tabelle 6:	Merkmal „Verkehrsmittel“ im Wegedatensatz des MZV 2010	102
Tabelle 7:	Landkreise in der Bodenseeregion gemäß BBSR-Kreistypologie 2008	104
Tabelle 8:	Anzahl der Straßengüterverkehrsfahrzeuge 2010	114
Tabelle 9:	Anzahl der Omnibusse 2010	115
Tabelle 10:	Anzahl der Krafträder 2010	116
Tabelle 11:	Durchschnittliche Fahrleistung eines PKW nach Teilregionen	117
Tabelle 12:	Gesamtfahrleistung der PKW nach Teilregionen	118
Tabelle 13:	Fahrleistung der Omnibusse 2010	119
Tabelle 14:	Fahrleistung der Krafträder 2010	120
Tabelle 15:	Kraftstoffverbrauch der PKW 2010	122
Tabelle 16:	CO ₂ -Emissionen der PKW 2010	123
Tabelle 17:	Kraftstoffverbrauch der Straßengüterverkehrsfahrzeuge 2010	124
Tabelle 18:	Kraftstoffverbrauch und CO ₂ -Emissionen der Omnibusse 2010	125

Tabelle 19: Kraftstoffverbrauch und CO ₂ -Emissionen der Krafträder 2010	126
Tabelle 20: Siedlungs- und Landschaftsraumtypen in der Bodenseeregion	137
Tabelle 21: Verkehrsflächen in Deutschland, Österreich, der Schweiz und Liechtenstein	142
Tabelle 22: Kapazitätzunahme des Schienenpersonenverkehrs im Alternativszenario	158
Tabelle 23: Merkmale der Szenarien	168
Tabelle 24: Ergebnisse der Szenario-Berechnungen für die Mobilität	214
Tabelle 25: Ergebnisse der Szenario-Berechnungen für das Energiesystem	216
Tabelle 26: Zuständigkeiten der Landes- und Kantonalbehörden in der Bodenseeregion	222
Tabelle 27: Zuständigkeiten der Landkreise und kreisfreien Städte in der Bodenseeregion	225
Tabelle 28: Zuständigkeiten der Städte und Gemeinden in der Bodenseeregion	226
Tabelle 29: Handlungsfelder der Verkehrssystem-De karbonisierung	271

1 Anlass, Ziel und Struktur der Arbeit

Die DACH+-Staaten Deutschland, Österreich, die Schweiz und Liechtenstein haben das Pariser Übereinkommen zum Klimaschutz ratifiziert, welches eine Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 bis maximal 2,0 Grad Celsius zum Ziel hat. Eine wesentliche Voraussetzung für die Erreichung dieses Zieles ist die Steigerung der Energieeffizienz und die vollständige Umstellung der Energieversorgung für alle Verbrauchssektoren des Energiesystems auf erneuerbare Energieträger.

Schon seit etwa fünfzehn Jahren wird diskutiert, wie der Verkehrssektor im Sinne des Klimaschutzes umgebaut werden kann. Dennoch werden der Energiebedarf und CO₂-Ausstoß des Verkehrs nicht in dem Maße gesenkt werden, wie es für die Begrenzung des globalen Temperaturanstiegs bei +1,5 bis maximal +2,0 Grad Celsius im Vergleich zum vorindustriellen Referenzwert erforderlich wäre (Sims et al., 2014). Der Verkehrssektor ist somit ein Sektor des Energiesystems, der sich den Dekarbonisierungsbemühungen weitgehend entzogen hat und der nach wie vor steigende Energieverbräuche und CO₂-Emissionen pro Kopf verzeichnet.

Dieses Problem wiegt umso schwerer, als dass es von gegenwärtigen Ansätzen zur Schaffung einer klimaneutralen Energieversorgung kaum berücksichtigt wird. So spielt der Begriff der »Energieautonomie« (Scheer, 2005) eine prominente Rolle in der akademischen wie in der politischen Diskussion um die Dekarbonisierung des Energiesystems. Dabei handelt es sich um einen Gegenentwurf zur heutigen Energieversorgung, die auf dem Import fossiler Energieträger und deren Umwandlung in Großkraftwerken und Raffinerien beruht. Aus Sicht einer wachsenden Zahl von Gemeinden und Regionen stellen Energieautarkie und Energieautonomie den Ausweg aus der Klima- und Energiekrise dar. Sie wollen sich aus der Abhängigkeit von den klimaschädlichen und zur Neige gehenden fossilen Energieträgern befreien, indem sie ihren Energiebedarf vollständig aus eigenen erneuerbaren und daher CO₂-neutralen Quellen decken. Die meisten dieser Regionen konzentrieren sich dabei jedoch auf die Deckung des Strom- und teilweise auch des Wärmebedarfs, nur sehr wenige

ziehen in Betracht, künftig auch den Energiebedarf des Verkehrssektors eigenständig CO₂-neutral zu decken, obwohl dieser ca. ein Drittel des Primärenergiebedarfs und – weil der Endenergiebedarf dieses Sektors zu weit über 90 % mit fossilen Treibstoffen wie Benzin, Diesel und Erdgas gedeckt wird – auch der CO₂-Emissionen verursacht. Die Dekarbonisierung des Verbrauchssektors Verkehrs stellt somit eine besonders große Herausforderung dar.

Es stellt sich die Frage, warum die Mobilität trotz ihrer schlechten Klimabilanz eine so geringe Rolle in den Energieautonomiezielen der Gemeinden und Regionen spielt. Hierzu liegen bislang noch keine Untersuchungen vor. In dieser Arbeit soll daher zunächst analysiert werden, ob das Konzept regionaler Energieautonomie im Bereich der Mobilität überhaupt sinnvoll angewendet werden kann, d.h. ob sich der der Verkehrsenergiebedarf einer Region vollständig aus heimischen erneuerbaren Quellen decken lässt. Ferner soll geklärt werden, welche politischen, wirtschaftlichen, soziokulturellen und technologischen Voraussetzungen hierfür erfüllt sein müssen. Schließlich ist zu diskutieren, welche Möglichkeiten Regionen haben, die genannten Voraussetzungen im eigenen Verantwortungsbereich, also »autonom« zu schaffen.

Die Untersuchung erfolgt am Beispiel der Bodenseeregion. Die Ergebnisse sollen jedoch auch auf ähnlich strukturierte Regionen in den DACH+-Staaten übertragbar sein. Unter Bodenseeregion wird das weitere Umland des Bodensees verstanden. Der Bodensee befindet sich im nördlichen Alpenvorland an der Grenze zwischen der Schweiz, Deutschland und Österreich. Der Bodenseeregion werden in dieser Arbeit die deutschen Landkreise Sigmaringen, Konstanz, Bodenseekreis, Ravensburg, Lindau und Oberallgäu, die kreisfreie Stadt Kempten sowie die schweizerischen Kantone und Halbkantone St. Gallen, Thurgau, Appenzell Ausserrhoden und Appenzell Innerrhoden, das österreichische Bundesland Vorarlberg und das Fürstentum Liechtenstein zugerechnet. Die Abgrenzung erfolgte im Rahmen des unten näher geschilderten Forschungsprojekts »BAER – Bodensee-Alpenrhein Energieregion« in

Anlehnung an den Kooperationsraum der Internationalen Bodensee-konferenz (IBK-Raum)¹.

Es gibt in der Bodenseeregion eine ganze Reihe von Initiativen im Bereich Klimaschutz und nachhaltige Mobilität, die aber nur eingeschränkt mit einander vernetzt sind. Das IBH-Forschungsprojekt »BAER – Bodensee-Alpenrhein Energieregion« verfolgte erstmals das Ziel einer Bündelung dieser Initiativen. In diesem Forschungsprojekt, das von der Universität Liechtenstein geleitet wurde, entstand in den Jahren 2009-2013 erstmals die Vision einer energieautonomen Bodensee-region (Droege et al., 2014). Das Projekt untersuchte die technologischen, organisatorischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten der Bodensee-region, sich selbst mit erneuerbarer Energie zu versorgen. Getragen wurde das Projekt von der Universität Liechtenstein, der Universität St. Gallen (HSG), der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Gestaltung (HTWG) Konstanz, der Hochschule für Technik Rapperswil (HSR) sowie der Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften (ZHAW) Winterthur unter dem Dach der Internationalen Bodenseehochschule (IBH) und von Interreg IV.

Der Autor der vorliegenden Arbeit war damals als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Nachhaltige Raumentwicklung der Universität Liechtenstein und hat das Forschungsprojekt nachhaltig mit-gestaltet. Dementsprechend baut die vorliegende Arbeit auf der Vision einer energieautonomen Bodenseeregion und anderen Ergebnissen des Forschungsprojektes auf und vertieft diese für den Sektor Verkehr und Mobilität.

Entsprechend ist die Arbeit in den Kontext einer Reihe von Vor-publikationen und -arbeiten eingebettet:

- ▶ Im Buchbeitrag »Regionale Mobilität – erneuerbar und kli-mafreundlich« wurde ein Überblick über den damaligen Stand der Forschung gegeben und der Forschungsbedarf identifiziert. Der Beitrag erschien als Teil des Sammelbandes *Schneller, öfter, weiter?*

1 Der IBK-Raum umfasst zusätzlich die Kantone Zürich und Schaffhausen, die zur Metropolregion Zürich gehören. Da sie sich strukturell von den anderen Teilräumen der Bodenseeregion unterscheiden, wurden sie im Forschungsprojekts BAER ausgeklammert und werden auch in dieser Arbeit nicht behandelt.

Perspektiven der Raumentwicklung in der Mobilitätsgesellschaft, der vom Jungen Forum der Akademie für Raumforschung und Landesplanung (ARL) herausgegeben wurde (Neumann, 2011).

- ▶ Im wissenschaftlichen Artikel »Transport Aspects of Local and Regional Energy Autonomy«, erschienen im *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, wurden die mobilitätsrelevanten Fragestellungen des Forschungsprojekts »BAER – Bodensee-Alpenrhein-Energieregion« und seines Vorgängerprojekts »Erneuerbares Liechtenstein« entwickelt sowie erste Ergebnisse des Projekts »Erneuerbares Liechtenstein« vorgestellt (Neumann et al., 2011).
- ▶ Im Journal *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* erschien der Artikel »The Potential of Photovoltaic Carports to Cover the Energy Demand of Road Passenger Transport«, der eine Methode für die Ermittlung des solaren Erzeugungspotenzials von Parkplatzflächen vorstellt und deren Anwendung in einer Fallstudie zur Stadt Frauenfeld beschreibt. Die wichtigsten Ergebnisse dieser Untersuchung können auch im Abschnitt »Potenzial der Verkehrsflächen für die Erzeugung Erneuerbarer Energie« des Kapitels 6.9 nachgelesen werden (Neumann et al. 2012).
- ▶ Nach Abschluss des Forschungsprojekts BAER wurde der Buchbeitrag »Erneuerbare Mobilität, solarer Individualverkehr« veröffentlicht, der die mobilitätsrelevanten Ergebnisse des BAER-Forschungsprojekts zusammenfasst (Neumann et al. 2014). Der Beitrag ist Bestandteil des Sammelbandes *Regenerative Region. Bodensee-Alpenrhein Energie- und Klimaatlas* (Droege, 2014a).
- ▶ Fragestellungen zum regionalen Mobilitätsverhalten in der Bodenseeregion wurden im Rahmen einer Masterarbeit am AIT Austrian Institute of Technology vertieft, die vom Autor der Dissertation mitbetreut wurde. Im Rahmen dieser Masterarbeit entstand der Konferenzbeitrag »Determinants of Transport Mode Choice in the Austrian Province of Vorarlberg«, der in den Online-Proceedings der Konferenz REAL CORP 2017 veröffentlicht wurde (Ashrafi & Neumann 2017).

Darüber hinaus wurden Zwischenstände der Arbeit bei verschiedenen internen wie öffentlichen Veranstaltungen der Universität Liechtenstein und der Technischen Universität Hamburg vorgestellt, zuletzt

beim Doktorandenkolloquium des Forschungsschwerpunkts Logistik und Mobilität (LuM) der TU Hamburg am 11. September 2018.

Die Untersuchung wird mittels der Szenariotechnik durchgeführt. Dabei handelt es sich um eine wissenschaftliche Methodik, die es ermöglicht »durch die Konstruktion von verschiedenen möglichen Zukünftigen Orientierungswissen zu generieren, um gegenwärtiges Handeln daran auszurichten.« (Kosow & Gaßner, 2008, S. 11). Unterschiedliche Szenarien sollen dabei mögliche Bandbreiten abdecken und beschreiben, in welche Richtung die Zukünfte gehen können, welche Handlungen dafür notwendig sind und welche Wirkungen, Vor- und Nachteile sich daraus ergeben. Ausgangspunkt der qualitativen wie der quantitativen Szenarioentwicklung ist eine Ermittlung des gegenwärtigen Verkehrsenergieverbrauchs in der Bodenseeregion für alle Verkehrsmittel und Treibstoffarten. Diese Baseline-Ermittlung basiert auf einer genauen Analyse des Verkehrsverhaltens, der Fahrzeugbestände und Fahrleistungen sowie der Eisenbahnnetze in der deutschen, der schweizerischen, der österreichischen und der liechtensteinischen Teilregion. Da an der Gestaltung der zukünftigen Mobilität in der Bodenseeregion unterschiedliche Akteure mitwirken, wird zudem eine Akteursanalyse durchgeführt.

Die Arbeit gliedert sich in zehn Kapitel. Nach der Vorstellung von Anlass und Ziel der Arbeit in Kapitel 1 werden in Kapitel 2 der Stand der Forschung dokumentiert und die Forschungsfragen abgeleitet. Darauf aufbauend erfolgt in Kapitel 3 die Auswahl und Vorstellung der Szenarioanalyse als Forschungsmethode der Arbeit. Im Kapitel 4 wird das Feld der späteren Szenarioanalyse in räumlicher Hinsicht und zeitlicher Hinsicht definiert. Kapitel 5 benennt die Schlüsselfaktoren der Szenarioanalyse und stellt ein quantitatives Modell vor, das es erlaubt, unterschiedliche Szenarien zum regionalen Verkehrsenergiebedarf und zur Bedarfsdeckung durch regional erzeugte erneuerbare Energie zu rechnen und anhand ausgewählter Schlüsselindikatoren zu bewerten. Im Kapitel 6 werden die Ausprägungen der Schlüsselfaktoren im Basisjahr anhand regionalisierter Daten analysiert. Diese Regionaldaten dienen gleichzeitig auch als Input-Daten für das quantitative Modell. Im Kapitel 7 werden drei Szenarien entworfen: Ein Trendszenario, das die gegenwärtige Entwicklung fortschreibt, ein Alternativszenario, das von einer im Vergleich zum Trendszenario schnelleren Diffusion alternativer Antriebe

und erneuerbarer Energietechnologien im Szenariofeld ausgeht, und ein Zielszenario, in dem die Inputparameter und Annahmen zum Verhalten der Akteure so gewählt sind, dass bis zum Jahr 2050 der Endenergiebedarf der Region vollständig aus regional erzeugter erneuerbarer Energie gedeckt wird. Die Ergebnisse der verschiedenen Szenarioberechnungen werden in Kapitel 8 beschrieben und miteinander verglichen. Kapitel 9 beschreibt, wie die Erkenntnisse aus der Szenariountersuchung in die Praxis der grenzüberschreitenden Regionalentwicklung in der Bodenseeregion übertragen werden könnte. Hierzu wird zunächst eine Akteursanalyse durchgeführt, anschließend werden Handlungsempfehlungen für die Etablierung einer grenzüberschreitenden Modellregion für Energieautonomie und klimafreundliche Mobilität formuliert. Das abschließende Kapitel 10 fasst die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit zusammen und beantwortet so die in Kapitel 2 formulierten Forschungsfragen. Darüber hinaus werden die Übertragbarkeit der Ergebnisse diskutiert, spezifische Limitationen der Arbeit aufgezeigt und Vorschläge zur weiteren Forschung unterbreitet.

2 Stand der Forschung

In diesem Kapitel wird der Forschungsstand dargestellt und auf dieser Basis werden Forschungsfragen entwickelt. Das Forschungsprojekt der vorliegenden Arbeit wird dann im Kontext vorheriger Forschungsprojekte und Vorveröffentlichungen verortet.

2.1 Die Klimakrise und ihre Bedeutung für die Zukunft der Energie- und Verkehrssysteme

Seit den 1950er Jahren lassen sich Auswirkungen des Klimawandels beobachten: Die Atmosphäre und die Ozeane haben sich erwärmt, die Mengen an Schnee und Eis haben sich verringert und der Meeresspiegel ist gestiegen (IPCC, 2014, S. 2). Die anthropogenen Treibhausgasemissionen nehmen seit dem Beginn der Industriellen Revolution vor zweihundert Jahren kontinuierlich zu und haben aufgrund des globalen Wirtschafts- und Bevölkerungswachstums ein nie dagewesenes Niveau erreicht (Abbildung 1). Mittlerweile sind die höchsten atmosphärischen Konzentrationen der Treibhausgase Kohlendioxid, Methan und Lachgas seit 800.000 Jahren erreicht. Auswirkungen dieser hohen Konzentrationen sind im gesamten Klimasystem nachweisbar und in der Wissenschaft besteht ein Konsens darüber, dass sie die Hauptursache für die globale Erwärmung sind (IPCC, 2014, S. 4).

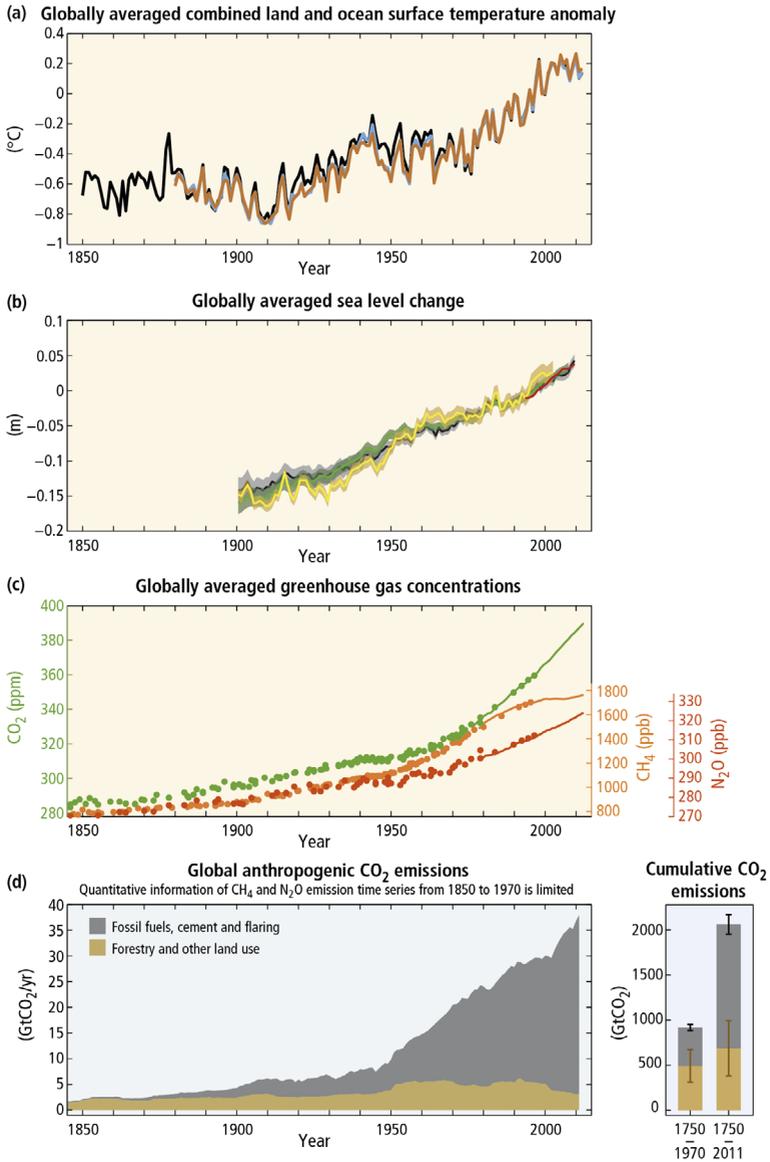
Wenn weiter Treibhausgase im gegenwärtigen Umfang emittiert werden, wird sich die globale Erwärmung verstärken und die Wahrscheinlichkeit schwerwiegender, allgegenwärtiger und irreversibler Auswirkungen auf Menschen und Ökosysteme zunehmen. Um den Klimawandel zu verlangsamen und schließlich aufzuhalten, ist eine erhebliche und dauerhafte Reduzierung der Treibhausgasemissionen erforderlich (IPCC, 2014, S. 8). Nur ein starker Rückgang der Emissionen in den nächsten Jahrzehnten kann das Klimarisiko im 21. Jahrhundert und darüber hinaus verringern und die Aussichten auf eine wirksame Anpassung an die bereits unvermeidbaren Folgen des Klimawandels erhöhen und so zu einer klimaresilienten nachhaltigen Entwicklung beitragen (IPCC, 2014, S. 17). Optionen für die Minderung von Treibhausgasemissionen sind nach Auffassung des Intergovernmental Panel on Climate

Change (IPCC) in allen wichtigen Sektoren verfügbar, also auch für die Mobilität. Die Kosten einer Minderung sinken, wenn ein integrierter Ansatz verwendet wird, der Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasintensität von Endverbrauchssektoren kombiniert, die Energieversorgung dekarbonisiert und die Nettoemissionen verringert (IPCC, 2014, S. 28).

Der Energieversorgungssektor ist der bedeutendste Emittent von Treibhausgasen, denn mehr als ein Drittel der anthropogenen Treibhausgasemissionen stammt aus diesem Sektor. Da energiebezogene Treibhausgasemissionen ein sich beschleunigendes Wachstum verzeichnen, geht das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in seinem Baseline-Szenario davon aus, dass sich die energiebezogenen Treibhausgasemissionen zwischen 2010 und 2050 mehr als verdoppeln werden. Um die Treibhausgaskonzentrationen auf einem niedrigen Niveau zu stabilisieren, ist eine grundlegende Umgestaltung des Energiesystems erforderlich. Diese Umgestaltung muss sowohl Anreize zur Steigerung der Energieeffizienz als auch die schrittweise Substitution fossiler durch alternative Brenn- und Treibstoffe umfassen, was zu reduzierten Treibhausgasemissionen führt (Bruckner et al., S. 516-517).

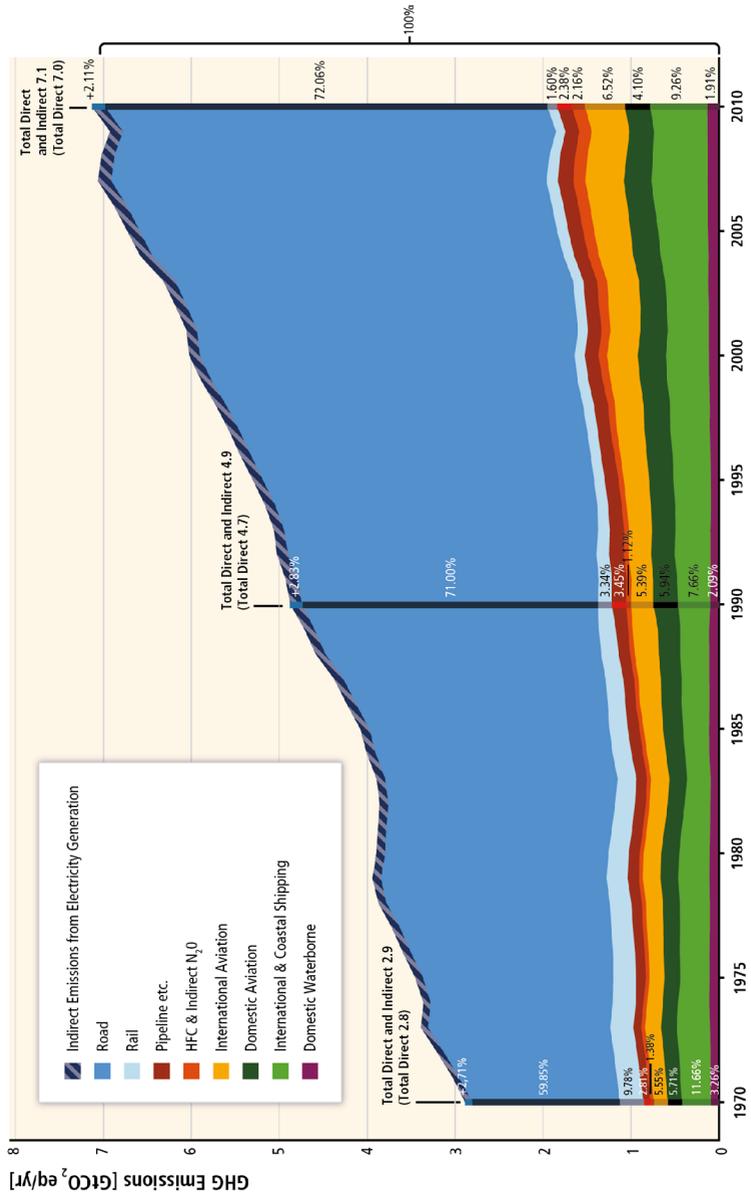
Dem Ausbau erneuerbarer Energieträger kommt bei der klimafreundlichen Umgestaltung des Energiesystems eine Schlüsselrolle zu. Denn erneuerbare Energieträger haben ein hohes Potenzial für die Reduzierung von Treibhausgasen und verfügen über weitere Eigenschaften, die ihre Förderung sinnvoll erscheinen lässt. Hierzu gehören u. a. eine sichere Energieversorgung durch verringerte Importabhängigkeit, positive Beiträge zur sozialen und wirtschaftlichen Entwicklung, besserer Zugang zu Energie in abgelegenen Regionen und vergleichsweise geringe Umweltauswirkungen. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die potenziell erzeugbare globale Menge an erneuerbarer Energie den weltweiten Energiebedarf signifikant übersteigt. Ungelöste technische und wirtschaftliche Fragestellungen, Schwierigkeiten bei der Integration von erneuerbarer Energie in das Energiesystem sowie Fragen der Akzeptanz und Nachhaltigkeit einzelner Technologien behindern jedoch nach wie vor den Ausbau. Daher sind für eine längere Übergangszeit »Policy Measures« (wie steuerliche Anreize, Investitionszuschüsse oder Einspeisevergütungen) erforderlich, um die Umgestaltung des Energiesystems voranzubringen (Edenhofer et al., 2012, S. 7-26).

Abbildung 1: Zusammenhänge zwischen Treibhausgasemissionen und Klimawandel



Quelle: IPCC, 2014, S. 3.

Abbildung 2: Direkte Treibhausgas-Emissionen des Verkehrssektors 1970-2010



Quelle: Sims et al., 2014.

Der Verkehrssektor verursacht direkt und indirekt rund 23 % der energiebezogenen CO₂-Emissionen und diese Emissionen steigen kontinuierlich, da Einsparungen aufgrund von Effizienzgewinnen in der Fahrzeugtechnologie durch die weltweit steigende Verkehrsnachfrage mehr als ausgeglichen werden (Abbildung 2). Ohne die Umsetzung aggressiver und nachhaltiger Minderungsmaßnahmen rechnet das IPCC mit einer Zunahme der Treibhausgasemissionen um 35 % bis zum Jahr 2035 und bis zu 50 % bis 2050. Damit würden die Emissionen des Verkehrssektors noch schneller wachsen als die des Energiesektors. Treiber dieser Entwicklung sind u. a. der steigende Wohlstand in Nicht-OECD-Ländern, sinkende Kosten im Flugverkehr und eine stark wachsende Güterverkehrsnachfrage. Um die CO₂-Emissionen des Verkehrs nachhaltig zu reduzieren, kommen Maßnahmen in den Bereichen Verkehrsvermeidung, Verkehrsverlagerung, Erhöhung der Energieeffizienz und schließlich Substitution von fossilen Treibstoffen durch CO₂-neutrale Treibstoffe in Frage. Ferner empfehlen die Experten des IPCC, regional spezifische Dekarbonisierungspfade für den Verkehrssektor zu entwickeln, da sich die Rahmenbedingungen für die Dekarbonisierung des Verkehrssektors regional wie auch national stark unterscheiden (Sims et al., 2014, S. 603-605).

2.2 Energie- und Klimaziele der DACH+-Staaten

Um das Weltklima besser zu schützen, beschloss die UN-Klimakonferenz am 12. Dezember 2015 das sog. »Übereinkommen von Paris« als neues globales Klimaschutzabkommen in der Nachfolge des Kyoto-Protokolls. Das Abkommen wurde bislang von mehr als 180 Staaten ratifiziert, u. a. von allen DACH+-Staaten (Deutschland, Österreich, die Schweiz und Liechtenstein) sowie von der Europäischen Union. In dem Abkommen setzten sich die unterzeichnenden Staaten das Ziel, die globale Erwärmung auf deutlich unter zwei Grad Celsius im Vergleich zu vorindustriellen Werten zu begrenzen, die Fähigkeit zur Anpassung and den Klimawandel zu stärken und ausreichende Finanzmittel für Klimaschutz und Klimaanpassung zur Verfügung zu stellen. Beabsichtigt ist ferner, den Scheitelpunkt der globalen Treibhausgasemissionen so rasch wie möglich zu erreichen und in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts Treibhausgasneutralität zu erzielen (Übereinkommen von Paris, 2015; Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2019a).

Wie die Ziele erreicht werden sollen, definieren die Unterzeichnerstaaten mit sog. »Nationally Determined Contributions« (NDC) selbst, wobei alle fünf Jahre eine Bestandsaufnahme der tatsächlichen Zielerreichung stattfindet. Vom Jahr 2025 an müssen die NDC aktualisiert werden. Außerdem sieht der sog. »Aktionsmechanismus« vor, dass die Ziele der NDC alle fünf Jahre höher gesetzt werden müssen (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2019a).

Deutschland will bis zum Jahr 2050 die Treibhausgasemissionen um 80 bis 95 % gegenüber dem Stand von 1990 verringern und so weitgehend klimaneutral werden. Auf dem Weg dorthin ist eine Reduktion der Treibhausgase um 40 % bis zum Jahr 2020, um 55 % bis zum Jahr 2030 und um 70 % bis zum Jahr 2040 vorgesehen. Derzeit (2017) liegt die Einsparung bei 27,5 %, sodass davon auszugehen ist, dass das Einsparungsziel für 2020 nicht erreicht werden kann (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2019b, S. 19). Einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der deutschen Klimaschutzziele leistet der Ausbau der erneuerbaren Energien. Derzeit (2017) liegt ihr Anteil am Bruttoendenergieverbrauch bei 15,9 % und somit nur noch geringfügig unter dem Ausbauziel für 2020 (18 %). Bis zum Jahr 2050 soll ihr Anteil auf 60 % des Bruttoendenergieverbrauchs ansteigen. Beim Bruttostromverbrauch ist das Ausbauziel für 2020 (35 %) bereits erreicht, für das Jahr 2050 werden 80 % angestrebt. Außerdem werden verschiedene sektorale Energieeinsparungs- und Energieverbrauchsziele verfolgt, u. a. für Verkehr und für Gebäude (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2019b, S. 19). Während der Endenergieverbrauch der Gebäude rückläufig ist, nimmt der Endenergieverbrauch des Verkehrs weiterhin zu. So stieg im Jahr 2017 der Endenergieverbrauch um 2,4 Prozent gegenüber dem Vorjahr und um 6,5 Prozent gegenüber dem Jahr 2005 an. Daher rechnet die deutsche Bundesregierung damit, dass das 2020-Ziel für den Verkehr (10 Prozent) unter den bisherigen Rahmenbedingungen erst nach 2030 erreicht werden kann; es seien erhebliche Anstrengungen erforderlich, um eine Trendumkehr einzuleiten (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2019b, S. 8).

Österreichs Energie- und Klimaschutzziele sind in der Klima- und Energiestrategie der Bundesregierung »Mission 2030« beschrieben. Danach beabsichtigt Österreich, seine Treibhausgasemissionen bis zum

Jahr 2030 um 36 % gegenüber dem Stand von 2005 zu senken, wobei die Sektoren Verkehr und Gebäude als jene mit dem höchsten Reduktionspotenzial angesehen werden. Der Verkehr verursacht in Österreich 46 % der Gesamtemissionen und ist damit der Sektor mit dem größten Anteil an Treibhausgasemissionen. Auf der Energieerzeugungsseite ist geplant, dass die erneuerbaren Energien bis 2030 einen Anteil von 45 bis 50 % am Bruttoendenergieverbrauch erreichen. Im Hinblick auf Elektrizität wird eine bilanzielle Autarkie auf der Basis erneuerbarer Energie angestrebt; d. h., über das Jahr betrachtet soll genauso viel Strom aus erneuerbaren Quellen erzeugt werden wie im Land verbraucht wird (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus und Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2018, S. 13-14). Ferner hat das österreichische Parlament als Reaktion auf die »Fridays for Future«-Bewegung im Herbst 2019 den Klimanotstand ausgerufen und sich in diesem Zusammenhang dazu bekannt, noch vor Mitte des 21. Jahrhunderts Klimaneutralität erreichen zu wollen. Dieser Beschluss, der mit großer Mehrheit vom Nationalrat verabschiedet wurde, ist ambitionierter als die Klima- und Energiestrategie, aber rechtlich nicht bindend (Laufer, 2019).

Auch die **Schweiz** verschärfte 2019 ihre Klimaschutzziele. Während die NDC noch von einer Treibhausgasreduktion von 70 bis 85 % bis 2050 im Vergleich zum Stand von 1990 ausgehen, strebt der Bundesrat nun bis 2050 eine klimaneutrale Schweiz an. Mehrere Bundesämter arbeiten an einer gemeinsamen Klimastrategie (Bundesamt für Umwelt, 2019). Die Energiepolitik der Schweiz beruht derzeit auf der Energiestrategie 2050, die 2017 als »Energiegesetz« in einer Volksabstimmung angenommen wurde. Sie sieht einen Ausstieg aus der Kernenergie, den Ausbau der erneuerbaren Energien und die Steigerung der Energieeffizienz vor. Im Hinblick auf die Energieeffizienz definiert das Energiegesetz Richtwerte für den Energie- und Stromverbrauch in den Jahren 2020 und 2050. Für PKW gilt ab 2021 ein Flottenemissionsgrenzwert von 95 g CO₂/km. Darüber hinaus sind finanzielle Anreize für die energetische Sanierung von Gebäuden vorgesehen. Auch für den Ausbau der erneuerbaren Energien enthält das Gesetz Richtwerte für die Jahre 2020 und 2035. Um diese Ausbauziele zu erreichen, sieht das Gesetz eine Fortführung der Einspeisevergütung in veränderter Form sowie Investitionszuschüsse

für den Ausbau der Stromproduktion aus erneuerbaren Energien vor. Ferner sollen der Eigenverbrauch gefördert und raschere Bewilligungsverfahren erreicht werden. Zudem verbietet das Gesetz den Bau neuer Atomkraftwerke (Schweizerischer Bundesrat, 2017).

Liechtensteins Klimaschutzziele ergeben sich aus den NDC, die das Land im Rahmen des Pariser Übereinkommens zugesagt hat. Danach sollen die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2030 um 40 % im Vergleich zum Jahr 1990 sinken. Um die Klimaschutzziele in konkrete Maßnahmen zu übersetzen, ist eine Überarbeitung der Energiestrategie 2030 geplant (Amt für Umweltschutz, 2019).

Tabelle 1: Nationally Determined Contributions der EU, der Schweiz und Liechtensteins

EU (Latvian Presidency of the Council of the European Union, 2015)	Schweiz (Schweizerischer Bundesrat, 2015)	Liechtenstein (Regierung des Fürstentums Liechtenstein, 2015)
<ul style="list-style-type: none"> ▶ Die EU und ihre Mitgliedstaaten verpflichten sich, die Treibhausgasemissionen bis 2030 im Vergleich zu 1990 im Inland um mindestens 40 % zu senken. Dieses Ziel soll gemeinsam erreicht werden. 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Die Schweiz verpflichtet sich, ihre Treibhausgasemissionen bis 2030 gegenüber 1990 um 50 % zu senken, was einer durchschnittlichen Reduzierung der Treibhausgasemissionen um 35 % im Zeitraum 2021-2030 entspricht. 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Liechtenstein erwägt aufgrund seiner geringen Größe, auch Emissionsminderungen im Ausland zu finanzieren und diese auf die liechtensteinischen NDC anzurechnen. ▶ Der Hauptfokus wird jedoch auf der Reduzierung der inländischen Emissionen liegen. Liechtenstein strebt bis 2030 eine Reduzierung der Treibhausgase um 40 % gegenüber dem Stand von 1990 an.

Quelle: Eigene Darstellung.

Es lässt sich feststellen, dass alle DACH+-Staaten die Dringlichkeit des Klimaschutzes erkannt haben und an einer drastischen Reduzierung der Treibhausgasemissionen arbeiten. Es zeichnet sich ein Konsens

darüber ab, dass Klimaneutralität bis spätestens 2050 erreicht werden muss. Hierfür ist es erforderlich, die Energieeffizienz von Gebäuden, Verkehr und Industrie deutlich zu steigern und fossile Brenn- und Treibstoffe nahezu vollständig durch erneuerbare Energieträger zu ersetzen, deren Nutzung massiv ausgebaut werden muss. Es steht allerdings auch außer Zweifel, dass es großer Anstrengungen bedarf, um Klimaneutralität bis 2050 zu erreichen. Besonders deutlich zeigt sich das in Deutschland, das sich zwar die ambitioniertesten Klimaschutzziele der DACH+-Staaten gesetzt hat, aber seine Zwischenziele für 2020 teilweise verfehlen wird. Die nationalen Regierungen werden die Klimaschutzziele nicht im Alleingang erreichen können, sondern müssen mit ihren Regionen und Städten, aber auch mit Wirtschaft, Forschung und zivilgesellschaftlichen Akteuren zusammenarbeiten.

2.3 Zero-Carbon Mobility

Seit etwa fünfzehn Jahren gibt es eine intensive Diskussion in Wissenschaft, Politik und Praxis darüber, wie die Verkehrssysteme im Sinne des Klimaschutzes umgebaut werden können. Es sind mittlerweile viele Studien zu diesem Thema veröffentlicht worden, sodass an dieser Stelle nur ein Überblick über einige ausgewählte Veröffentlichungen gegeben werden kann. Wie die folgende Literaturanalyse zeigt, favorisieren die meisten Studien eine Steigerung der Energieeffizienz im Verkehr und die Förderung der Elektromobilität.

Die vom amerikanischen Urban Land Institute herausgegebene Studie *Moving Cooler* (Cambridge Systematics & Moving Cooler Steering Committee, 2009) untersuchte den Effekt verschiedener verkehrspolitischer Strategien und Maßnahmen auf die Treibhausgasemissionen des Verkehrs in den USA bis zum Jahr 2050. Gegenstand der Untersuchung waren die Handlungsfelder Fahrzeugtechnologie (Verbesserung der Energieeffizienz der Fahrzeuge durch technische Innovationen), Treibstoffe (Minderung des CO₂-Ausstoßes durch die Verwendung alternativer Antriebe), Verkehrsverhalten (Verringerung der zurückgelegten Distanzen, veränderter Modalsplit) und Verkehrsmanagement (Verkehrslenkung und Bepreisung). Die verschiedenen Strategien wurden zunächst einzeln evaluiert und anschließend zu Strategiebündeln zusammengefasst, um auch kumulative Effekte abzubilden.

Anschließen wurde die Wirksamkeit der Strategiebündel unter verschiedenen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen (Ölpreis, Carbon Pricing) getestet. Bewertet wurden dabei der Rückgang der Treibhausgasemissionen, die Kosten der Umsetzung, die Auswirkungen auf die Kosten für Fahrzeugbetrieb und unterhalt sowie die Verteilung der zu erwartenden Kosten auf verschiedene Einkommensgruppen. Die Studie kam zu dem Ergebnis, dass mit einer integrierten Strategie, die Maßnahmen in allen Handlungsfeldern ansetzt, eine um 24 % stärkere Reduktion der Treibhausgasemissionen als im Trend- bzw. Referenzszenario erzielt werden kann. Unterstellt wurden dabei weitreichende Veränderungen in der Infrastrukturpolitik, der Siedlungsentwicklung, dem Verkehrsverhalten und den technischen Richtlinien für Fahrzeuge und Infrastrukturen. Eine interessante Erkenntnis der Studie war, dass die Kosten, die der öffentlichen Hand für die Implementierung der integrierten Klimaschutzstrategie entstehen, geringer sind als die Summe der individuellen Einsparungen bei den Verkehrsteilnehmern durch die Verwendung effizienterer Fahrzeuge und Verkehrsmittel. Die Studie berücksichtigte nur im Jahr der Veröffentlichung verfügbare und bereits im größeren Umfang eingesetzte Technologie. Erneuerbare Mobilität (d. h. Fahrzeuge, die mit erneuerbarem Strom oder Biofuels angetrieben werden) wurde in der Studie nicht berücksichtigt (Cambridge Systematics & Moving Cooler Steering Committee, 2009).

Das US-amerikanische National Research Council beschäftigte sich in einer Szenario-Analyse mit der Frage, ob und in welchem Ausmaß eine kompaktere Siedlungsentwicklung zur Minderung des Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen aus dem Verkehr beitragen kann. Betrachtet wurde dabei die bauliche Entwicklung der Ballungsräume (*metropolitan areas*) in den USA bis zum Jahr 2050. Auf der Grundlage einer umfangreichen Literaturrecherche und von Fallstudien kommt das Autorenteam zum Ergebnis, dass eine Verdoppelung der Siedlungsdichte zu einer Abnahme der durchschnittlichen Wegelängen um 5-12 % führt. Werden gleichzeitig der Öffentliche Nahverkehr ausgebaut und der Langsamverkehr (also Fußgänger- und Fahrradverkehr) gefördert, verkürzt sich die durchschnittliche Wegelänge sogar um bis zu 25 %. Gelänge es bis zum Jahr 2025, 75 % des Neubauvolumens mit einer doppelt so hohen baulichen Dichte zu realisieren wie bisher, dann

lägen der Treibstoffbedarf und der CO₂-Ausstoß um 8-11 % niedriger als im Referenzfall. Sollte sich die bauliche Dichte nur bei einem Viertel des Neubauvolumens verdoppeln, würden Treibstoffverbrauch und CO₂-Ausstoß nur um etwa 1 % zurück gehen. Fragen erneuerbarer Mobilität spielten auch bei dieser Untersuchung keine Rolle (National Research Council [U.S.], 2009).

Viele frühe Studien gingen von Technologien aus, die bereits in großem Umfang eingesetzt wurden, und untersuchten, wie deren Effizienz gesteigert werden kann. Gegenstand der Untersuchung sind in der Regel sowohl technologische Verbesserungen an den Fahrzeugen (sparsamere Motoren etc.) als auch Effizienzsteigerungen bei der Verkehrsabwicklung, z. B. durch Verkehrslenkung durch Telematik oder Tempolimits) (u. a. Cambridge Systematics & Moving Cooler Steering Committee, 2009). Neben technologischen Aspekten ging es in einigen Studien auch um die Veränderung des Verkehrsverhaltens, d. h. um die Frage, in welchem Maße die Verlagerung der Verkehrsnachfrage von energieintensiven auf energiesparende Verkehrsmittel sowie die Verkehrsvermeidung durch die Planung verkehrsarmer Siedlungsstrukturen zum Klimaschutz beitragen können (z. B. Newman & Kenworthy, 1999; National Research Council [U.S.], 2009).

Der weitaus größte Teil der frühen Studien ging davon aus, dass sich fossile Treibstoffe innerhalb der nächsten beiden, für den Klimaschutz entscheidenden Jahrzehnten nur sehr begrenzt substituieren lassen. Seit etwa dem Jahr 2010 wird der Beitrag von erneuerbaren Energien zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors vertiefend betrachtet. Eine wichtige Rolle nehmen die in regelmäßigen Abständen aktualisierten Shell-PKW-Szenarien zu der Entwicklung des PKW-Bestands und deren Folgen für den zukünftigen Kraftstoffverbrauch und die daraus resultierenden CO₂-Emissionen ein. Die aktuelle Fassung der PKW-Studie (Shell Deutschland Oil GmbH, 2014) untersucht zwei Szenarien zu Entwicklung des PKW-Bestandes in Deutschland bis zum Jahr 2040: ein Trendszenario, das auf PKW-Trends der letzten Jahre beruht und von den verstärkten Einsatz von Biokraftstoffen unterstellt, sowie ein hinsichtlich Energiepolitik und Klimaschutz sehr ambitioniertes Szenario, das von deutlich stärkeren und schnelleren Veränderungen im PKW-Bereich ausgeht.

Ein weiterer Meilenstein war das großangelegte deutsche Forschungsprojekt *Renewability* von Öko-Institut und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), in welchem Maßnahmen und Wirkungen zukünftiger Verkehrspolitik in Deutschland bis zum Jahr 2030 untersucht wurden, und zwar insbesondere im Hinblick auf Treibstoffverbräuche und Treibhausgasemissionen. Das Projekt nutzte dabei das Konzept der Stoffstromanalyse, um ökonomische und ökologische Folgen unterschiedlicher Szenarien abzubilden. Die Forscher kamen zu dem Ergebnis, dass bis zum Jahr 2030 ein Viertel der Treibhausgasemissionen des Verkehrs eingespart werden könnten. Einen wesentlichen Beitrag dazu leistet die Umstellung der Antriebsenergie auf erneuerbare Quellen. Unterstellt wurden sowohl eine steigende Bedeutung von Biokraftstoffen als auch die Einführung von Elektrofahrzeugen. Es wurde davon ausgegangen, dass bis zum Jahr 2030 10 % aller Fahrzeuge elektrisch angetrieben werden. Der Anteil der erneuerbaren Energien wird nach dieser Studie von 4 % auf 16 % steigen. Weitere wichtige Beiträge leisten u. a. effizientere Fahrzeuge, eine deutliche Ausweitung des Öffentlichen Verkehrsangebots sowie verschiedene Maßnahmen für den LKW-Verkehr (u. a. Berechnung der Kfz-Steuer für LKW nach dem CO₂-Ausstoß, Erhöhung der LKW-Maut, verbesserte Logistik) (Mehlin & Zimmer, 2010; Öko-Institut e.V. & DLR-Institut für Verkehrsforschung, 2009b; Öko-Institut e.V. & DLR-Institut für Verkehrsforschung, 2009a). Die *Renewability*-Studie wurde anschließend fortgeschrieben. In den nachfolgenden Studien *Renewability II* und *Renewability III* wurde u. a. untersucht, in welchem Umfang Maßnahmen der Verkehrsvermeidung den CO₂-Ausstoß senken könnten und welchen Beitrag alternative Antriebsarten und erneuerbare Energien zur CO₂-Einsparung leisten können.

Erst in den letzten Jahren wurden einige Studien veröffentlicht, die eine vollständige Dekarbonisierung des Verkehrssystems als möglich erachten. Einen Überblick gibt der von der European Federation for Transport and Environment herausgegebene Synthesericht *How to decarbonize European Transport by 2050* (European Federation for Transport and Environment, 2018). Er basiert auf verschiedenen Studien der Organisation zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors. Der Fokus liegt dabei auf der Umstellung der Fahrzeugflotten auf alternative Antriebe

und den hierfür erforderlichen Infrastrukturen und Technologien. Nach dieser Studie ist unter günstigen Rahmenbedingungen eine Dekarbonisierung der LKW- und Busflotten bis zum Jahr 2050 erreichbar. Bei PKW wird von einer längeren Übergangsfrist ausgegangen. Um die Ziele des Pariser Übereinkommens zum Klimaschutz zu erreichen, müssten spätestens ab dem Jahr 2030 Maßnahmen ergriffen werden, um die Erneuerung der Fahrzeugbestände zu beschleunigen.

2.4 Regionale Energieautonomie – ein Konzept für ein zukünftiges Energiesystem

Wie in Kapitel 2.1 dargelegt, kommt dem Ausbau der erneuerbaren Energieerzeugung eine zentrale Bedeutung bei der klimafreundlichen Umgestaltung des Energiesystems zu.

Ein Energiesystem, das sich aus dezentralen, erneuerbaren Quellen speist (im Folgenden erneuerbares Energiesystem genannt), unterscheidet sich grundlegend von einem Energiesystem, das auf den fossilen Energieträgern wie Kohle, Erdöl und Erdgas (im Folgenden als fossiles Energiesystem bezeichnet) beruht. Erneuerbare Energie wird dezentral in einer Vielzahl von Anlagen gewonnen, die regionalen Energieerzeugern, Bürgergenossenschaften und Prosumern (also von Personen und Unternehmen, die sowohl Energie verbrauchen als sie auch mit eigenen Anlagen erzeugen) gehören. Auch gibt es eine große Bandbreite von Technologien, die je entsprechend den lokalen Potenzialen und den erzielbaren Preisen zum Einsatz kommen, beispielsweise können für die Erzeugung Strom Photovoltaik, Wind- und Wasserkraft sowie Biogas-Blockheizkraftwerke und tiefengeothermische Anlagen eingesetzt werden. Für die Wärmeversorgung kommen Wärmepumpen, solarthermische Systeme, oberflächennahe und tiefengeothermische Systeme ebenso in Frage wie die Verwendung von Biogas und Biomasse in Heizkesseln oder in der Kraft-Wärme-Kopplung. Fahrzeuge werden im erneuerbaren Energiesystem überwiegend elektrisch angetrieben. Für spezielle Einsatzzwecke kommen auch Biotreibstoffe, künstlich erzeugtes Erdgas und Wasserstoff in Frage.

In einem fossilen Energiesystem beruht die Stromversorgung auf zentralisierten Großkraftwerken, die (in der Regel importierte) fossile

Brennstoffe wie Kohle, Erdöl und Erdgas in Elektrizität umwandeln, die anschließend über Hoch-, Mittel- und Niederspannungsnetze an die Verbraucher geliefert wird. Auch die Wärmeversorgung basiert im fossilen Energiesystem auf (oft importierten) fossilen Energieträgern. Sie werden entweder in Heizkraftwerken in Wärme umgewandelt (z. T. als Nebenprodukt der Stromerzeugung), die anschließend über Wärmenetze an die Verbraucher geleitet wird, oder direkt an die Verbraucher geliefert und dort in Heizkesseln in Wärme umgewandelt. Fahrzeuge werden im fossilen Energiesystem von Verbrennungsmotoren angetrieben, die Benzin, Diesel oder Autogas verbrauchen.

Das erneuerbare und das fossile Energiesystem unterscheiden sich auch im Hinblick auf die Beeinflussbarkeit von Erzeugung und Verbrauch. Im fossilen Energiesystem folgt die Erzeugung der Nachfrage. Ständig laufende Großkraftwerke stellen die Grundlast zur Verfügung. Nachfragespitzen sind in der Regel vorhersehbar und können durch das Zuschalten von Spitzenlastkraftwerken gedeckt werden. Im erneuerbaren Energiesystem ist das Lastmanagement wesentlich komplexer, da der Ertrag von photovoltaischen und solarthermischen Systemen und von Windkraftanlagen vom Wetter beeinflusst wird und dementsprechend variiert. Um in einem erneuerbaren Energiesystem Angebot und Nachfrage in Übereinstimmung zu bringen, sind daher Demand-Side-Management-Systeme und Energiespeicher erforderlich.

Schließlich ist der Raumbedarf ein wesentlicher Unterschied zwischen einem erneuerbaren und einem fossilen Energiesystem. Im fossilen Energiesystem ist er geringer und auf wenige Standorte für Raffinerien, Großkraftwerke, Übertragungsleitungen und Umspannstationen beschränkt. Die Erzeugung erneuerbarer Energie hat dagegen einen hohen Flächenbedarf, etwa für Solaranlagen, Windparks oder die landwirtschaftliche Erzeugung von Biomasse. Um Nutzungskonflikte zu vermeiden und die Akzeptanz erneuerbarer Energie sicherzustellen, muss der Ausbau der erneuerbaren Energien auf der Ebene von Region, Gemeinde und Quartier geplant und mit anderen sektoralen und integralen Planungen abgestimmt werden.

Durch die Dezentralisierung des Energiesystems wird die Rolle der Regionen, Städte und Gemeinden in der Klima- und Energiepolitik stark aufgewertet. Im fossilen Energiesystem fallen energiepolitische

Entscheidungen in erster Linie zentral, also auf der Ebene des Nationalstaats und auf der europäischen Ebene. Dagegen werden im erneuerbaren Energiesystem die Regionen, Städte und Gemeinden zu mächtigen Akteuren, die eigenständig Entscheidungen zu Energieeffizienzpfaden und Ausbaustrategien für erneuerbare Energie treffen und gemeinsam mit regionalen und lokalen Akteuren umsetzen können.

Vieles deutet also darauf hin, dass die Energiewende die Topologie des Energiesystems grundlegend verändern wird. Da viele Einflussfaktoren wie Technologien, Energiepreise, rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen einem stetigen Wandel unterliegen, lässt sich noch nicht mit Sicherheit bestimmen, wie das Energiesystem der Zukunft gestaltet sein wird. Das deutsche Umweltbundesamt entwickelte drei archetypische, explorative Szenarien, die am Beispiel der Stromversorgung ein zu 100 % auf erneuerbaren Energien beruhendes Energiesystem für Deutschland beschreiben (Klaus et al. 2010, S. 62):

- ▶ In einem Szenario »Regionenverbund« nutzen alle deutschen Regionen ihre Potenziale für die Erzeugung erneuerbarer Energien weitgehend aus. Die Regionen sind vernetzt und tauschen Strom untereinander aus. Der Import von Strom aus den Nachbarländern wird stark reduziert und spielt nur noch eine untergeordnete Rolle.
- ▶ Im Szenario »International-Großtechnik« wird ebenfalls eine zu 100 % auf erneuerbarer Energie beruhende Stromversorgung erreicht. Diese basiert allerdings nicht auf regionalen Quellen, sondern auf großtechnisch leicht erschließbaren Potenzialen in ganz Europa und angrenzenden Regionen, z. B. den nordafrikanischen Wüstenregionen. Die Erschließung dieser Potenziale erfordert den Aufbau eines leistungsfähigen transkontinentalen Übertragungsnetzes.
- ▶ Das Szenario »Lokal-Autark« basiert auf lokalen Inselnetzen mit großen Stromspeichern. Die lokalen Potenziale für die Erzeugung erneuerbarer Energie werden weitgehend ausgeschöpft, ebenso wie die Energieeffizienzpotenziale. Auf den Import von Strom wird verzichtet.

Diese Szenarien zeigen die gewachsene Bedeutung der Regionen für die Energieversorgung. Selbst eine vollständige regionale Energieautarkie erscheint als ein plausibles Zukunftsszenario.

Doch ist der Begriff der Energieautarkie zunächst zu bestimmen. In der griechischen Antike wurde als Autarkie die Unabhängigkeit einer Polis von fremden Mächten bezeichnet. Als Voraussetzungen für die Unabhängigkeit wurden die Selbstbeschränkung auf die in der jeweiligen Polis vorhandenen Ressourcen und deren bestmögliche Nutzung angesehen (Warnach 1971, zitiert nach Deutschle et al. 2015, S. 154).

Regionale Energieautarkie kann heute nach Müller et al. (2011) folgendermaßen definiert werden: *»We define a region to be energy autarkic when it relies on its own energy resources for generating the useful energy required to sustain the society within that region«* (Müller et al. 2011, S. 5801).

Eine wesentliche Voraussetzung für die Entwicklung eines Energieautarkiekonzepts ist die Definition der Grenze des zu bilanzierenden Systems. Diese Grenze stimmt in räumlicher Hinsicht in Konzepten für energieautonome Regionen in der Regel mit Verwaltungsgrenzen überein, wobei auch andere Möglichkeiten für die Abgrenzung von Regionen bestehen (Müller et al. 2011, S. 5802).

Es können zwei verschiedene Formen der Energieautarkie unterschieden werden: die lastgerechte und die bilanzielle Autarkie:

»Bei der lastgerechten Autarkie wird zu keinem Zeitpunkt Energie in das als autark bezeichnete System eingeführt. Denn wer autark ist, verzichtet auf diese Interaktion mit der Umwelt und begnügt sich mit dem, was er innerhalb seiner Systemgrenzen vorfindet. Autarkie zieht eine Grenze zwischen innen und außen. Diese Systemgrenze ist nicht naturgegeben, sie ist eine Sache der Setzung bzw. Definition. Eine Ausfuhr der Energie über die Systemgrenzen hinaus wird jedoch zugelassen« (Deutschle et al. 2015, S. 155).

»Die weniger anspruchsvolle zweite Autarkieform ist die bilanzielle Autarkie. Dabei ist ein Energieaustausch zwischen System und Umwelt erlaubt, sofern die Bilanz über einen definierten Betrachtungszeitraum (i.d.R. zwölf Monate) nicht negativ ausfällt« (Deutschle et al. 2015, S. 155).

Es gibt in der Literatur unterschiedliche Auffassungen dazu, aus welchen Komponenten sich eine autarke Energieversorgung auf regionaler Ebene zusammensetzt. Regionale Energieautonomiekonzepte inkludieren in der Regel die Versorgung mit Wärme und/oder Strom.

Der Energieverbrauch des Mobilitätssektors wird in der Regel nicht betrachtet (Deutschle et al. 2015, S. 159).

Eng verwandt mit dem Begriff der Energieautarkie ist der Begriff der Energieautonomie. In der Philosophie bezeichnet Autonomie die Möglichkeit des ideellen Handelns. Sie ist mithin dann gegeben, wenn ohne Einschränkung gemäß der eigenen Intention gehandelt werden kann (Deutschle et al. 2015, S. 154).

Der Begriff der Energieautonomie wurde maßgeblich vom SPD-Politiker Herrmann Scheer geprägt, der im Jahr 2005 ein so betitelt Buch veröffentlichte. Darin beschreibt er die vielfältigen Barrieren, die einer umfassenden Energiewende entgegenstehen. Er beleuchtet aber auch Initiativen, mit denen der Wechsel zu erneuerbaren Energien gelingen kann. Dabei geht er von einem Energiesystem aus, dass zu 100 % auf erneuerbaren Energien beruht und in dem die regionale Erzeugung und Verteilung erneuerbarer Energien eine entscheidende Rolle spielt (Scheer 2005).

»Der Leitbegriff der Energieautonomie bedeutet, dass eine selbst- statt fremdbestimmte Verfügbarkeit über Energie das Ziel sein muss – frei und unabhängig von äußeren Zwängen, Erpressungs- und Interventionsmöglichkeiten, nach eigenen Entscheidungskriterien. Dies alles ist auf Dauer nur mit erneuerbaren Energien möglich. Die autonome Aneignung erneuerbarer Energien durch eine Vielzahl von Akteuren ist die einzige erfolgversprechende Methode, den Energiewechsel rechtzeitig und unumkehrbar gegen die Funktionslogik des überkommenen Energiesystems durchzusetzen. Dieser Weg zum Durchbruch erneuerbarer Energien führt zu einer durchgängig neuen Struktur der Energienutzung, die nur neben der gegenwärtigen entstehen kann – und diese Zug um Zug ersetzt und schließlich überflüssig macht. Energieautonomie ist nicht dogmatisch verengt zu verstehen, sondern beschreibt vielfältige und vielschichtige Konzepte, viele individuelle und gesellschaftliche, politische und wirtschaftliche, lokale und staatliche. Es geht darum, einen Prozess der stetigen Erhöhung des Autonomiegrades in der Verfügung über Energie in Gang zu setzen, der von partieller bis zu vollständiger Autonomie führt, je nach den jeweiligen Möglichkeiten und Bedürfnissen« (Scheer, 2005, S. 257).

Dieser Argumentationslinie folgt auch der einige Jahre später herausgegebene Sammelband 100 % Renewable – Energy Autonomy in Action (Droege 2009). Er enthält Beiträge von Autoren aus einer großen Bandbreite an Disziplinen zur Energiewende auf lokaler und regionaler Ebene und zu den Voraussetzungen einer vollständigen Umstellung des Energiesystems auf regional erzeugte erneuerbare Energie.

Die Universität Liechtenstein führte in den Jahren 2009 bis 2013 gemeinsam mit anderen Hochschulen aus der Bodenseeregion das Forschungsprojekt »BAER – Bodensee-Alpenrhein Energieregion« durch, an dem der Autor dieser Arbeit beteiligt war (BAER – Bodensee-Alpenrhein Energieregion, 2016). In diesem Forschungsprojekt wurde Energieautonomie als »gezielte und methodische Verfolgung völliger lokaler und regionaler Unabhängigkeit von allen nichterneuerbaren Energiequellen« definiert; »[d]ies mag rein lokale Maßnahmen beinhalten, kann aber auch regionale, Länder- oder nationale Förderkonzepte in Anspruch nehmen oder sich darauf stützen« (Radzi, 2009, S. 39). Diese Definition umfasst neben der bilanziellen Autarkie (»völlige lokale und regionale Unabhängigkeit von allen nichterneuerbaren Energiequellen«) auch den Aspekt des selbstbestimmten Handelns der lokalen und regionalen Akteure, also die Energieautonomie. Dies spiegelt sich auch in den Zielen des Forschungsprojekts wider: »Im Rahmen des Projekts sollen die technologischen, organisatorischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten der Bodenseeregion untersucht werden, sich selbst mit erneuerbaren Energien (EE) zu versorgen. Dies beinhaltet die Ermittlung der sozialen, wirtschaftlichen und ökologischen Potenziale, der Nutzen und Kosten sowie die Darstellung von neuen wirtschaftlichen, technologischen und institutionellen Entwicklungsmöglichkeiten« (BAER – Bodensee-Alpenrhein Energieregion, 2016).

Dieser Arbeit steht in der Traditionslinie des Forschungsprojekts BAER, baut auf einigen Ergebnissen des Projekts auf und entwickelt diese weiter. Dementsprechend lehnt sich die Arbeit auch definitorisch an das Projekt an.

In dieser Arbeit wird, in Anlehnung an die BAER-Definition, unter regionaler Energieautonomie die technische, organisatorische und institutionelle Kapazität einer Region verstanden, sich bis zum Jahr 2050 vollständig mit erneuerbaren Energien selbst zu versorgen.

Im Mittelpunkt steht also die bilanzielle Energieautarkie. Darüber hinaus werden, im Sinne des Energieautonomieansatzes, auch die organisatorischen und institutionellen Voraussetzungen für die regionale Selbstversorgung bis zum Jahr 2050 diskutiert.

2.5 Energieautonome Regionen

Viele Städte und Gemeinden halten Energieautarkie und Energieautonomie für den Ausweg aus der Klima- und Energiekrise. Sie wollen sich aus der Abhängigkeit von den klimaschädlichen und zur Neige gehenden fossilen Energieträgern befreien und den Energiebedarf vollständig aus eigenen erneuerbaren und daher CO₂-neutralen Quellen decken. Es gibt ein ganzes Netz energieautonomer Kommunen und Regionen, das sich von den pazifischen Inseln über die kanarische Insel El Hierro, Samsø in Dänemark, das schwedische Jämtland, Navarra in Nordspanien, Varese Ligure in Italien bis zur chinesischen Provinz Shaanxi erstreckt (Radzi, 2009).

In Deutschland hat es sich das »Kompetenznetzwerk Dezentrale Energietechnologien e.V.« (deENet), zur Aufgabe gemacht, die Aktivitäten der 100 %-Erneuerbare-Energie-Regionen zu dokumentieren und (International Energy Agency, 2009b) zu erforschen. Nach Erhebungen von deENet gab es 2010, also in der Laufzeit des Forschungsprojekts BAER, in Deutschland 72 100 %-Erneuerbare-Energie-Regionen und eine noch größere Anzahl sogenannter Starterregionen (Benz & Moser, 2010, S. 4). Bei einer Befragung (n = 82; Rücklaufquote 66 %) gaben 39 Regionen und Kommunen an, die Elektrizitätsversorgung auf erneuerbare Energie umstellen zu wollen, 20 Regionen und Kommunen hatten Ziele für die Wärmeversorgung aufgestellt. Für den Bereich Mobilität traf dies lediglich auf zehn Regionen zu. Sieben der elf Regionen und Kommunen strebten eine hundertprozentige Deckung des Verkehrsenergiebedarfs aus erneuerbaren Quellen an, wobei der Zeithorizont für die angestrebte Umsetzung in dem meisten Fällen zwischen den Jahren 2030 und 2050 lagen. Lediglich zwei Regionen wollten diese Ziele früher erreichen, und zwar 2015 beziehungsweise 2020. Zwei der elf Regionen verfolgten das Ziel, 30 % des Verkehrsenergiebedarfs bis zum Jahr 2020 durch erneuerbare Energie abzudecken (DEENET, 2009). Auch in Österreich streben verschiedene Gemeinden und Regionen Energieautonomie an.

Tabelle 2: 100%-Erneuerbare-Energie-Regionen mit Mobilitätszielen

Regionsname	Zielkonzept	Beschluss	Beschluss gefasst	Zielkonzept umsetzen bis	Mobilitätsziel in %
Barnim	ja	ja	Apr 08	2011	100
Fürstfeldbruck	ja	ja	2000	2030	100
Hameln-Pyrmont	ja	ja	Mrz 08	–	100
Hersfeld-Rotenburg	nein	ja	Dez 07	–	100
Lüchow Dannenberg	ja	ja	1997	2015	100
München LK	nein	ja	Mrz 06	–	100
Starnberg	nein	ja	Dez 05	–	100
Altötting LK	ja	ja	–	ab 2020	30
Amberg-Sulzbach	ja	ja	2007	2020	30
Weilerbach	ja	nein	–	2012	0,1
Emden	ja	ja	1991	2010	0
Pellworm	ja	ja	1995	–	0

Quelle: DEENET, 2009.

Ein bekanntes Beispiel ist das Bundesland Vorarlberg. Es verfolgt ein umfassendes Konzept zur Energieautonomie mit einem Zeithorizont bis 2050, das auch die Mobilität umfasst (Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2005).

In der Schweiz bekennen sich einige Regionen zum Ziel der Energieautonomie. Sehr aktiv ist das Goms im Kanton Wallis, das sich selbst »erste Energieregion der Schweiz« nennt. Das Goms will bis zum Jahr 2030 energieautonom werden (unternehmen GOMS, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, & Ernst Basler + Partner AG, 2007). Diese Zielsetzung umfasst Strom, Wärme und Mobilität (Ernst Basler und Partner AG, 2009). Das »Energietal Toggenburg« im Kanton St. Gallen

verfolgt eine doppelte Zielsetzung, indem es in den nächsten 25 Jahren Energieautonomie und bis zum Jahr 2050 die Ziele der 2.000-Watt-Gesellschaft erreichen will (Energietal Toggenburg, 2010).

2.6 Bewertung des Forschungsstandes und Forschungsfragen

Deutschland, Österreich, die Schweiz und Liechtenstein haben erkannt, dass der Schutz des Klimas weitreichende Schritte erfordert. Folgerichtig haben sie im Pariser Übereinkommen eine drastische Reduzierung der von ihnen verursachten Treibhausgasemissionen zugesagt und streben langfristig CO₂-Neutralität an.

Von großer Bedeutung für die Erreichung der Klimaziele ist die Dekarbonisierung des Energie- und des Verkehrssektors. Im Energiesektor kommt dabei dem Ausbau der erneuerbaren Energien entscheidende Bedeutung zu. Diesbezüglich wurden in den letzten Jahren erhebliche Anstrengungen unternommen und einige Erfolge erzielt. Für den Verkehrssektor liegt der Fokus dagegen darauf, den Energiebedarf zu verringern und den verbleibenden Energiebedarf mit CO₂-neutralen Energieträgern zu decken. Da Energieeffizienzsteigerungen durch das wachsende Verkehrsaufkommen konsumiert worden sind und alternative Antriebsarten nach wie vor ein Nischendasein führen, befindet sich der Verkehrssektor noch nicht auf einem klimafreundlichen Entwicklungspfad.

Dies wiegt umso schwerer, als auch Kommunen und Regionen den Verkehrssektor in ihren klimarelevanten Plänen kaum berücksichtigen, obwohl sie eine sehr wichtige Rolle beim Klimaschutz spielen, da erneuerbare Energie größtenteils dezentral gewonnen wird. Zwar haben sich zahlreiche Regionen und Kommunen in den DACH+-Staaten sich das Ziel gesetzt, energieautonom zu werden, d.h., ihre technische, organisatorische und institutionelle Kapazität so zu nutzen, dass sie sich selbst vollständig mit erneuerbarer Energie versorgen. Doch zeigte die oben zitierte deENet-Befragung, dass energieautonome Regionen vor allem an der Dekarbonisierung der Strom- und Wärmeversorgung arbeiten. Nur eine kleine Minderheit der 2010 befragten Regionen und Kommunen verfolgte operationalisierte Ziele im Verkehrsbereich.

Auch die neuere Literatur (McKenna et al., 2014; Deutschle et al., 2015) bestätigt, dass der Mobilitätsbereich nur sehr selten in Untersuchungen und Konzepten zu regionaler Energieautonomie berücksichtigt wird. Somit stellt sich die Frage, warum die Mobilität in den Energieautonomiekonzepten der Regionen, Städte und Gemeinden in den DACH+-Staaten eine so geringe Rolle spielt. Es liegen keine Veröffentlichungen vor, die sich mit diesem Problem beschäftigen. Es können aber folgende Arbeitshypothesen aufgestellt werden:

Hypothese 1: Das Ziel der regionalen Energieautonomie kann bilanziell nur dann erreicht werden, wenn der Mobilitätsbereich daraus ausgeschlossen wird.

Hypothese 2: Die Ungewissheit darüber, welche politischen, wirtschaftlichen, soziokulturellen und technologischen Voraussetzungen erfüllt sein müssen, damit der Endenergiebedarf des Verkehrs bis zum Jahr 2050 vollständig mit erneuerbaren Energieträgern aus regionaler Erzeugung gedeckt werden kann, hält Kommunen und Regionen von der Ausdehnung der Energieautonomie auf den Mobilitätssektor ab.

Um den Verkehrsenergiebedarf einer Region vollständig mit erneuerbarer Energie decken zu können, bedarfs es nicht nur eines ausreichend großen Potenzials für die Erzeugung erneuerbarer Energie, sondern auch einer umfassenden Transformation des Verkehrssystems. Beispielsweise müssten alle Fahrzeuge, die mit fossilen Treibstoffen betrieben werden, durch solche ersetzt werden, die mit regional erzeugtem grünem Strom oder anderen erneuerbaren Treibstoffen angetrieben werden.

Derzeit bewegen sich die Zulassungszahlen für Elektrofahrzeuge auf niedrigem Niveau, da die Technologie nach wie vor relativ teuer ist und daher auf Akzeptanzprobleme stößt. Kurzfristig wäre die vollständige Dekarbonisierung eines regionalen Verkehrssystems daher nicht durchsetzbar.

Zu diskutieren wäre aber, ob mittel- bis langfristig politische, wirtschaftliche, soziokulturelle und nicht zuletzt technologische Voraussetzungen dafür geschaffen werden können, regionale Verkehrssysteme

vollständig zu dekarbonisieren. Wenn hierzu Klarheit geschaffen werden kann, würden es wahrscheinlich mehr Regionen wagen, sich Energieautonomieziele auch für den Verkehrsbereich zu setzen.

Hypothese 3: Unsicherheit im Hinblick auf Gestaltungsmöglichkeiten und Umsetzungsinstrumente hält Regionen und Kommunen von der Ausdehnung der Energieautonomie auf den Mobilitätssektor ab.

Im Mobilitätsbereich haben Regionen und Kommunen nur einen begrenzten, da gesetzlich definierten Handlungsspielraum. Zahlreiche Aspekte energieautonomer Mobilität, wie die oben angesprochene Umstellung der Fahrzeuge auf alternative Antriebe, lassen sich von einer Region nicht unmittelbar beeinflussen. Daher ist zu vermuten, dass viele Regionen die Mobilität in ihren Zielen und Konzepten zu Energieautonomie nicht berücksichtigen, weil sie sich nicht sicher sind, energieautonome Mobilität mit den ihnen zur Verfügung stehenden Gestaltungsmöglichkeiten und Instrumenten umsetzen zu können.

Dementsprechend soll die Arbeit folgende Forschungsfragen beantworten:

Forschungsfrage 1: Welche Maßnahmen sind erforderlich, um das Verkehrssystem einer Region bis zum Jahr 2050 vollständig zu dekarbonisieren?

Forschungsfrage 2: Unter welchen Voraussetzungen ist es möglich, den Endenergiebedarf des Verkehrs bis zum Jahr 2050 vollständig mit erneuerbaren Energieträgern aus regionaler Erzeugung zu decken?

Forschungsfrage 3: Welche Möglichkeiten haben Regionen, die Dekarbonisierung des Verkehrssystems zu gestalten?

Die Untersuchung erfolgt am Beispiel der Bodenseeregion, die bereits Gegenstand des Forschungsprojekts »BAER – Bodensee-Alpenrhein Energieregion« war. Die Ergebnisse sollen jedoch auch auf ähnlich strukturierte Regionen in den DACH+-Staaten übertragbar sein.

3 Methoden

Das folgende Kapitel erläutert den methodischen Ansatz der Szenarioanalyse, der in dieser Arbeit verwendet wird, und stellt die Modelle dar, die zu Berechnungszwecken in die Szenarioanalyse einbezogen werden.

3.1 Szenarioanalyse

Um die Forschungsfragen zu beantworten, müssen mehrere in sich plausible Entwicklungspfade von Regionen für den Zeitraum bis zum Jahr 2050 entwickelt, bewertet und miteinander verglichen werden. Hierfür sind also Methoden erforderlich, die aus dem Bereich der Zukunftsforschung (engl. *Future Studies*) stammen. Als Zukunftsforschung wird die »wissenschaftliche Befassung mit möglichen, wünschbaren und wahrscheinlichen Zukunftsentwicklungen und Gestaltungsoptionen sowie deren Voraussetzung in Vergangenheit und Gegenwart« (Kreibich, 2006, S. 3) bezeichnet. Zukunftsforschung und Zukunftsgestaltung hat sich seit Mitte des 20. Jahrhunderts zunächst in den USA und danach auch in Europa als eigenes Forschungsfeld entwickelt. Widmete sich die Zukunftsforschung in den 1940er und 1950er Jahren noch primär militärstrategischen Fragestellungen, so rückten ab den 1960er Jahren allgemeine Planungs- und Prognoseaufgaben für wichtige gesellschaftliche Themen in den Mittelpunkt. In den 1970er Jahren spielten schließlich Umwelt- sowie Themen aus dem Umfeld der damals neuen sozialen Bewegungen eine große Rolle. Heute ist Zukunftsforschung ein etabliertes Forschungsfeld, das Erkenntnisse über Zukunftsentwicklung und Zukunftsgestaltung bezüglich zentraler gesellschaftlicher Herausforderungen gewinnen möchte (Kreibich, 2006). Hierzu zählen beispielsweise der Klimawandel, die Entwicklung einer CO₂-neutralen Wirtschaft und Gesellschaft, künftige Energie- und Mobilitätssysteme sowie die Entwicklung von Städten und Regionen.

Aufgrund der Komplexität der behandelten Themen hat Zukunftsforschung einen interdisziplinären Charakter und verfügt über ein breites Spektrum quantitativer wie qualitativer Methoden, die entsprechend der jeweiligen Aufgabenstellung zur Anwendung kommen (Kreibich, 2006). Im Bereich der räumlichen Planung, die sich mit der Gestaltung

der Regional- und Stadtentwicklung befasst, werden Methoden der Zukunftsforschung seit den 1960er Jahren angewendet.

Stiens (1998) unterscheidet zwei wesentliche Unterkategorien der Zukunftsforschung: *quantitative Prognosen* und *Techniken primär qualitativer Zukunftsforschung*. Zu den Techniken primär qualitativer Zukunftsforschung zählen Methoden, welche Expertenmeinungen zur Möglichkeit oder Wahrscheinlichkeit künftiger Ereignisse erheben und verdichten, z. B. das Delphi-Verfahren oder das Brainstorming-Verfahren, wie auch Methoden zur Untersuchung der gegenseitigen Beeinflussung möglicher Ereignisse (z. B. die Cross-Impact-Analyse). Schließlich gibt es Methoden, welche die Zusammengehörigkeit von verschiedenen Entwicklungskomponenten ermitteln, wie das Relevanzbaum-Verfahren oder der morphologische Kasten. Zu den Methoden quantitativer Zukunftsforschung zählen Trendextrapolationen, Prognosen im engeren Sinne, Simulationen sowie Ex-ante-Wirkungsanalysen. Darüber hinaus gibt es Mischformen zwischen quantitativen und qualitativen Methoden. Hierzu zählt insbesondere die Methode der Szenarioanalyse.

Für die Beantwortung der Forschungsfragen werden sowohl quantitative Daten (Deckung des Energiebedarfs) als auch qualitative Daten (erforderliche Maßnahmen, Handlungsspielraum der Regionen) benötigt. Daher wird die Methode der Szenarioanalyse gewählt. Dabei handelt es sich um eine wissenschaftliche Methode, die es ermöglicht, durch »die Konstruktion von verschiedenen möglichen Zukünftigen Orientierungsweisen zu generieren, um gegenwärtiges Handeln danach auszurichten« (Kosow & Gaßner, 2008, S. 11). Szenarien sollen eine hohe Bandbreite möglicher zukünftiger Verläufe, ihre Wirkungen und die diesen Verläufen vorausgesetzten Handlungen einschließlich der sich ergebenden Vor- und Nachteile erfassen.

Szenarien können sowohl für die Exploration und Validierung theoretischer Modelle (z. B. des Modells regionaler Energieautonomie) als auch für die wissenschaftliche Beschäftigung mit aktuellen politischen, ökonomischen und sozialen Fragestellungen verwendet werden. Szenarien sind eng verwandt mit Prognosen, unterscheiden sich von diesen aber in den getroffenen Annahmen. Während bei Prognosen die Parameter der Zielvariablen aus beobachteten Parametern der Vergangenheit abgeleitet werden, sind die Annahmen in einem Szenario frei wählbar

(Gornig, 2018; Stiens, 2005; Treuner & Gee, 1995). Die Fragestellungen dieser Arbeit lassen sich nur unter freier Wahl der Annahmen bearbeiten, da nach dem gegenwärtigen Wissensstand nicht davon auszugehen ist, dass sich eine vollständige Deckung eines regionalen Verkehrsenergiebedarfs durch bloße Fortschreibung aktueller Trends erreichen lässt.

Um die Komplexität der zu untersuchenden Fragestellung zu reduzieren und sie dadurch bearbeitbar zu machen, müssen Szenarien in mehreren Schritten entwickelt werden (Gornig, 2018). Die vorliegende Arbeit folgt dem Modell von Kosow und Gaßner (2008), die den Szenarioprozess in fünf Phasen unterteilen. Dieses Modell wurde gewählt, da es eine vergleichsweise geringe Anzahl von Phasen aufweist und daher, im Rahmen dieser Arbeit effizient angewendet werden kann. Außerdem erlaubte das Modell, die im Rahmen des Forschungsprojekts BAER erbrachten Vorarbeiten zu integrieren. Das Modell sieht folgende Phasen vor:

Phase 1: Szenariofeldbestimmung

In dieser Phase werden der Untersuchungsgegenstand der Szenarioanalyse und dessen Systemgrenzen in sachlicher, räumlicher und zeitlicher Hinsicht bestimmt.

Phase 2: Identifikation der Schlüsselfaktoren

Unter Schlüsselfaktoren, auch Deskriptoren genannt, werden die wesentlichen Einflussgrößen verstanden, die das Szenariofeld beschreiben. Schlüsselfaktoren sind diejenigen Variablen, Parameter, Trends, Entwicklungen und Ereignisse, die zentral für den Szenarioprozess sind. In dieser Arbeit wurden die Schlüsselfaktoren im Rahmen von Desk-Research ermittelt. Bei transdisziplinären Forschungsprojekten ist es auch üblich, einige Schlüsselfaktoren (Trends, Ereignisse) durch Delphi-Befragungen oder partizipative Verfahren (Stakeholder- oder BürgerInnen-Workshops etc.) zu ermitteln. Im Rahmen dieser Arbeit wurde auf das Verfahren der Desk Research zurückgegriffen, da die Szenarien einige Zeit nach Abschluss des Forschungsprojekts BAER entwickelt wurden, als keine Projektfinanzierung mehr zur Verfügung stand und der Autor auch nicht mehr in der Bodenseeregion lebte.

Phase 3: Analyse der Schlüsselfaktoren

In dieser Phase werden die Schlüsselfaktoren auf ihre möglichen zukünftigen Ausprägungen untersucht. Üblicherweise werden zunächst die extremsten denkbaren Entwicklungspfade und Ausprägungen der Deskriptoren (extremes Maximum und extremes Minimum) definiert. In diesem Zusammenhang wird auch von einem Scenario Funnel bzw. Szenario-Trichter gesprochen. Je weiter die Zukunft entfernt ist, desto variantenreicher werden die Zukunftssichten, weil mit der zeitlichen Distanz auch die Unsicherheiten steigen.

Phase 4: Szenario-Generierung

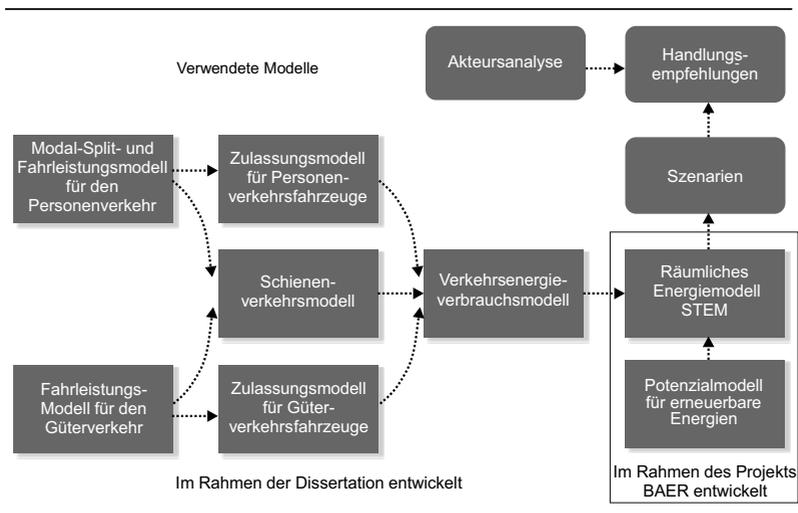
Hier werden Faktoren ausgewählt, zu konsistenten Faktorenbündeln zusammengestellt und zu Szenarien verdichtet. Diese Verdichtung beginnt als qualitatives narratives Modell und führt hin zu formalisiert-mathematischen Verfahren, also quantitativen Modellen. Diese Phase erfordert Kreativität bei der Zusammenstellung der Ausprägung der Einflussfaktoren, Logik in der Auswahl der Szenarien und statistische, mathematische und zum Teil Programmierkenntnisse bei der Operationalisierung der narrativen Annahmen in Gleichungssystemen mit entsprechenden Änderungsparametern.

Phase 5: Szenario-Transfer

Diese Phase beschreibt die Schritte zur Verwirklichung des dann gewählten Wunsch szenarios, also die Überführung der gewünschten in eine reale Zukunft. Dazu gehören vorbereitende Schritte wie Akteursanalysen, das Aufspannen von Handlungsoptionen sowie ggf. Ex-ante-Wirkungsanalysen mit einer abschließenden Strategiebewertung.

3.2 Modellierung und Simulation

Für die Szenario-Generierung werden in der Arbeit mehrere, zum Teil neu entwickelte Modelle eingesetzt und miteinander verknüpft (Abbildung 3).

Abbildung 3: Verwendete Modelle

Quelle: Eigene Darstellung.

Im Folgenden werden die Modelle erklärt:

Potenzialmodell für erneuerbare Energie:

Das Potenzial der Bodenseeregion für die Gewinnung erneuerbarer Energie wurde im Rahmen des Forschungsprojekts »BAER – Bodensee-Alpenrhein Energieregion« ermittelt. Dabei wurde zwischen sog. diffusen Potenzialen und sog. konkreten Potenzialen unterschieden. Zu den diffusen Potenzialen zählen alle Erzeugungstechnologien, die im Siedlungsraum realisiert werden können, keinen wesentlichen zusätzlichen Flächenbedarf auslösen und nicht sehr stoffstromintensiv sind, wie die solare Nutzung (Dach- und Fassaden), die Nutzung von Erd- und Umgebungswärme, die Nutzung von Abwasserwärme (vor Eintritt in die Kanalisation) und die Nutzung von Brennholz in Einzelfeuerungsanlagen. Als konkrete Potenziale werden alle Erzeugungstechnologien bezeichnet, die stoffstromintensiv und/oder flächenfordernd sind und deren Anlagen daher in der Regel außerhalb des Siedlungsraums errichtet werden. Hierzu zählen insbesondere Photovoltaik-(PV)Freiflächenanlagen, Windparks, Wasserkraftanlagen, geothermische Heizzentralen

oder Heizkraftwerke sowie Biomasse-Heizzentralen und Blockheizkraftwerke (Droege et al., 2014b).

Die Ergebnisse der Potenzialerhebung aus dem Forschungsprojekt BAER werden für diese Arbeit unverändert übernommen. Eine detailliertere Beschreibung befindet sich in Kapitel 6.9.

Modal-Split-Modell für den Personenverkehr:

Das Modal-Split-Modell errechnet die Verkehrs- und die Fahrleistung von sieben verschiedenen Verkehrsarten: »Zu Fuß«, »Rad«, »Kraftrad«, »PKW«, »Bus«, »Bahn« und »sonstige Verkehrsmittel«. Es bildet die vier Teilregionen der Bodenseeregion zunächst getrennt voneinander ab und aggregiert in einem weiteren Schritt die teilregionalen Ergebnisse für die Gesamtregion. Danach werden die Berechnungsergebnisse an das Zulassungsmodell für den Straßenpersonenverkehr und an das Verkehrsenergieverbrauchsmodell übergeben. Eine genaue Beschreibung des Modal-Split-Modells einschließlich theoretischer Vorüberlegungen und der verwendeten Algorithmen ist in Kapitel 5.1 enthalten.

Fahrleistungsmodell für den Güterverkehr:

Das Fahrleistungsmodell für den Güterverkehr schätzt die Entwicklung der Fahrleistung des Straßengüterverkehrs auf der Grundlage übergeordneter Verkehrsprognosen. Die Berechnungsergebnisse werden anschließend vom Zulassungsmodell für den Straßenverkehr und im Schienenverkehrsmodell weiterverwendet. Eine genaue Beschreibung des Modells einschließlich des verwendeten Algorithmus befindet sich in Kapitel 5.2.

Zulassungsmodell für den Straßenverkehr:

Das Zulassungsmodell für den Straßenverkehr beschreibt die Anzahl der Neuzulassungen und die Bestandsentwicklung für alle motorisierten Straßenverkehrsmittel des Personenverkehrs (Krafträder, PKW, Omnibusse) und des Güterverkehrs (Leichte und Schwere Straßenverkehrsfahrzeuge) in Abhängigkeit von verschiedenen Szenario-Annahmen. Die Berechnungsergebnisse werden anschließend an das Verkehrsenergieverbrauchsmodell übergeben. Eine genaue Beschreibung des Zulassungsmodells einschließlich theoretischer Vorüberlegungen und der verwendeten Algorithmen findet sich in Kapitel 5.3.

Schienenverkehrsmodell:

Das Schienenverkehrsmodell ermittelt die Fahrleistung des Schienenverkehrs basierend auf den Modal-Split-Szenarien und Hochrechnungen zur Entwicklung des Güterverkehrs. Ausgangspunkt für die Berechnung der Fahrleistung des Schienenpersonenverkehrs ist die im Modal-Split-Modell berechnete Verkehrsleistung des Schienenpersonenverkehrs. Die Berechnungsergebnisse werden anschließend vom Verkehrsenergieverbrauchsmodell weiterverwendet. Das Modell wird in Kapitel 5.4 näher beschrieben.

Verkehrsenergiebedarfsmodell:

Das Verkehrsenergiebedarfsmodell berechnet den Endenergiebedarf des Straßen- und Schienenverkehrs. Es unterscheidet zwischen den Verkehrsmitteln »Krafträder«, »PKW«, »Omnibusse«, »Leichte Straßengüterverkehrsfahrzeuge (LGF)«, »Schwere Straßengüterverkehrsfahrzeuge (SGF)«, »Schienenpersonenfernverkehr (SPFV)«, »Schienenpersonennahverkehr (SPNV)« und »Schienengüterverkehr (SGF)« sowie zwischen den Treibstoffarten »Benzin«, »Diesel«, »Flüssiggas (LNG)«, »Gas (CHP)«, »Elektrizität« und »Wasserstoff«. Die Energieverbräuche der verschiedenen Fahrzeugtypen werden zunächst getrennt nach Antriebsarten berechnet und anschließend nach Treibstoffart und nach Fahrzeugart aggregiert. Eine genaue Beschreibung des Verkehrsenergieverbrauchsmodells erfolgt in Kapitel 5.5.

Räumlich-zeitliches Energiesystemmodell STEM:

Für die Modellierung der Szenarien ist es erforderlich, den regionalen Energiebedarf dem regionalen Erzeugungspotenzial gegenüberzustellen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die regional erzeugte erneuerbare Energie nicht nur den Bedarf des Verkehrs, sondern auch den von Wohnen, Industrie und Gewerbe, Handel und Dienstleistungen decken muss. Es bedarf also einer integrierten Bilanzierung, die das gesamte regionale Energiesystem einbezieht.

Das regionale Energiesystem wurde im Forschungsprojekt »BAER Bodensee-Alpenrhein Energieregion« mit dem STEM (Space-Time Energy Model) erfasst. Näheres zu diesem Modell, mit dem sich regionaler

Energiebedarf und regionales Erzeugungspotenzial miteinander vergleichen lassen, findet sich in Kapitel 5.6.

Verknüpfung der Modelle:

Für diese Arbeit müssen das STEM und das Verkehrsenergiebedarfsmodell miteinander verknüpft werden. Dies erfolgt über zwei Schnittstellen:

- ▶ Zum einen wird der Endenergieverbrauch der Mobilität im Basisjahr, differenziert nach den Energieträgern Benzin, Erdgas und Flüssiggas, in das STEM übernommen.
- ▶ Zum anderen werden für jedes Szenario zwei spezifische Entwicklungspfade für den Endenergieverbrauch an das STEM übergeben, und zwar je ein Entwicklungspfad für den Treibstoffverbrauch und für den Stromverbrauch. Diese Entwicklungspfade werden im Verkehrsenergieverbrauchsmodell berechnet und beschreiben, wie sich der Treibstoff- und der Strombedarf der Mobilität bis zum Jahr 2050 im Verhältnis zum Basisjahr, also prozentual, entwickeln.

Eine genauere Beschreibung der Verknüpfung erfolgt in Kapitel 5.7.

4 Szenariofeldbestimmung

Dieses Kapitel dient dazu, das Feld für eine spätere Szenarioanalyse in zeitlicher und geographischer Hinsicht zu definieren. Es stellt also einen Arbeitsschritt der Szenarioanalyse dar.

4.1 Betrachtungszeitraum

Der Betrachtungszeitraum umfasst die Jahre 2010 bis 2050. Das Jahr 2010 ist das Basisjahr der energetischen Szenarien, die im Rahmen des BAER-Projekts erarbeitet wurden. 2010 war außerdem das Jahr der letzten großen Volkszählung in der Schweiz, die als Vollerhebung konzipiert und durchgeführt wurde. Dementsprechend steht für das Jahr letztmals ein Volkszählungsdatensatz mit einer sehr hohen Datengüte zur Verfügung. Seit dem Jahr 2010 wird die schweizerische Volkszählung nurmehr als Registerzählung durchgeführt. Das bedeutet, dass die Einwohnerregister der Gemeinden und Kantone als Basisdaten herangezogen und durch verschiedene Stichprobenerhebungen ergänzt werden. Diese neue Methodik ist kostengünstiger durchzuführen als eine Vollerhebung (Corpus et al., 2011). Die Datenqualität ist jedoch geringer als die mit einer Vollerhebung erzielte.

Das Jahr 2050 ist neben 1990, 2000 und 2100 eines der Stützjahre der Klimaszenarien des IPCC. Entsprechend den Untersuchungen des IPCC müssen die globalen Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80-95 % und bis zum Jahr 2100 um nahezu 100 % reduziert werden, um die globale Erwärmung auf maximal 2 °C zu begrenzen (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen [WBGU], 2009).

In Folge der IPCC-Szenarien verwenden zahlreiche andere Klima- und Energiestudien das Jahr 2050 als Zeithorizont. Auf europäischer Ebene zählt hierzu die Low Carbon Economy Roadmap. In ihr wird dargestellt, wie die europäische Wirtschaft bis zum Jahr 2050 umweltschonender und energieeffizienter werden kann. Ziel ist eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen um 80 % gegenüber dem Stand von 1990. Die Roadmap betrachtet alle Wirtschaftszweige gleichermaßen und beschreibt kosteneffiziente Transformationspfade (European Commission,

2017). Die Energiestrategie Schweiz betrachtet ebenfalls den Zeitraum bis zum Jahr 2050 (Schweizerischer Bundesrat, 2013), ebenso die vielzitierte Prognos-Studie »Modell Deutschland« (Prognos AG, 2009).

4.2 Beispiel Bodenseeregion

Die Szenarien zu energieautonomer Region werden am Beispiel der Bodenseeregion erarbeitet. Diese Region wurde ausgewählt, da sie Gegenstand des Forschungsprojekts »BAER – Bodensee-Alpenrhein Energie-region« war, welches von verschiedenen Hochschulen aus dieser Region durchgeführt wurde.

Unter Bodenseeregion wird in dieser Arbeit das weitere Umland des Bodensees verstanden. Der Bodensee befindet sich im nördlichen Alpenvorland an der Grenze zwischen der Schweiz, Deutschland und Österreich. Der See entstand am Ende der Würmeiszeit als Gletscherandsee des Rheingletschers. Heute besteht der Bodensee aus zwei Seen, dem größeren Ober- und dem kleineren Untersee, die der Rhein verbindet und durchfließt. Zusammen nehmen Ober- und Untersee eine Fläche von 536 km² ein. Mit einer Fläche von 536 km² ist der Bodensee nach dem Plattensee und dem Genfer See der flächenmäßig drittgrößte See in Mitteleuropa (»Bodensee«, n.d.).

Die Bodenseeregion blickt auf eine lange Geschichte zurück. Vom Beginn des 10. Jahrhunderts an gehörte sie zum Herzogtum Schwaben, das bis zum Ende der Stauferzeit um die Mitte des 13. Jahrhunderts einer der wichtigsten politischen Räume des Heiligen Römischen Reiches nördlich der Alpen war (Zotz, 2012). Das Ende des Herzogtums Schwaben sowie Feudalisierung und Verleihung von Immunitäten führten zu einer zunehmenden territorialen Zersplitterung. Nach dem Ende des Dreißigjährigen Krieges, der weitere Zerstörungen zur Folge hatte, verließ die Schweiz das Heilige Römische Reich. Seit 1871 teilen sich Deutschland, Österreich, die Schweiz und Liechtenstein die Bodenseeregion (Burmeister, 2003).

Obwohl die Region heute auf vier verschiedene Nationalstaaten aufgeteilt ist, hat sie sich ein gemeinsames kulturelles und sprachliches Erbe bewahrt. In früheren Zeiten war es vor allem die Schifffahrt, die die Region zusammenhielt. Der Personen- und Warenverkehr zwischen den Bodenseeanrainerstädten war so bedeutsam, dass sie sich wiederholt

zu Städtebünden zusammenschlossen, um ihre gemeinsamen Interessen besser zu vertreten. Der im See nicht genau festgelegte Grenzverlauf führt außerdem dazu, dass sich die Anrainer über Fischereirechte und andere Fragen der Gewässernutzung abstimmen müssen. In dieser Traditionslinie der grenzüberschreitenden Zusammenarbeit stehen auch verschiedene Umwelt- und Klimaschutzinitiativen, die sich seit den 1970er Jahren grenzüberschreitend entwickelt haben (Burmeister, 2003).

Wie eng die grenzüberschreitenden Verbindungen in der Region sind, zeigte sich während der Corona-Krise im Frühjahr 2020, als die Grenzen zwischen Deutschland, Österreich der Schweiz und Liechtenstein für mehrere Wochen geschlossen wurden. Dies hatte weitreichende Folgen für die mittelständische Wirtschaft, den Tourismus und die vielen Grenzgänger in der Region (Gasser & Jacobsen, 2020).

In dieser Arbeit werden der Bodenseeregion die deutschen Landkreise Sigmaringen, Konstanz, Bodenseekreis, Ravensburg, Lindau und Oberallgäu, die kreisfreie Stadt Kempten, die schweizerischen Kantone und Halbkantone St. Gallen, Thurgau, Appenzell Ausserrhoden und Appenzell Innerrhoden, das österreichische Bundesland Vorarlberg sowie das Fürstentum Liechtenstein zugerechnet. Diese Abgrenzung erfolgte im Rahmen des Forschungsprojekts BAER in Anlehnung an den Kooperationsraum der Internationalen Bodenseekonferenz (IBK-Raum), zu dem außerdem die Kantone Zürich und Schaffhausen zählen. Da diese beiden Kantone zum Metropolitanraum Zürich gehören und eine andere räumliche, wirtschaftliche und soziodemographische Struktur aufweisen als die übrigen Teilräume, wurden sie im Forschungsprojekt BAER nicht bearbeitet und werden auch in dieser Arbeit nicht behandelt.

Als Teilregionen werden in dieser Arbeit die deutschen, schweizerischen, österreichischen und liechtensteinischen Anteile an der Bodenseeregion bezeichnet. Die Teilregionen untergliedern sich wiederum in NUTS-3-Regionen. Bei NUTS-3-Regionen handelt es sich um regionalstatistische Einheiten, die sich an regionalen Verwaltungsgrenzen orientieren. Sie wurden von der europäischen Statistikbehörde EUROSTAT festgelegt, um eine europaweite Vergleichbarkeit regionalstatistischer Daten zu ermöglichen. In Deutschland sind die NUTS-3-Regionen deckungsgleich mit den Landkreisen und in der Schweiz mit den Kantonen. Das Fürstentum Liechtenstein bildet eine eigene NUTS-3-Region.

Vorarlberg ist in zwei NUTS-3-Regionen aufgeteilt: Rheintal-Bodensee und Bludenz-Bregenzer Wald. Unterhalb der NUTS-3-Regionen gibt es in allen Teilregionen Gemeinden als unterste Ebene der kommunalen Selbstverwaltung.

Abbildung 4 stellt den IBK-Raum dar. Farblich eingefärbt sind die Teilregionen der Bodenseeregion, die in der Arbeit behandelt werden. Weiß eingefärbt sind die Kantone Zürich und Schaffhausen, die nicht betrachtet werden.

Abbildung 4: Die Bodenseeregion



Quelle: Fachstelle für Statistik Kanton St. Gallen, 2020, verändert.

5 Identifikation der Schlüsselfaktoren und Modellbildung

Für die Modellierung der Szenarien ist es erforderlich, den regionalen Energiebedarf dem regionalen Erzeugungspotenzial gegenüberzustellen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das regionale Erzeugungsmodell z. B. für Strom nicht nur die Deckung des Verkehrsenergiebedarfs berechnet, sondern auch jene für Wohnen, Industrie und Gewerbe, Handel und Dienstleistungen. Die integrierte Bilanzierung kann sich daher nicht nur auf die Energiepartei Verkehr beschränken, sondern muss auf der Ebene des regionalen Energiesystems erfolgen.

Um sowohl den Sektor Verkehr als auch das regionale Energiesystem insgesamt abzubilden, werden in der Arbeit die in Kapitel 3.2 genannten Modelle verwendet und miteinander verknüpft.

5.1 Modal-Split-Modell für den Personenverkehr

Mit dem Modal-Split-Modell für den Personenverkehr wird ermittelt, wie sich Veränderungen der Verkehrsmittelwahl auf die Verkehrsleistung und die Fahrleistung des Personenverkehrs in der Bodenseeregion auswirken.

Das Modal-Split-Modell basiert auf der Time-Budget Theory (Zahavi & Talavie, 1980; Tanner, 1981), die von einem konstanten durchschnittlichen Reisezeitbudget von ca. 1,1 Stunden pro Tag und Person ausgeht. Das Modell berechnet die Verkehrs- und die Fahrleistung von sieben verschiedenen Verkehrsarten: »Zu Fuß«, »Rad«, »Kraftrad«, »PKW«, »Bus«, »Bahn« und »sonstige Verkehrsmittel«. Das Modal-Split-Modell betrachtet die vier Teilregionen der Bodenseeregion zunächst getrennt voneinander und aggregiert die teilregionalen Ergebnisse in einem nächsten Schritt für die Gesamtregion.

Die Berechnung erfolgt in mehreren Schritten: Im ersten Schritt wird festgelegt, wie sich die Kapazität jedes Verkehrsmittels vom Basisjahr 2010 bis zum Ende des Betrachtungszeitraums im Jahr 2050 verändert. Die Kapazität c des Verkehrsmittels m_l im Jahr $2010+x$ wird in % der Kapazität des Basisjahres 2010 ausgedrückt.

Im nächsten Schritt wird berechnet, wie sich die Kapazitätserweiterung des Verkehrsmittels auf die Zeitverwendung eines durchschnittlichen Verkehrsteilnehmers auswirkt. Es ist plausibel anzunehmen, dass die Erweiterung der Kapazität eines Verkehrsmittels zu einer größeren Verkehrsnachfrage führt und somit auch der Anteil dieses Verkehrsmittels an der täglichen Reisezeit einer durchschnittlichen Person zunimmt, während die Verringerung der Kapazität eines Verkehrsmittels die Nachfrage und damit auch den Reisezeitanteil dieses Verkehrsmittels senkt.

Somit gilt:

mittlere Reisezeit je Person aggregiert [min/d] = mittlere Reisezeit je Person im Basisjahr * Kapazität des Verkehrsmittels im Jahr x

$$\text{tdp}_{m1}(A)_{2010+x} = \text{tdp}_{m1}(A)_{2010} * c_{m1}(A)_{2010+x}$$

wobei:

$\text{tdp}_{m1}(A)_{2010+x}$ = mittlere tägliche Reisezeit einer Person mit dem Verkehrsmittel m1 im Szenario A während des Betrachtungsjahres 2010+x

$\text{tdp}_{m1}(A)_{2010}$ = mittlere tägliche Reisezeit einer Person mit dem Verkehrsmittel m1 im Szenario A während des Basisjahrs 2010

$c_{m1}(A)_{2010+x}$ = Kapazität des Verkehrsmittels m1 im Szenario A während des Betrachtungsjahrs 2010+x

Entsprechend der Time-Budget-Theorie ist die durchschnittliche Reisezeit pro Person und Tag als konstant anzusehen. Dementsprechend beeinflusst eine Kapazitätsänderung nur den Anteil des entsprechenden Verkehrsmittels an der durchschnittlichen Reisezeit, nicht aber die durchschnittliche Reisezeit selbst. Es gilt für die Ebene des Individuums:

mittlere Reisezeit je Person korrigiert [min/d] = (mittlere Reisezeit je Person und Verkehrsmittel, aggregiert / mittlere Reisezeit je Person und Verkehrsmittel) * mittlere Reisezeit je Person und Verkehrsmittel im Basisjahr

$$tdpk_{m1}(A)_{2010+x} = tdp_{m\ total\ 2010} * (tdp_{m1}(A)_{2010+x} / (tdp_{m\ total}(A)_{2010+x}))$$

wobei:

$tdpk_{m1}(A)_{2010+x}$ = Korrigierte mittlere tägliche Reisezeit einer Person mit dem Verkehrsmittel m1 im Szenario A während des Betrachtungsjahrs 2010+x

$tdp_{m\ total\ 2010}$ = Gesamte tägliche Reisezeit einer Person mit dem Verkehrsmittel m1 im Basisjahr 2010

$tdp_{m\ total}(A)_{2010+x}$ = Gesamte tägliche Reisezeit einer Person mit dem Verkehrsmittel m1 im Szenario A während des Betrachtungsjahrs 2010+x

$tdp_{m1}(A)_{2010+x}$ = mittlere tägliche Reisezeit einer Person mit dem Verkehrsmittel m1 im Szenario A während des Betrachtungsjahrs 2010+x

Auf der Ebene des Gesamtverkehrssystems gilt:

Gesamtreisezeit [min/d] = Einwohnerzahl * Korrigierte mittlere Reisezeit pro Person

$$td_{m1}(A)_{2010+x} = EZ_{2010+x} * tdpk_{m1}(A)_{2010+x}$$

wobei:

$td_{m1}(A)_{2010+x}$ = Gesamte tägliche Reisezeit aller Bewohnerinnen und Bewohner im Szenario A während des Betrachtungsjahrs 2010+x

EZ_{2010+x} = Einwohnerzahl der jeweiligen Teilregion während des Betrachtungsjahrs 2010+x

$tdpk_{m1}(A)_{2010+x}$ = Korrigierte mittlere tägliche Reisezeit einer Person mit dem Verkehrsmittel m1 im Szenario A während des Betrachtungsjahrs 2010+x

Die Personenverkehrsleistung berechnet sich anschließend aus der Gesamtreisezeit und der mittleren Reisegeschwindigkeit jedes Verkehrsmittels.

Personenverkehrsleistung [km] = Gesamtreisezeit * mittlere Reisegeschwindigkeit

$$PVL_{m1} (A)_{2010+x} = td_{m1} (A)_{2010+x} * v_{m1}$$

wobei:

$PVL_{m1} (A)_{2010+x}$ = Mittlere tägliche Personenverkehrsleistung mit der Verkehrsmittel 1 im Szenario A während des Betrachtungsjahres 2010+x

$td_{m1} (A)_{2010+x}$ = Gesamte tägliche Reisezeit aller Bewohnerinnen und Bewohner im Szenario A während des Betrachtungsjahres 2010+x

v_{m1} = Durchschnittliche Geschwindigkeit des Verkehrsmittels m1; es wird angenommen, dass diese während des gesamten Betrachtungszeitraums konstant bleibt.

Fahrleistung [km] = Verkehrsleistung [km] / Besetzungsgrad [#]

$$FL_{m1} (A)_{2010+x} = VL (A)_{2010+x} / B_{m1}$$

wobei:

$FL_{m1} (A)_{2010+x}$ = Mittlere Fahrleistung aller Fahrzeuge des Verkehrsmittel 1 im Szenario A während des Betrachtungsjahres 2010+x

$VL_{m1} (A)_{2010+x}$ = Mittlere Tagessverkehrsleistung aller Bewohnerinnen und Bewohner der Bodenseeregion mit der Verkehrsmittel 1 im Szenario A während des Betrachtungsjahres 2010+x

B_{m1} = Mittlerer Besetzungsgrad des Verkehrsmittels m1; es wird angenommen, dass dieser während des gesamten Betrachtungszeitraums konstant ist.

5.2 Fahrleistungsmodell für den Güterverkehr

Da für den Güterverkehr keine regionalisierte Prognose der Verkehrsleistung und der Fahrleistung vorliegt, werden folgende Annahmen getroffen:

- ▶ die Güterverkehrsleistung in der Bodenseeregion nimmt von bis 2010 bis 2050 um 50 % zu,
- ▶ die Anteile von Schiene und Straße am Güterverkehr bleiben konstant,
- ▶ die Beförderungskapazität und die Auslastung der unterschiedlichen Güterverkehrsmittel (Güterzüge, Schwere und Leichte Straßengüterverkehrsfahrzeuge) wird sich nicht verändern und
- ▶ in der Konsequenz nimmt die Fahrleistung der drei Güterverkehrsmittel (Güterzüge, Schwere und Leichte Straßengüterverkehrsfahrzeuge) bis zum Jahr 2050 um jeweils 50 % zu.

$$GFL_{m1\ 2010+x} = GFL_{m1\ 2010} + ((0.5 * GFL_{m1\ 2010} / 40) * (x-2010))$$

wobei:

$GFL_{m1\ 2010+x}$ = Mittlere Fahrleistung aller Fahrzeuge des Verkehrsmittels 1 während des Betrachtungsjahres 2010+x

$GFL_{m1\ 2010}$ = Mittlere Fahrleistung aller Fahrzeuge des Verkehrsmittels 1 im Basisjahr 2010

x = Betrachtungsjahr

5.3 Zulassungsmodell für den Straßenverkehr

Um die zukünftige Entwicklung des Bestandes an Straßenverkehrsfahrzeugen beschreiben zu können, wird ein Modell benötigt, das

- ▶ den gegenwärtigen Bestand als Ausgangspunkt der Entwicklung präzise beschreibt,
- ▶ die Anzahl der Neuzulassungen anhand relevanter Einflussfaktoren schätzt,
- ▶ die Verweildauer der Fahrzeuge im Bestand und somit auch den Zeitpunkt ihres Ausscheidens schätzt und
- ▶ Zulassungsanteile von Fahrzeugen mit unterschiedlichen Antriebsarten (konventionelle Antriebe wie alternative Antriebe) berücksichtigt.

Theoretische Grundlagen

Dudenhöffer & Dudenhöffer (2013) geben einen Überblick über verschiedene Prognosemodelle, die in der Automobilindustrie eingesetzt werden. Alle vorgestellten Modelle dienen der Vorhersage des Verlaufsvolumens, gemessen in neuzugelassenen Fahrzeugen.

Kurz- und Mittelfristprognosen der PKW-Zulassungszahlen betrachten einen Zeitraum von bis zu fünf Jahren. Diese Prognosen basieren meist auf Trendfortschreibungen oder Regressionsanalysen.

Zeitreihenprognosen beruhen auf saisonalen Mustern der Fahrzeugverkäufe unter Bezug auf die jeweiligen Vorjahre. Aus diesen Mustern werden Aussagen für die zukünftige Entwicklung der Fahrzeugkäufe abgeleitet. Die Gründe für die Kaufentscheidungen selbst werden nicht betrachtet. In der Zeitreihenanalyse werden vier verschiedene Komponenten unterschieden:

- ▶ Eine *Trend-Komponente* T_t , welche die langfristige Tendenz der Fahrzeugentwicklung widerspiegelt
- ▶ Eine *zyklische Komponente* Z_t , die auf konjunkturelle Schwankungen zurückzuführen ist und einen wellenförmigen Verlauf hat
- ▶ Eine *Saison-Komponente* S_t , deren Verlauf jahreszeitliche Schwankungen bei den Neuzulassungen aufzeigt
- ▶ Eine *Stör-Komponente* U_t , die nicht näher bestimmbare, also quasi zufällige Einflussfaktoren repräsentiert

Ein einfaches Zeitreihenmodell besteht aus einer mathematischen Funktion, welche diese vier Komponenten additiv miteinander verknüpft, z. B.:

$$\text{Zulassung Bodensee}_t = T_t + Z_t + S_t + U_t \text{ mit } t = 1, 2, \dots, T$$

Zusätzlich kann das Zeitreihenmodell durch Sondereinflüsse erweitert werden, beispielsweise die Modellplanung der Automobilhersteller, besondere Marketingaktivitäten, Preisänderungen bei Fahrzeugen, Änderungen bei den Fahrzeugkosten, Änderungen auf dem Gebrauchtwagenmarkt oder auch Änderungen bei makroökonomischen Faktoren wie Wirtschaftswachstum, Sozialprodukt oder Arbeitslosenquote. Diese Sondereinflüsse müssen jeweils separat modelliert werden. Solche

Zeitreihenanalysen mit sogenannten explikativen Faktoren ermöglichen Prognosen von hoher Güte für die kurz- und mittelfristige Entwicklung von Fahrzeugverkäufen bzw. Zulassungszahlen. Die Berücksichtigung spezifischer automobilwirtschaftlicher Zusammenhänge ist möglich. Der Aufwand für die Verknüpfung einer Vielzahl von Zeitreihen ist nicht unangemessen hoch. Zeitreihenanalysen mit explikativen Faktoren eignen sich insbesondere für die Prognose der Fahrzeugverkäufe bzw. Zulassungszahlen in gesättigten Fahrzeugmärkten. Hierzu zählen die Fahrzeugmärkte der Bodenseeanrainerstaaten.

Ökonometrische Prognosemodelle stellen einen Zusammenhang zwischen den zu erklärenden Neuzulassungen und erklärenden Variablen mit kausalem Zusammenhang her, wobei es sich bei Letzteren in der Regel um makroökonomische Variablen wie Bruttoinlandsprodukt oder regionalprodukt (BIP, BRP), Zinssatz und Arbeitslosenquote handelt.

$$\text{Zulassung } t = f(\text{BRP}, \text{Zinssatz}, \text{Arbeitslosenquote}, \dots)$$

Dudenhöffer & Dudenhöffer (2013) sind der Auffassung, dass sich ökonometrische Prognosemodelle für gesättigte Fahrzeugmärkte weniger eignen als Zeitreihenanalysen, die für diese Märkte zielgenauere Prognosen liefern würden. *»Die Ursachen für die höhere Prognosegüte der parametergestützten Zeitreihenanalyse liegen in der zielgenaueren Beschreibung des Fahrzeug-Austauschzeitpunktes durch externe Parameter wie Modellneuerungen, Leasing- und Kreditfinanzierungs- Vertragslaufzeiten oder Nachfrageüberhänge auf den Gebrauchtwagenmärkten.«*

Bei **Kundenakzeptanzprognose** wird die Akzeptanz eines neuen Produkts oder eines neuen Vertriebswegs mittels einer oder mehrerer Einflussvariablen geschätzt, z. B. mittels soziodemographischer Variablen. Dabei ist eine möglichst genaue Beschreibung einer gegenwärtigen Zielgruppe zu erreichen, um die Entwicklung der Kundenakzeptanz eines Produkts in der Zukunft prognostizieren zu können. Die Stärke des Einflusses der verschiedenen Variablen wird mittels eines Regressionsmodells geschätzt.

Für Prognosen, die zwanzig Jahre und mehr in die Zukunft blicken, werden andere Prognoseverfahren benötigt als für Kurz- und Mittelfristprognosen.

Ein gängiges Verfahren für die Prognose der langfristigen Entwicklung der Neuzulassungen ist die **Fahrzeugdichteprognose**. Dieses Prognoseverfahren macht sich die Beobachtung zunutze, dass steigendes Einkommen zu steigender Motorisierung führt. Daher kann die künftige Fahrzeugdichte (definiert als die Zahl der PKW je tausend Einwohner) auf der Grundlage der voraussichtlichen Entwicklung des durchschnittlichen Pro-Kopf-Einkommens bzw. des Bruttoinlandsprodukts pro Kopf vorhergesagt werden. Bei Ländern mit niedrigem bis mittlerem Pro-Kopf-Einkommen ist dessen Zusammenhang mit der Fahrzeugdichte stärker als bei Ländern mit einem hohen Einkommen. Bei Ländern mit sehr hohem Einkommen, und hierzu zählen Deutschland, Österreich, die Schweiz und Liechtenstein, ist der Zusammenhang relativ schwach ausgeprägt. Der Zusammenhang zwischen Pro-Kopf-Einkommen und Fahrzeugdichte lässt sich mit einer logistischen Funktion beschreiben.

Drei Informationen werden benötigt, um eine Fahrzeugdichteprognose durchführen zu können: 1) die gegenwärtige Fahrzeugdichte, gemessen in PKW je tausend Einwohner, 2) eine Prognose oder Vorausrechnung der zukünftigen Einkommensentwicklung bzw. Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts (BIP) je Kopf, 3) eine Prognose bzw. Vorausrechnung der Bevölkerungsentwicklung im betrachteten Zeitraum. Mittels der gegenwärtigen Fahrzeugdichte, der logistischen Funktion und der Prognose des Pro-Kopf-Einkommens lässt sich die künftige Entwicklung der Fahrzeugdichte ableiten. Durch Multiplikation der künftigen Fahrzeugdichte mit der vorausgerechneten Einwohnerzahl kann die Zahl der künftigen PKW, also die Größe des PKW-Bestands, ermittelt werden.

Die Abgänge aus dem Fahrzeugbestand ergeben sich im Fahrzeugdichtemodell aus der durchschnittlichen Lebenszeit der Fahrzeuge. Ist diese bekannt, lassen sich auch die Neuzulassungen mit folgendem Modell berechnen:

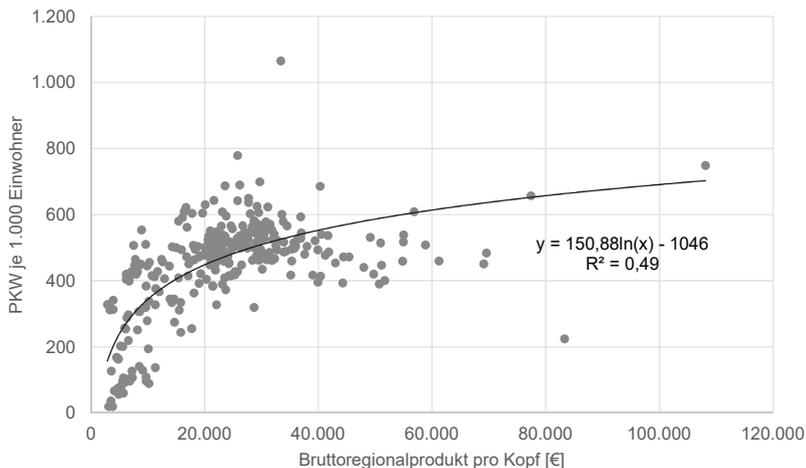
$$\begin{aligned} \text{Zulassung}(t+x) = & \text{Fahrzeugbestand}(t+x) - \text{Fahrzeugbestand}(t+x-1) \\ & + \text{Ersatzbedarf}(t+x) \end{aligned}$$

Das Fahrzeugdichtemodell wird vor allem im Zusammenhang mit der Szenariotechnik eingesetzt. Hierbei werden mindestens zwei

Szenarien – ein optimistisches und ein pessimistisches – beschrieben und qualitativ begründet. Dies ist eine Möglichkeit, mit der Prognoseunsicherheit bei Langfristprognosen umzugehen. Als Beispiel nennen Dudenhöffer und Dudenhöffer (2013) die bereits oben beschriebenen Shell-PKW-Szenarien.

Im Rahmen der Arbeit war zunächst beabsichtigt, ein Fahrzeugdichtemodell für die Bodenseeregion zu entwickeln. Allerdings konnte für die NUTS-3-Regionen der Bodenseeanrainerstaaten kein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen dem Pro-Kopf-Bruttoregionalprodukt und der PKW-Dichte nachgewiesen werden (siehe Abbildung 5). Außerdem hätte das Fahrzeugdichtemodell nur die PKW-Zulassungen abgebildet, nicht jedoch die Zulassungen von Kraftfahrzeugen, Omnibussen, Leichten und Schweren Straßengüterverkehrsfahrzeugen. Es wurde daher entschieden, die Fahrzeugzulassungen auf der Grundlage der erwarteten Fahrleistungen abzubilden, da für alle Fahrzeugtypen entsprechende Daten im Rahmen der Arbeit generiert werden.

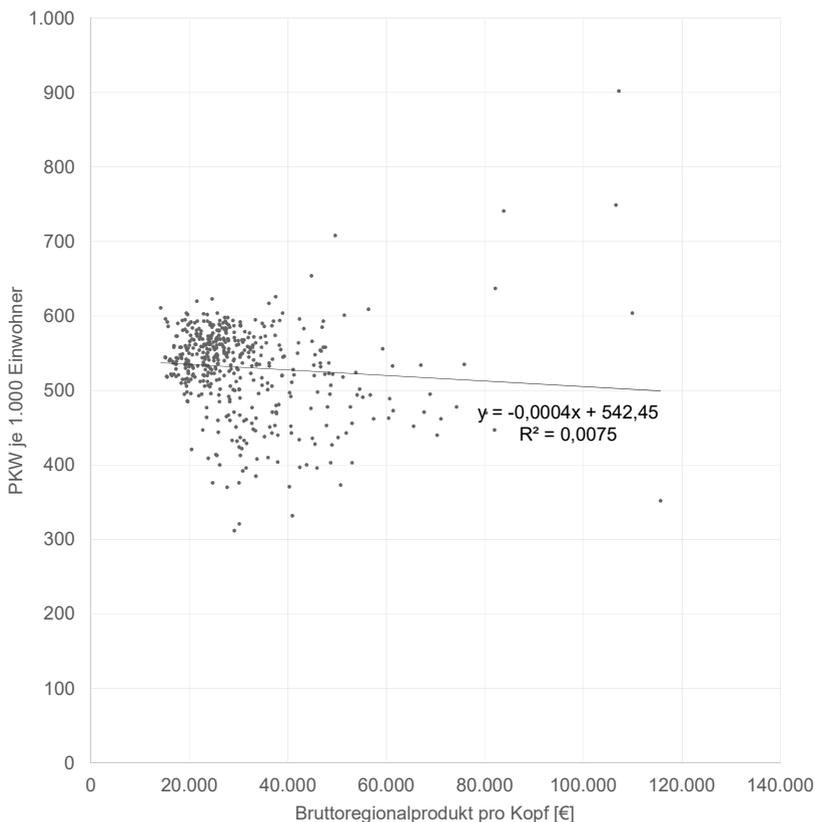
Abbildung 5: Bruttoregionalprodukt pro Kopf und PKW-Dichte europäischer NUTS-2-Regionen 2010



Quelle: Eigene Berechnung auf der Grundlage von EUROSTAT 2015a, 2015c, 2015e.

Für die NUTS-3-Regionen im Bodenseeraum zeigt sich, wie Abbildung 6 zeigt, kein statistischer Zusammenhang. Die NUTS-3-Regions-Daten streuen also deutlich mehr und unabhängig vom Bruttoregionalprodukt. Eine Ursache kann im kleinräumig unterschiedlichen

Abbildung 6: Bruttoregionalprodukt und PKW-Dichte von NUTS-3-Regionen in den Bodenseeanrainerstaaten Deutschland, Österreich, Schweiz und Liechtenstein 2010



Quelle: Eigene Berechnung auf der Grundlage von EUROSTAT 2015d, 2015b; DESTATIS 2015; Statistik Austria 2015; Bundesamt für Statistik 2015a, 2015b; Amt für Statistik 2015; Eidgenössische Steuerverwaltung 2011.

Individualverkehr-(IV)getriebenen Mobilitätsbedarf unabhängig von der regionalen Einkommenssituation, doch abhängig von der regional unterschiedlichen Versorgung durch Öffentlichen Verkehr (ÖV) liegen.

Modellentwicklung:

Das Zulassungsmodell beschreibt, wie sich eine veränderte Verkehrsnachfrage auf den Fahrzeugbestand auswirkt. Das Modell verwendet die Fahrleistung des Personen- und des Güterverkehrs als Eingangsgröße und berechnet für jedes Jahr die Anzahl der neuzugelassenen Fahrzeuge nach Antriebsarten sowie die Anzahl der Fahrzeuge, die aus dem Bestand ausscheiden. Dabei werden die Struktur des Fahrzeugbestandes im Basisjahr, die typischen Überlebenswahrscheinlichkeiten verschiedener Fahrzeugtypen sowie vordefinierte Szenarien zum Anteil der verschiedenen Antriebsarten berücksichtigt.

Das Modell unterscheidet zwischen den Fahrzeugtypen »Krafträder«, »PKW«, »Omnibusse«, »Leichte Straßengüterverkehrsfahrzeuge (LGF)« und »Schwere Straßengüterverkehrsfahrzeuge (SGF)« sowie zwischen den Antriebsarten »Benzinmotor«, »Dieselmotor«, »Flüssiggasantrieb (LNG)«, »Gasantrieb (CHP)«, »Elektroantrieb«, »Hybridantrieb« und »Brennstoffzellenantrieb«. Das Modell betrachtet zunächst die Fahrzeugbestände der vier Teilregionen und aggregiert sie anschließend auf der gesamtregionalen Ebene.

Zulassungsteilmodell PKW

Eingangsparameter:

- ▶ PKW-Bestand nach Antriebsarten
- ▶ Anteile der verschiedenen Antriebsarten an den Neuzulassungen:
Für den Untersuchungszeitraum waren hierzu nur Daten des deutschen Kraftfahrbundesamtes verfügbar. Diese wurden für das gesamte Modell verwendet, also auch für die österreichische, schweizerische und liechtensteinische Teilregion
- ▶ Durchschnittliche Jahresfahrleistung des Fahrzeugs nach Teilregionen

Variable Parameter in den Szenarien:

- ▶ Entwicklung der Anteile der Neuzulassungen entsprechend den Zulassungszahlannahmen der Shell-Szenarien

Berechnungsschritte:

Zunächst wird die Größe des Fahrzeugbestands für jedes Verkehrsmittel festgestellt. Diese ergibt sich aus der Jahresfahrleistung aller Fahrzeuge des Verkehrsmittels und der durchschnittlichen Fahrleistung je Fahrzeug. Die Jahresfahrleistung aller Fahrzeuge ist szenarioabhängig und wird für den Personenverkehr mit dem Modal-Split-Modell und für den Güterverkehr mit dem Fahrleistungsmodell berechnet. Sie unterscheidet sich von Teilregion zu Teilregion aufgrund der unterschiedlichen Einwohnerzahlen sowie unterschiedlichen Ausgangswerte bei der Fahrzeugdichte und beim Modalsplit. Zur durchschnittlichen Jahresfahrleistung je Fahrzeug liegen auf nationaler Ebene Daten vor. Es wird vereinfachend davon ausgegangen, dass sich die durchschnittliche Jahresfahrleistung bis zum Ende des Betrachtungszeitraums nicht verändern wird.

Ein erster Vergleich zwischen dem rechnerischen PKW-Bedarf für das Jahr 2010 und der tatsächlichen Anzahl der zugelassenen PKW zeigt, dass die Bedarfsberechnung einen Wert ergibt, der unter dem realen Fahrzeugbestand liegt. Dies kann dadurch erklärt werden, dass die Bedarfsberechnung auf empirischen Daten zum Verkehrsverhalten von Personen beruht und daher lediglich Rückschlüsse auf den PKW-Bedarf von Privathaushalten zulässt. Sie erlaubt zunächst keine Rückschlüsse auf den PKW-Bedarf von Unternehmen, Behörden, Vereinen und Verbänden. Dieser zusätzliche Bedarf wird vom Autor auf etwa 10 % des PKW-Bedarfs der privaten Haushalte geschätzt. Die Formel für die Bedarfsberechnung wird daher entsprechend angepasst.

$$F\text{Bed} (A)_{\text{PKW } 2010+x} = 1,1 * FL (A)_{\text{PKW } 2010+x} / MFL_{\text{PKW } 2010}$$

wobei:

$F\text{Bed} (A)_{\text{PKW } 2010+x}$ = PKW-Bedarf im Betrachtungsjahr 2010+x des Szenarios A

$FL (A)_{\text{PKW } 2010+x}$ = Mittlere Fahrleistung aller PKW im Szenario A während des Betrachtungsjahres 2010+x

$MFL_{PKW\ 2010}$ = Mittlere Fahrleistung eines PKW im Basisjahr

Für alle übrigen Straßenverkehrsfahrzeuge gilt:

$$FBed(A)_{m1\ 2010+x} = FL(A)_{m1\ 2010+x} / MFL_{m1\ 2010}$$

wobei:

$FBed_{m1\ 2010+x}$ = Bedarf an Fahrzeugen des Verkehrsmittels 1 im Betrachtungsjahr 2010+x des Szenarios A

$FL(A)_{m1\ 2010+x}$ = Mittlere Fahrleistung aller Fahrzeuge des Verkehrsmittel 1 im Szenario A während des Betrachtungsjahres 2010+x

$MFL_{m1\ 2010}$ = Mittlere Fahrleistung eines Fahrzeugs des Verkehrsmittels 1 im Basisjahr

Im nächsten Schritt wird der Fahrzeugbestand für das Jahr 1 des Betrachtungszeitraums ermittelt. Er errechnet sich aus dem Fahrzeugbestand im Basisjahr abzüglich der Fahrzeuge, die im Jahr 1 aus dem Fahrzeugbestand ausscheiden, und zuzüglich der Neuzulassungen.

$$FBest(A)_{m1\ 2010+x} = FBest(A)_{m1\ 2010} - FA_{m1\ 2010+x} + FN_{m1\ 2010+x}$$

wobei:

$FBest(A)_{m1\ 2010+x}$ = Fahrzeugbestand des Verkehrsmittels 1 im Jahr 2010+x des Szenarios A

$FBest(A)_{m1\ 2010}$ = Fahrzeugbestand des Verkehrsmittels 1 im Basisjahr 2010

$FA_{m1\ 2010+x}$ = Abgehende Fahrzeuge des Verkehrsmittels 1 im Jahr 2010+x

$FN_{m1\ 2010+x}$ = Neuzugelassene Fahrzeuge des Verkehrsmittels 1 im Jahr 2010+x

Ein wichtiger Parameter ist die Anzahl der abgehenden Fahrzeuge pro Jahr. Sie steht in engem Zusammenhang mit dem Alter des Fahrzeugbestandes: Je älter der Fahrzeugbestand, desto größer ist der Anteil der Fahrzeuge, die im Jahr ausscheiden. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass die Anzahl der neuzugelassenen Fahrzeuge pro Jahr nicht konstant ist, sondern von langfristigen Faktoren wie der Einwohnerentwicklung, aber auch von saisonalen und konjunkturellen Faktoren wie der wirtschaftlichen Entwicklung, den Fahrzeug- und den Treibstoffpreisen beeinflusst wird. Dementsprechend werden in einigen Jahren mehr Fahrzeuge (je 1.000 Einwohner) zugelassen als in anderen. Dieser Kohorteneffekt muss berücksichtigt werden.

Um die Anzahl der ausscheidenden Fahrzeuge zu schätzen, werden für alle betrachteten Fahrzeugkategorien Überlebenswahrscheinlichkeiten für jedes Altersjahr vom Jahr der Zulassung bis zu einem Fahrzeugalter von 50 Jahren berechnet, wobei sich die Datengrundlagen für die Berechnung der Überlebenswahrscheinlichkeiten voneinander unterscheiden: Für PKW liegen lange Zeitreihen des deutschen Kraftfahrtbundesamtes vor, die zur Berechnung der Überlebenswahrscheinlichkeiten in allen Teilregionen der Bodenseeregion herangezogen wurden.

Berechnung des Fahrzeugbestandes je Altersjahr

Die Anzahl der Fahrzeuge mit dem Fahrzeugalter $y+x$ im Jahr $2010+x$ errechnet sich aus der Anzahl der Fahrzeuge mit dem Fahrzeugalter y im Jahr 2010 multipliziert mit der Überlebenswahrscheinlichkeit P für das Altersjahr $y+x$.

$$F_{y+1\ 2010+x} = F_y * P_{y+x}$$

Die Überlebenswahrscheinlichkeit ist fahrzeugtypspezifisch, muss also für jeden Fahrzeugtyp gesondert berechnet werden. Als Eingangsdaten werden dafür lange Zeitreihen zum Verbleib der Fahrzeuge eines bestimmten Zulassungsjahres im Fahrzeugbestand verwendet (z. B. Kraftfahrtbundesamt, 2011; Kraftfahrtbundesamt, 2012). Die Bestandsentwicklung eines Altersjahrgangs hat einen spezifischen, S-Kurven-ähnlichen

Verlauf: In den ersten beiden Jahren nach der Zulassung verändert sich die Anzahl der Fahrzeuge praktisch nicht. Ab dem Jahr drei gehen einige Fahrzeuge aufgrund von Unfällen oder Defekten ab. Diese Entwicklung beschleunigt sich von Jahr zu Jahr bis etwa zum Jahr 15, danach verlangsamt sie sich wieder etwas. Im Jahr 25 sind 95 % der Fahrzeuge wieder aus dem Bestand ausgeschieden. Die verbleibenden 5 % werden in den darauffolgenden 25 Jahren, also bis zum Jahr 50, aus dem Bestand ausscheiden. Danach verbleiben nur einige Restexemplare (Oldtimer), die in dieser Untersuchung vernachlässigt werden können. Der Verlauf der S-Kurve lässt sich mit folgender Gleichung beschreiben:

$$y = D + \frac{(A - B)}{1 + \left(\frac{x}{C}\right)^B}$$

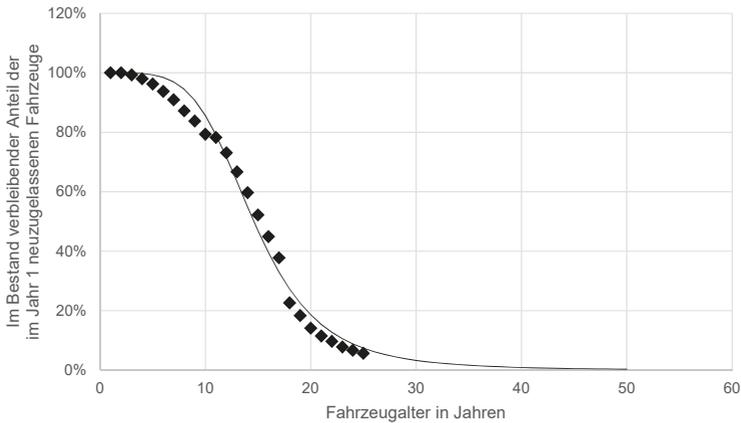
Formel 1: Allgemeine Form einer S-Kurve

Der Wert y entspricht dabei dem Prozentanteil der im Jahr y zugelassenen Fahrzeuge, die sich im Jahr $y+x$ noch im Bestand befinden, und lässt sich aus den Zeitreihendaten des Kraftfahrtbundesamts (KBA) ableiten. Die Werte der Parameter A , B , C und D werden mit Hilfe des Microsoft Excel Solvers statistisch geschätzt. Daraus ergibt sich folgende Gleichung für die Modellierung der Überlebenswahrscheinlichkeiten von PKW-Neuzulassungen, mit der die in Abbildung 7 dargestellten Ergebnisse errechnet wurden:

$$y = 0 + \frac{1,0000037 - 4,706717564}{1 + \left(\frac{x}{14,61023698}\right)^{4,706717564}} \quad \boxed{\text{SSD} = 0,042687987}$$

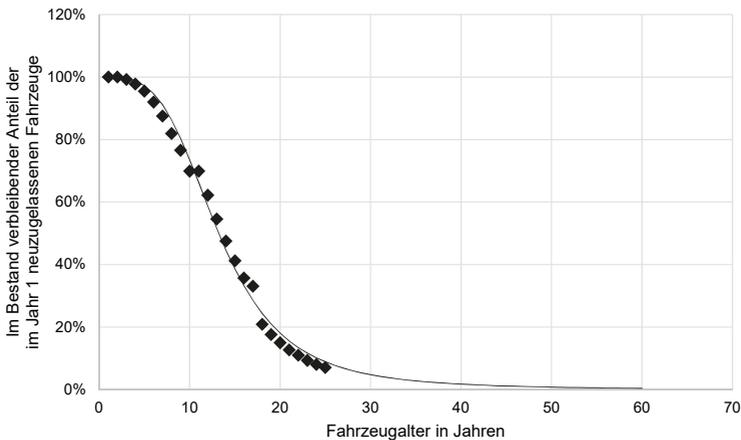
Formel 2: Modellgleichung für die Überlebenswahrscheinlichkeiten des PKW-Bestands

Abbildung 7: Überlebenswahrscheinlichkeiten der PKW nach Altersjahren – Kurvenfunktion und Zulassungsdaten des KBA



Quelle: Eigene Berechnung auf der Grundlage von Kraftfahrtbundesamt, 2010 & 2011; Die leichten Diskontinuitäten in der Datenreihe beim Altersjahr 10 und 17 ergeben sich aus geänderten Fahrzeugtyp-Zuordnungen.

Abbildung 8: Überlebenswahrscheinlichkeiten der LKW nach Altersjahren – Kurvenfunktion und Zulassungsdaten des KBA



Quelle: Eigene Berechnung auf der Grundlage von Kraftfahrtbundesamt, 2010 & 2011; Die leichten Diskontinuitäten in der Datenreihe beim Altersjahr 10 und 17 ergeben sich aus geänderten Fahrzeugtyp-Zuordnungen.

Auch für LKW kann auf Grundlage der Daten des deutschen Kraftfahrtbundesamtes eine Modellgleichung berechnet werden. Die S-Kurve für LKW ist etwas flacher als die für PKW, d. h., die LKW bleiben länger im Bestand, wie aus Abbildung 8 hervorgeht.

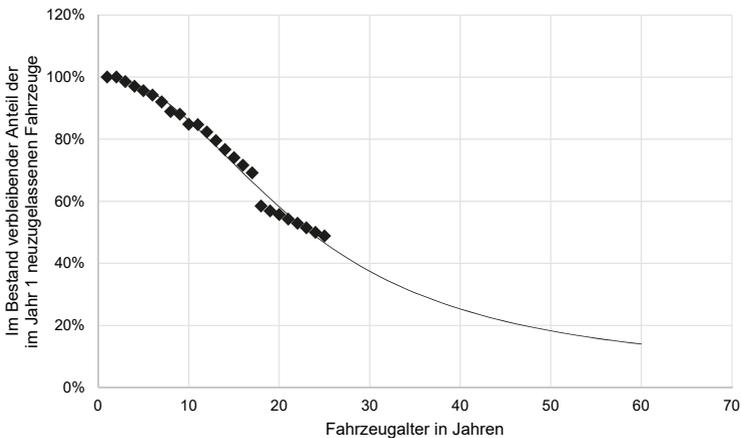
$$y = 0 + \frac{1,000079327 - 3,657468256}{1 + \left(\frac{x}{13,21528363}\right)^{3,657468256}} \quad \boxed{\text{SSD} = 0,02067671}$$

Formel 3: Modellgleichung für die Überlebenswahrscheinlichkeiten des LKW-Bestands

Noch flacher ist die in Abbildung 9 dargestellte Kurve für Krafträder, d. h., es dauert relativ lange, bis sich der Kraftrad-Bestand erneuert.

$$y = 0 + \frac{1,001103923 - 2,172761999}{1 + \left(\frac{x}{22,5615205}\right)^{2,172761999}} \quad \boxed{\text{SSD} = 0,00962959}$$

Abbildung 9: Überlebenswahrscheinlichkeiten der Krafträder nach Altersjahren

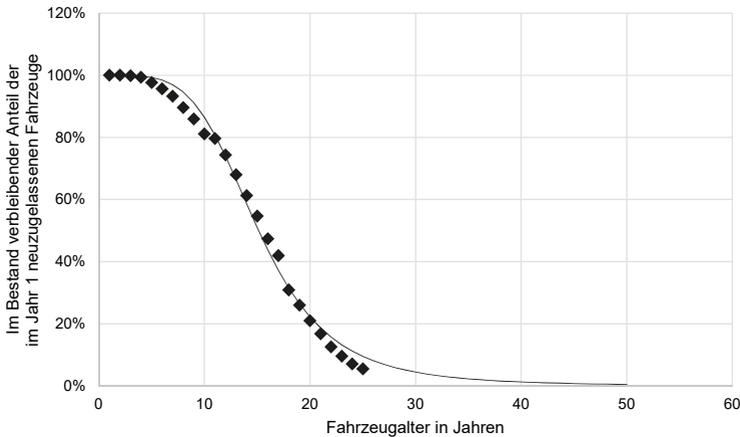


Quelle: Eigene Berechnung auf der Grundlage von Kraftfahrtbundesamt, 2010 & 2011; Die Diskontinuitäten in der Datenreihe beim Altersjahr 10 und 17 ergeben sich aus geänderten Fahrzeugtyp-Zuordnungen.

Der Omnibus-Bestand erneuert sich rascher als der von PKW. Nach etwa 25 Jahren hat sich gemäß Abbildung 10 der Bestand größtenteils erneuert.

$$y = 0 + \frac{1,0000046744625 - 4,49569504542847}{1 + \left(\frac{x}{15,1337148124948}\right)^{4,49569504542847}}$$

Abbildung 10: Überlebenswahrscheinlichkeiten der Omnibusse nach Altersjahren



Quelle: Eigene Berechnung auf der Grundlage von Kraftfahrtbundesamt, 2010 & 2011; Die Diskontinuitäten in der Datenreihe beim Altersjahr 10 und 17 ergeben sich aus geänderten Fahrzeugtyp-Zuordnungen.

Mithilfe der Überlebenswahrscheinlichkeiten lässt sich die Anzahl der Neuzulassungen für jeden Fahrzeugtyp berechnen. Die Anzahl der Neuzulassungen ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Fahrzeugbedarf im Betrachtungsjahr $x+1$ und der Differenz zwischen dem Fahrzeugbestand im Jahr x und der Anzahl der Fahrzeuge, die im Jahr $x+1$ aufgrund ihres Alters aus dem Bestand ausscheiden.

Die neuzugelassenen Fahrzeuge verfügen über unterschiedliche Antriebe: Dazu zählen sowohl Antriebe, die mit fossilen Treibstoffen

betrieben werden – z. B. Benzin, Diesel, Compressed Natural Gas (CNG), Liquefied Petroleum Gas (LPG) – als auch Fahrzeuge mit alternativen Antrieben, die auf regional erzeugter erneuerbarer Energie beruhen (elektrischer Antrieb, Biotreibstoffe, synthetisch erzeugtes CNG und LPG, Wasserstoff, der unter Verwendung von regional erzeugtem, erneuerbarem Strom gewonnen wird). Die prognostizierten Anteile der verschiedenen Antriebsarten und ihre Veränderung im Zeitverlauf variieren je nach den Stellwerten der Szenarien, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden.

5.4 Schienenverkehrsmodell

Das Schienenverkehrsmodell ermittelt die Fahrleistung des Schienenverkehrs basierend auf den Modal-Split-Szenarien und Hochrechnungen zur Entwicklung des Güterverkehrs.

Es wird davon ausgegangen, dass sich die Anteile des Fern- und des Nahverkehrs im Zeitverlauf nicht verändern. Ebenso werden die Kapazität und die Auslastung der Fahrzeuge des Schienenpersonenverkehrs als konstant angesehen. Dementsprechend verändert sich die Fahrleistung des Personenfern- und des Personennahverkehrs im gleichen Maße wie die im Modal-Split-Modell berechnete Verkehrsleistung des Schienenpersonenverkehrs.

Als variabel wird außerdem das Verhältnis der auf elektrifizierten und auf nichtelektrifizierten Strecken erbrachten Fahrleistung angesehen, wobei dies nur die deutsche Teilregion betrifft, da das Streckennetz in den österreichischen, liechtensteinischen und schweizerischen Teilregionen schon im Basisjahr vollständig elektrifiziert war. Im Hinblick auf das deutsche Streckennetz werden in den Szenarien unterschiedliche Annahmen zum Grad der zukünftigen Elektrifizierung getroffen, wobei aufgrund derzeit stattfindender Streckenelektrifizierungen in der deutschen Teilregion deutlich ist, dass der Elektrifizierungsgrad zukünftig höher sein wird als heute.

Für den Schienengüterverkehr wird, wie schon für den Straßengüterverkehr, davon ausgegangen, dass sowohl die Verkehrsleistung als auch die Fahrleistung bis zum Jahr 2050 um 50 % zunehmen werden. Zusätzliche Streckenelektrifizierungen werden ebenso wie für den Schienenpersonenverkehr berücksichtigt.

Sowohl für den Schienenpersonen- als auch für den Schienengüterverkehr werden teilregionale und gesamtregionale Ergebnisse berechnet.

5.5 Verkehrsenergieverbrauchsmodell

Das Verkehrsenergiebedarfsmodell berechnet den Endenergiebedarf des Straßen- und Schienenverkehrs. Es unterscheidet zwischen den Verkehrsmitteln »Krafträder«, »PKW«, »Omnibusse«, »Leichte Straßengüterverkehrsfahrzeuge (LGF)«, »Schwere Straßengüterverkehrsfahrzeuge (SGF)«, »Schienenpersonenfernverkehr (SPFV)«, »Schienenpersonennahverkehr (SPNV)« und »Schienengüterverkehr (SGF)« sowie zwischen den Treibstoffarten »Benzin«, »Diesel«, »Flüssiggas (LNG)«, »Gas (CHP)«, »Elektrizität« und »Wasserstoff«. Die Energieverbräuche der verschiedenen Fahrzeugtypen werden zunächst getrennt für jede Antriebsart berechnet. Sie werden anschließend nach Treibstoffarten und nach Fahrzeugarten aggregiert.

Der jährliche Endenergieverbrauch eines Fahrzeugs hängt von verschiedenen Faktoren ab. Hierzu zählen insbesondere der Fahrzeugtyp, der spezifische Kraftstoffverbrauch dieses Fahrzeugtyps pro Kilometer und die Jahresfahrleistung des Fahrzeugs. Bei einem längeren Betrachtungszeitraum ist ferner davon auszugehen, dass sich der technologische Fortschritt effizienzsteigernd auswirkt. Der Endenergieverbrauch aller Fahrzeuge des Typs A eines bestimmten Zulassungsjahres x mit der Antriebsart B berechnet sich dementsprechend folgendermaßen:

$$\begin{aligned} & \text{Endenergieverbrauch der Fahrzeuge} \\ & \text{des Typs A mit dem Antrieb B} \\ & \text{des Zulassungsjahres x im Jahr y} \\ & = \\ & \text{Anzahl der Fahrzeuge des Typs A mit dem Antrieb B} \\ & \text{des Zulassungsjahres x im Jahr y} \\ & * \\ & \text{Durchschnittliche Jahresfahrleistung} \\ & \text{eines Fahrzeugs des Typs A} \\ & * \\ & \text{Verbrauchsfaktor für Fahrzeuge des Typs A mit dem Antrieb B} \\ & * \\ & \text{Effizienzfaktor für das Zulassungsjahr y} \end{aligned}$$

Der Endenergieverbrauch aller Fahrzeuge des Fahrzeugtyps A mit dem Antrieb B berechnet sich dementsprechend wie folgt:

$$\begin{aligned}
 & \text{Endenergieverbrauch aller Fahrzeuge} \\
 & \text{des Typs A mit dem Antrieb B} \\
 & \text{im Jahr } x \\
 & = \\
 & \text{Endenergieverbrauch aller Fahrzeuge} \\
 & \text{des Typs A mit dem Antrieb B} \\
 & \text{mit dem Zulassungsjahr } y=1 \\
 & + \\
 & \text{Endenergieverbrauch aller Fahrzeuge} \\
 & \text{des Typs A mit dem Antrieb B} \\
 & \text{mit dem Zulassungsjahr } y=2 \\
 & + \\
 & \text{Energieverbrauch aller Fahrzeuge} \\
 & \text{des Typs A mit dem Antrieb B} \\
 & \text{mit dem Zulassungsjahr } y=n
 \end{aligned}$$

Um aus den Fahrleistungen der verschiedenen Verkehrsmittel auf ihren Kraftstoff- und Energieverbrauch und die daraus resultierenden CO₂-Emissionen schließen zu können, sind Verbrauchs- und Emissionsfaktoren notwendig. Im Rahmen der Arbeit werden Verbrauchs- und Emissionsfaktoren aus verschiedenen Quellen herangezogen. Hierzu zählen die Emissions- und Verbrauchsdatenbank HBEFA, die ECOINVENT-Datenbank und der MOBITOOL-Vergleichsrechner (UBA Berlin et al. 2010; Althaus & Gauch 2010; Tuchschnid & Halder 2010). Die verwendeten Verbrauchs- und Emissionsfaktoren sind in Anhang 3: Verbrauchs- und Emissionsfaktoren aufgelistet.

5.6 Space Type Energy Model (STEM)

Auf der Ebene des Gesamtenergiesystems wird das STEM (Everding & Kloos, 2007; Genske, Jödecke & Ruff, 2009) verwendet. STEM ist ein Simulationsmodell für städtische und regionale Energiesysteme, welches alle Verbrauchssektoren und Energieformen berücksichtigen kann und somit eine ganzheitliche Analyse und Simulation städtischer und regionaler Energiesysteme ermöglicht. Es wurde zunächst für eine Studie

des deutschen Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung entwickelt, in der das Potenzial städtischer Freiflächen für die Erzeugung erneuerbarer Energie untersucht wurde. Anschließend wurde STEM in verschiedenen Modellräumen angewendet und weiterentwickelt. Zu diesen Modellräumen zählten unter anderem Hamburg-Wilhelmsburg, wo ein Energieatlas für die Internationale Bauausstellung erstellt wurde, der Kanton Basel-Stadt, die Stadt Villach, der Landkreis Osnabrücker Land, die Planungsregion Nordthüringen, die Stadt Nordhausen und der Freistaat Thüringen (Genske & Messari-Becker, 2013). In der Bodenseeregion kam das Modell zunächst für die Studie »Erneuerbares Liechtenstein« und anschließend im Rahmen des Forschungsprojekts »BAER – Bodensee-Alpenrhein Energieregion« zur Anwendung (Droege et al., 2012; Droege et al., 2014). STEM bildet den Energieverbrauch und das erneuerbare Energieerzeugungspotenzial von Gemeinden und Regionen ab und erlaubt die Berechnung und Bewertung von Energie- und Klimaschutzszenarien. Das Modell eignet sich in besonderem Maße für die städtische und regionale Energieplanung, da es Geoinformationssystem-(GIS)gestützt ist und somit räumliche Aspekte sowohl bei der Ermittlung von Energiebedarfen und bei der Erhebung städtischer und regionaler Potenziale für die Gewinnung erneuerbarer Energie berücksichtigt (Genske & Messari-Becker, 2013).

Ausgangspunkt für die Modellierung ist eine regionale Energiebilanz. Bevor Szenarien berechnet werden können, muss zunächst diese Energiebilanz erarbeitet werden. Dabei werden alle für den Modellraum relevanten Energie- und Energieträgerflüsse betrachtet. Grundlage dieser Analyse sind Daten aus Erhebungen und Messungen im Modellraum sowie übergeordnete statistische Verbrauchsdaten. Anschließend wird das Modellgebiet in sogenannte »energetische Homogenbereiche« gegliedert, die im Hinblick auf ihren Energieverbrauch und ihr Potenzial für die Erzeugung erneuerbarer Energien vergleichbar sind. In Studien, in denen einzelnen Städte und Gemeinden untersucht wurden, handelte es sich bei den energetischen Homogenbereichen um sog. Stadtraumtypen, d. h. um städtebaulich ähnlich strukturierte Quartiere, sowie um Freiraumtypen, z. B. Wald (Energie für die Waldpflege/Hektar und energetische Nutzung von Waldpflegeholz/Hektar) (Genske & Messari-Becker, 2013). Bei Studien auf der regionalen Ebene dienen Gemeindetypen als

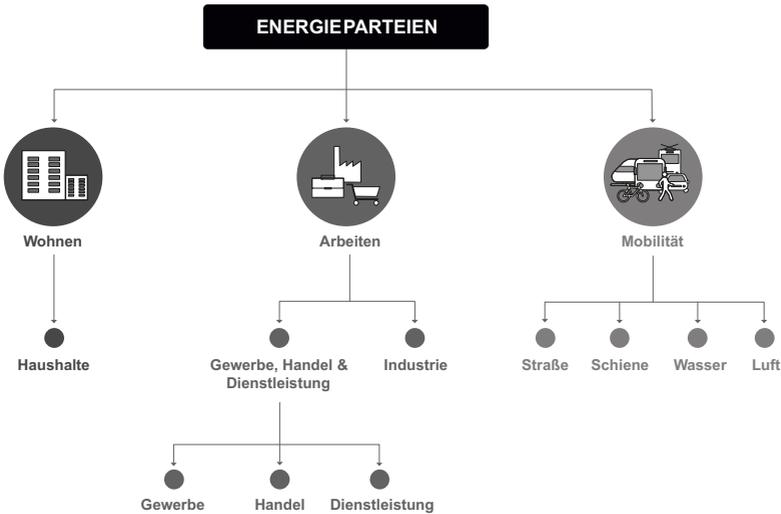
energetische Homogenbereiche (z. B. Droege et al., 2014). Für die energetischen Homogenbereiche werden anschließend die Bruttogeschossflächen als Eingabedaten für STEM ermittelt. Diese Flächen werden in mehreren Schritten mit für den Modellraum typischen Faktoren modelliert, um daraus die stadtraumspezifische Energiebezugsfläche abzuleiten. Diese weist einen charakteristischen Energiebedarf (Wärme, Strom, Treibstoffe) pro Quadratmeter auf.

Die Gewinnung erneuerbarer Energie erfordert Flächen. Für die Entwicklung von Szenarien müssen dementsprechend die Flächenressourcen im Untersuchungsgebiet bestimmt, quantifiziert und hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit bewertet werden. Eine Option der Energieerzeugung kann als umso effizienter und nachhaltiger gelten, je weniger Fläche sie beansprucht und je mehr regenerative Energie mit ihr erzeugt werden kann (Genske et al., 2009; Genske, Henning-Jacob, Joedecke & Ruff, 2010b; Genske, Henning-Jacob, Joedecke & Ruff, 2010a). Das integrierte Energiemodell STEM ermöglicht eine raumzeitliche energetische Analyse eines Modellraums hinsichtlich seines Energiebedarfs und seiner regenerativen Energie- und Wertschöpfungspotenziale. Es deckt alle Energieparteien (neben Mobilität auch Wohnen und Arbeiten) und alle Energieformen (Strom, Wärme, Treibstoffe) ab. Es ermöglicht auch die Berücksichtigung von gegenseitigen Wechselwirkungen und Abhängigkeiten, wie die Nutzungskonkurrenz zwischen Sonnenkollektoren und Photovoltaik oder den Stromverbrauch von Wärmepumpen.

STEM-Nachfragemodul:

Auf der Grundlage der Stadtraumtypen lässt sich der Energiebedarf einer Stadt oder einer Region ermitteln. Die Ermittlung des Energiebedarfs erfolgt mit Hilfe des STEM durch Abgleich mit der Energiebilanz des Untersuchungsraumes. Anschließend werden die bilanzierten Energieströme (Wärme, Strom, Treibstoffe) den verschiedenen Energieparteien (siehe Abbildung 11) zugeordnet und auf die Energiebezugsflächen verteilt.

Abbildung 11: Energieparteien im Space Type Energy Modell (STEM)



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Everding, Genske & Ruff, 2020.

Bei der Ermittlung des Energiebedarfs können mehrere Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Hierzu zählen Einwohnerentwicklung, Effizienzsteigerungen aufgrund von technologischen Innovationen und gesetzlichen Vorgaben, Veränderungen des Modal-Splits sowie Veränderungen der Durchschnittstemperatur aufgrund des Klimawandels und damit des Heizwärmebedarfs.

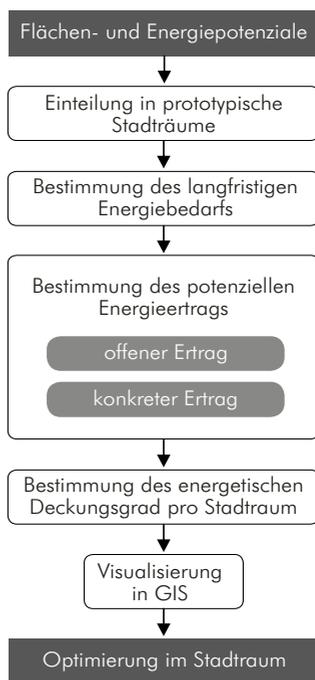
STEM-Angebotsmodul:

Das Angebotsmodul in STEM dient der Ermittlung des Potenzials für die Erzeugung erneuerbarer Energie. Dieses Potenzial wird ebenfalls auf der Basis der Stadt- und Landschaftsraumtypen ermittelt. So beeinflussen städtebauliche Parameter wie Gebäudehöhen und abstände, Dachformen, die Plastizität der Fassaden und Standorte, Dichte und Höhen von Baumpflanzungen sowie Vorgaben des Denkmalschutzes das Potenzial eines Stadtteils für die Gewinnung von Solarenergie. Die Methode zur Potenzialermittlung mittels Stadtraumtypen wurde erstmals in der Studie »Leitbilder und Potenziale eines solaren Städtebaus« (Everding et al., 2004; Everding, 2007) beschrieben und danach im Rahmen des Forschungsprojektes »Nutzung städtischer Freiflächen für erneuerbare Energien« (BBR/BBSR & BMVBS, 2009b) weiterentwickelt. Das Vorgehen ihrer Anwendung ist in Abbildung 12 dargestellt. Auch für jeden Landschaftsraumtyp werden Potenziale für die erneuerbare Energieerzeugung bestimmt. Dazu gehören z. B. Windkraft, Wasserkraft, Biomasse, Tiefengeothermie und Wärmepumpen, die natürliche Gewässer nutzen. Im Modell wird zwischen diffusen und konkreten Potenzialen unterschieden.

Diffuse Potenziale sind solche, die keine neuen Oberflächen verbrauchen, da sie in den Stadtraum integriert werden können. Sie sind siedlungsraumtypisch

Abbildung 12:

Vorgehensweise zur Ermittlung der städtischen Flächen- und Energiepotenziale



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Genske et al., 2009.

und umfassen insbesondere die solare Nutzung (dach- und fassadenintegrierte PV-Anlagen), die Nutzung von Erd- und Umgebungswärme, die Nutzung von Abwasserwärme und die Nutzung von Brennholz. Zu den konkreten Potenzialen zählen solche, die einen zusätzlichen Flächenbedarf aufweisen und daher nicht in den Stadtraum integrierbar sind. Dazu zählen beispielsweise PV-Freiflächenanlagen, Windparks, Wasserkraftanlagen, geothermische Heizkraftwerke sowie Biomasse- und Blockheizkraftwerke.

STEM-Szenariomodul:

Mit dem Energiemodell STEM können Szenarien zur Entwicklung von Energieverbrauch und regionaler Erzeugung von erneuerbarer Energie gerechnet werden. Auf diese Weise lassen sich Aussagen zum künftig erreichbaren Selbstversorgungsgrad mit erneuerbarer Energie treffen. Sinnvolle regenerative Energieimporte lassen sich ebenfalls berücksichtigen. Neben der Bedarfs- und Potenzialermittlung erfolgt auch eine Ermittlung von CO₂- und anderen Treibhausgasemissionen entsprechend dem Kyoto-Protokoll oder den Vorgaben des europäischen »Konvents der Bürgermeister«.

Bei den Szenarien handelt es sich um keine Prognosen, sondern um in sich schlüssige alternative Entwicklungspfade in der Zukunft. Sie dienen dem »Decision Support«, d. h., sie können politische Entscheidungsprozesse durch die Bereitstellung von Daten zu Entscheidungsalternativen unterstützen.

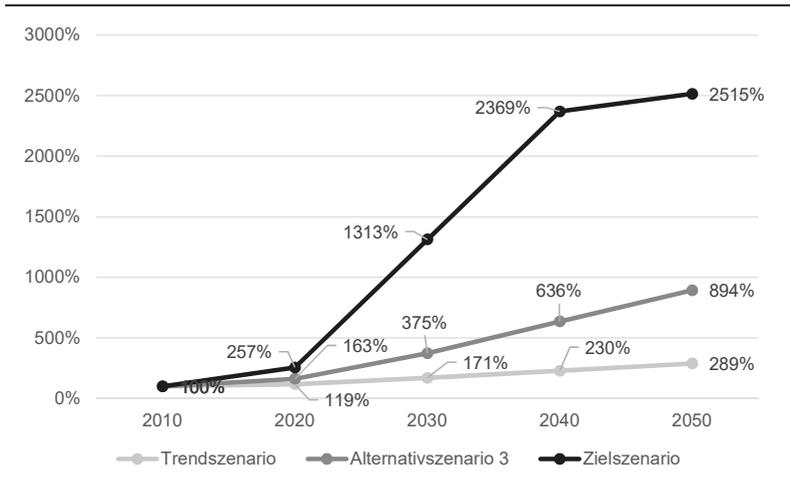
Alle Ergebnisse können einschließlich ihrer Entwicklung im Zeitverlauf mittels GIS visualisiert und als Kartenwerk dargestellt werden.

5.7 Verknüpfung der Modelle

Im Rahmen der Arbeit müssen das räumliche Energiesystemmodell STEM und das Verkehrsenergiebedarfsmodell miteinander verknüpft werden. Dies erfolgt über zwei Schnittstellen:

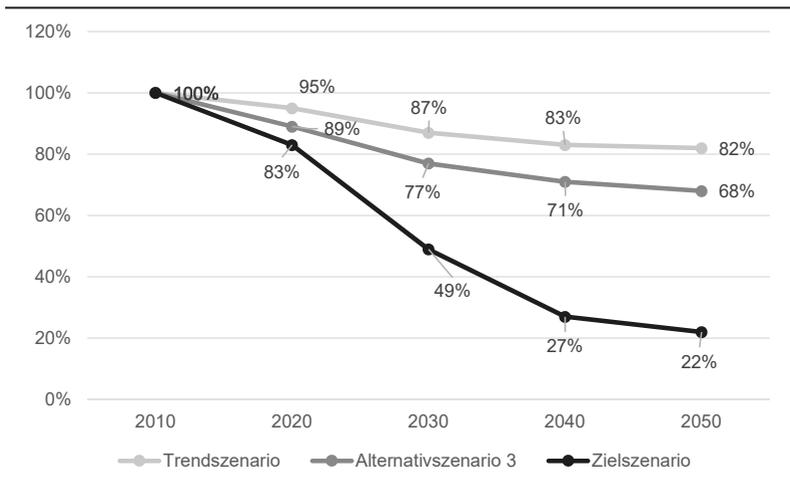
- ▶ Zum einen wird der Endenergieverbrauch der Mobilität im Basisjahr, differenziert nach den Energieträgern Benzin, Erdgas und Flüssiggas, in das räumliche Energiemodell STEM übernommen.

Abbildung 13: Entwicklungspfade für den Strombedarf der Mobilität 2010-2050



Quelle: Eigene Berechnung.

Abbildung 14: Entwicklungspfade für den Kraftstoffbedarf der Mobilität 2010-2050



Quelle: Eigene Berechnung.

- Zum anderen werden für jedes Szenario zwei spezifische Entwicklungspfade für den Endenergieverbrauch an das STEM-Modell übergeben, und zwar je einen Entwicklungspfad für den Treibstoffverbrauch und für den Stromverbrauch. Diese Entwicklungspfade werden im Verkehrsenergieverbrauchsmodell berechnet und beschreiben, wie sich der Treibstoff- und der Strombedarf der Mobilität bis zum Jahr 2050 im Verhältnis zum Basisjahr, also prozentual, entwickelt. Die Entwicklungspfade sind in Tabelle 3 und in Abbildung 13 (Strombedarf) und Abbildung 14 (Treibstoffbedarf) dargestellt.

Tabelle 3: Entwicklungspfade für den Endenergiebedarf der Mobilität 2010-2050

Szenario	Energieträger	2010	2020	2030	2040	2050
Trendszenario	Strom	100 %	119 %	171 %	230 %	289 %
	Kraftstoffe	100 %	95 %	87 %	83 %	82 %
Alternativ-szenario 3	Strom	100 %	163 %	375 %	636 %	894 %
	Kraftstoffe	100 %	89 %	77 %	71 %	68 %
Zielszenario	Strom	100 %	257 %	1313 %	2369 %	2515 %
	Kraftstoffe	100 %	83 %	49 %	27 %	22 %

Quelle: Eigene Berechnung.

6 Analyse der Schlüsselfaktoren

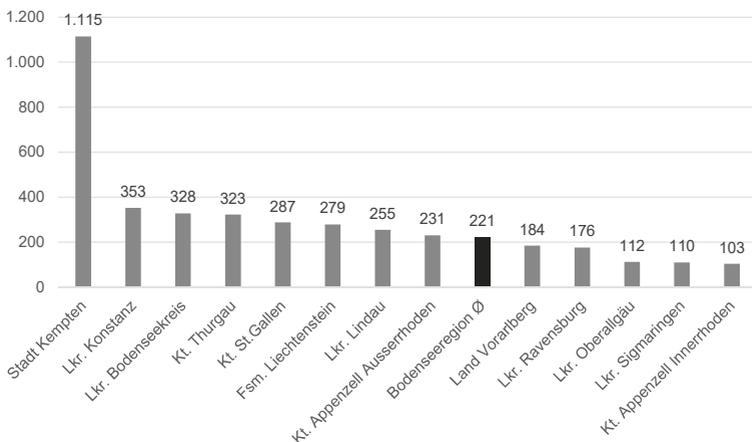
In diesem Kapitel wird beschrieben, wie die Input-Daten für die im vorherigen Kapitel beschriebenen Modelle gewonnen werden können und wie sich die Bodenseeregion im Jahr 2010 hinsichtlich Verkehrsverhalten, Fahrzeugbeständen und Antriebsarten, Energieverbrauch und CO₂-Emissionen der Mobilität sowie den Potenzialen für die Gewinnung erneuerbarer Energie darstellte.

6.1 Geografie und Siedlungsstruktur der Bodenseeregion

Die Bodenseeregion hat eine Gesamtfläche von etwa 12.430 km². Davon entfallen 90 % auf den Dauersiedlungsraum und etwa 10 % auf unproduktive Flächen, d. h. auf Wasserflächen sowie auf landwirtschaftlich nicht nutzbare alpine Regionen (Statistikplattform Bodensee, 2020).

Größte Stadt der Region ist Konstanz mit rund 85.000 Einwohnern, gefolgt von St. Gallen (76.000 Einwohnern), Kempten im Allgäu (69.000 Einwohner), Friedrichshafen (61.000 Einwohner), Ravensburg und Dornbirn (jeweils rund 50.000 Einwohner). Weitere größere Städte

Abbildung 15: Siedlungsdichte nach NUTS-3-Regionen 2015



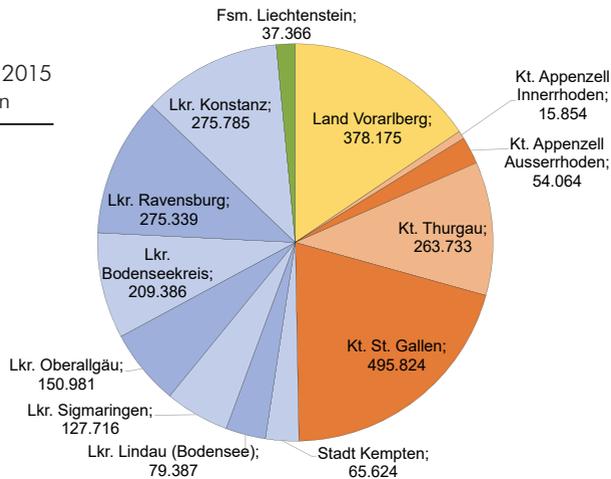
Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Statistikplattform Bodensee, 2019a.

der Region sind Singen (Hohentwiel), Feldkirch und Bregenz. Die Siedlungsdichte der Bodenseeregion beträgt 221 Einwohner/km². Die höchste Siedlungsdichte der Teilregionen weist die schweizerische Teilregion mit 283 Einwohnern/km² auf, gefolgt von Liechtenstein (279 Einwohnern/km²), der deutschen Teilregion (203 Einwohner/km²) und Vorarlberg (183 Einwohner/km²). Bei einer Betrachtung der Siedlungsdichte auf der Ebene der NUTS-3-Regionen zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den teilweise urbanisierten NUTS-3-Regionen am Bodenseeufer und im Rheintal (Landkreise Konstanz, Bodenseekreis und Lindau, Kantone Thurgau und St. Gallen, Fürstentum Liechtenstein) und dem ruraleren Hinterland (Kantone Appenzell Auserrhoden und Innerrhoden, Landkreise Ravensburg, Oberallgäu und Sigmaringen).

6.2 Bevölkerungsentwicklung

Die Bodenseeregion hat 2,43 Millionen Einwohner. Etwas weniger als die Hälfte davon lebt in der deutschen Teilregion, etwa ein Drittel in der schweizerischen Teilregion, etwa 16 % im österreichischen Vorarlberg und 1,5 % in Liechtenstein (EUROSTAT, 2016). Die Bevölkerung ist in den letzten Jahrzehnten beständig gewachsen. Eine Aufschlüsselung der Bevölkerung nach NUTS-3-Regionen für das Jahr 2015 ist Abbildung 16 zu entnehmen.

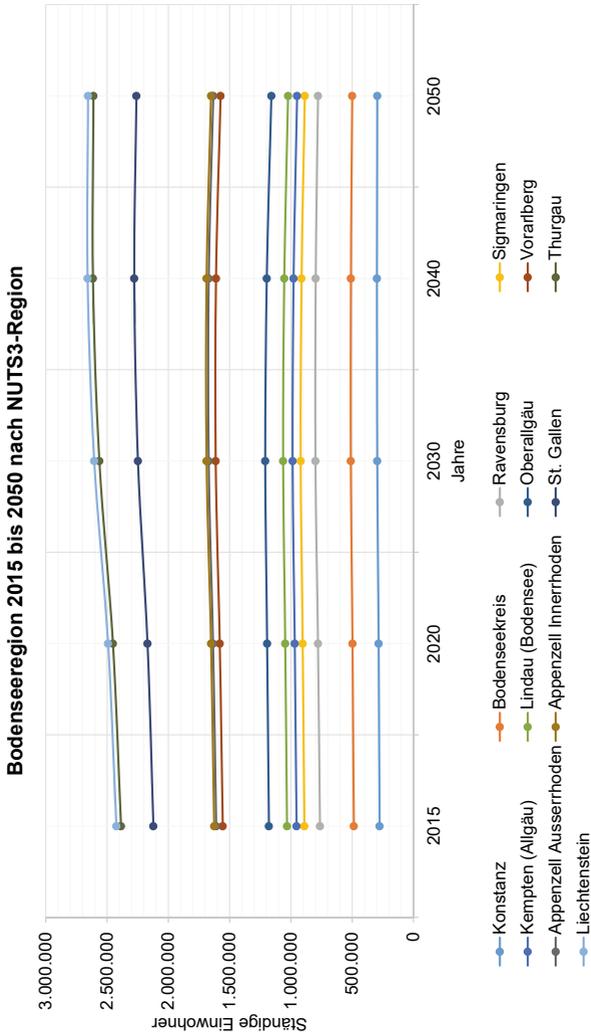
Abbildung 16:
Bevölkerung der
Bodenseeregion 2015
nach Teilregionen



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Statistikplattform Bodensee, 2019a.

Entsprechend den Bevölkerungsprognosen der europäischen Statistikbehörde EUROSTAT und des liechtensteinischen Amtes für Statistik wird sich das in den letzten Jahren verzeichnete Bevölkerungswachstum fortsetzen, sodass bis zum Jahr 2050 mit einer Bevölkerung von etwa 2,66 Millionen Einwohner zu rechnen ist (siehe Abbildung 17).

Abbildung 17: Bevölkerungsvorausrechnung (EUROSTAT-Hauptszenario) für die Bodenseeregion 2015 bis 2050 nach NUTS-3-Regionen

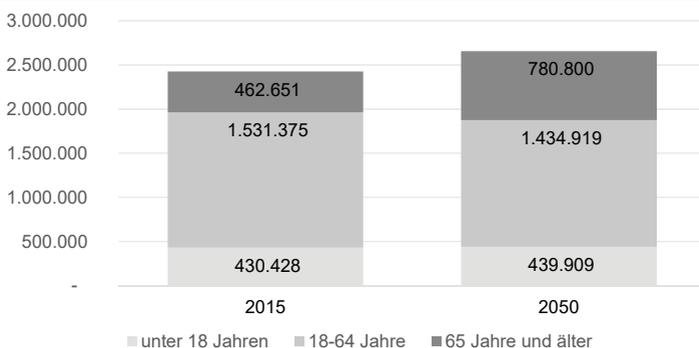


Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von EUROSTAT, 2016.

Die prognostizierte Zunahme der Bevölkerung ist vor allem auf das starke Bevölkerungswachstum in den Kantonen Thurgau, St. Gallen, in Vorarlberg und im Kreis Konstanz zurückzuführen. Appenzell-Ausserrhoden, Appenzell-Innerrhoden, und Liechtenstein sollen ebenfalls stark wachsen, ihr Beitrag ist in absoluten Zahlen aber relativ gering. Der Kreis Ravensburg, die Stadt Kempten und der Bodenseekreis sollen ihre Einwohnerzahl weitgehend halten. In den Kreisen Lindau, Oberallgäu und Sigmaringen ist von einer Abnahme der Bevölkerung auszugehen (EUROSTAT, 2016, Amt für Statistik, 2009).

Bis 2050 wird sich der demographische Wandel auch in der Bodenseeregion auswirken. So wird sich der Anteil der über 65-Jährigen von 19,1 % im Jahr 2015 auf 29,4 % im Jahr 2050 erhöhen (EUROSTAT, 2016; Amt für Statistik, 2009).

Abbildung 18: Altersstruktur der Bodenseeregion 2015 und 2050



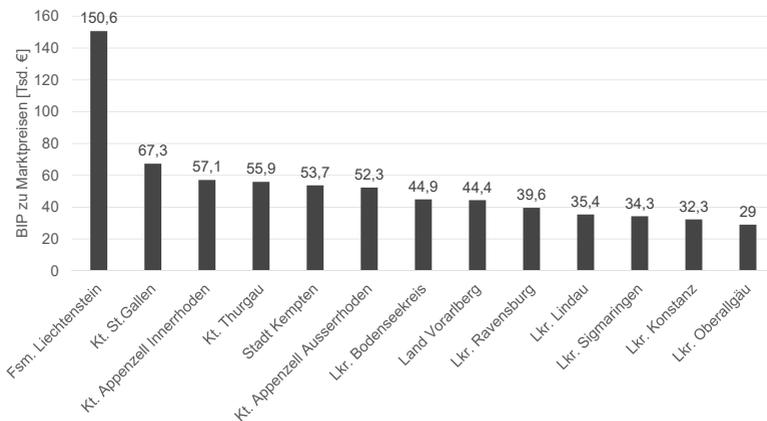
Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von EUROSTAT, 2016, Amt für Statistik, 2009.

6.3 Wirtschaftliche Entwicklung

Der Wohlstand der Bodenseeregion ist auf einen starken Mittelstand zurückzuführen. Das Bruttoinlandsprodukt zu Marktpreisen liegt durchschnittlich bei etwa 60.000 € pro Kopf, wobei es erhebliche intraregionale Unterschiede gibt, wie aus Abbildung 19 hervorgeht. An der Spitze liegt mit großem Abstand das Fürstentum Liechtenstein mit 150.600 € pro Kopf. Dieser hohe Wert ist auf die Funktion Liechtensteins

als Finanzstandort, auf den starken schweizerischen Franken, aber auch auf die große Anzahl an Einpendlern nach Liechtenstein zurückzuführen. An zweiter Stelle steht der Kanton St. Gallen mit einem BIP von 67.300 € pro Kopf. Es folgen die übrigen schweizerischen Kantone, die Stadt Kempten und der stark industrialisierte Bodenseekreis. Am Ende der Skala befindet sich der Landkreis Oberallgäu mit einem BIP von 29.000 € pro Kopf (Statistikplattform Bodensee, 2019b).

Abbildung 19: Bruttoinlandsprodukt der NUTS-3-Regionen zu laufenden Marktpreisen 2016



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Statistikplattform Bodensee, 2019b.

Es gibt keine grenzüberschreitende langfristige Wirtschaftsprognose für die Bodenseeregion. Daher wird in dieser Arbeit angenommen, dass sich die deutsche, österreichische und schweizerische Teilregion langfristig so entwickeln werden wie die entsprechenden Volkswirtschaften und dass die liechtensteinische Volkswirtschaft sich langfristig so entwickeln wird wie die schweizerische Volkswirtschaft, mit der sie eng verknüpft ist. Die britische Economist Intelligence Group veröffentlicht in unregelmäßigen Abständen Zahlen zu den Wachstumsaussichten europäischer und internationaler Volkswirtschaften. Für die Bodenseeanrainerstaaten geht sie mittel- bis langfristig von einem jährlichen Zuwachs

des Bruttoinlandsprodukts pro Kopf zwischen 0,6 und 1,3 Prozent pro Jahr aus (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Geschätztes Wachstum des BIP pro Kopf in den Bodensee-Anrainerstaaten 2015-2050

	2015-2030	2031-2050	2015-2050
Deutschland	1,3 %	1,3 %	1,3 %
Österreich	1,0 %	1,0 %	1,0 %
Schweiz	0,6 %	0,8 %	0,7 %

Quelle: Economic Intelligence Group, 2016a,b,c.

6.4 Verkehrsverhalten

Um das Verkehrsmittelwahl zu beschreiben, werden Befragungsdaten aus Erhebungen zum Verkehrsverhalten benötigt. Da es keine Befragung für die Bodenseeregion gibt, werden regionalisierte Datensätze aus zwei nationalen Erhebungen (Schweiz, Deutschland) und einer teilregionalen Erhebung (Vorarlberg) ausgewertet. Um eine annähernde Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten, werden die Wegedatensätze der unterschiedlichen Mobilitätserhebungen mit Hilfe des Statistikprogramms SPSS ausgewertet. Gegenstand der Analyse sind Wege mit einer Länge < 100 km. Wege mit einer größeren Länge werden nicht betrachtet, da sie nicht in allen Mobilitätserhebungen vollständig erfasst wurden. Die Verkehrsmittelkategorien werden in allen Rohdatensätzen angeglichen, um eine annähernde Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erreichen.

Verkehrsverhalten in der österreichischen Teilregion:

Für Vorarlberg gibt es eine landesweite Erhebung mit Verdichtungen für Teilregionen (Herry Consult GmbH, 2009a,b). Die Ergebnisse für die österreichische Teilregion beruhen auf der Befragung von 8.380 Personen. Dies entspricht 2,3 % der Einwohner des Jahres 2008.

Der Wegedatensatz der Erhebung »Mobil in Vorarlberg« weist sieben Verkehrsmittelarten aus, die nahezu unverändert übernommen werden können. Lediglich die Kategorien 4 »PKW-Lenker« und 5 »PKW-Mitfahrer« müssen zu einer Kategorie zusammengefasst werden (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5: Merkmal „Verkehrsmittel“ im Wegedatensatz „Mobilität in Vorarlberg“

Merkmale im Datensatz (Herry Consult GmbH, 2009b)		Neue Verkehrsmittelgruppen	
Nr.	Verkehrsmittel	Nr. NEU	Verkehrsmittelgruppen
1	Zu Fuß	1	Zu Fuß
2	Rad	2	Rad
3	Mofa, Motorrad	3	Kraftrad
4	PKW-Lenker	4	Auto
5	PKW-Mitfahrer		
7	Bahn, S-Bahn	5	Bahn
6	Bus	6	Bus
8	Sonstige	7	Andere

Quelle: Eigene Darstellung.

Pro Tag waren die Befragten durchschnittlich 73,7 Minuten pro Tag unterwegs, davon etwa die Hälfte der Zeit (36,1 Minuten) mit dem privaten PKW. 22,5 Minuten bewegten sie sich zu Fuß oder mit dem Fahrrad fort und 13,7 Minuten mit öffentlichen Verkehrsmitteln (Bus und Bahn). Bei den Distanzen dominiert ebenfalls der private PKW mit 20,8 km, gefolgt von den öffentlichen Verkehrsmitteln (5,0 km) und dem Fuß- und Radverkehr (2,4 km). Die durchschnittliche Tagesdistanz liegt bei 28,7 km, die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit bei 23,3 km/h.

Mobilitätsverhalten in der schweizerischen Teilregion und im Fürstentum Liechtenstein:

In der Schweiz wird regelmäßig eine nationale Erhebung zum Verkehrsverhalten durchgeführt, der »Mikrozensus Verkehr und Mobilität 2010« (Bundesamt für Statistik [BfS] & Bundesamt für Raumentwicklung [ARE], 2007), für die auch Personen aus der Bodenseeregion nach ihrem Verkehrsverhalten befragt werden. Die Ergebnisse für die Bodenseeregion werden aber nicht gesondert veröffentlicht. Um das Verkehrsverhalten in der schweizerischen Teilregion zu analysieren, wird eine Stichprobe aus dem Wegedatensatzes des Mikrozensus Verkehr

2010 betrachtet. Die Stichprobe enthält alle Wege < 100 km, die von Befragten mit Hauptwohnsitz in den Kantonen Appenzell-Ausserrhodon, Appenzell-Innerrhodon, St. Gallen und Thurgau zurückgelegt wurden. Dabei handelt es sich um 6,321 Befragte. Dies entspricht 0,8 % der Bevölkerung im Jahr 2010, dem Jahr der Befragung. Der durchschnittliche Befragte war 75,1 Minuten am Tag unterwegs und legte eine Distanz von 28,5 km zurück. Die mittlere Reisegeschwindigkeit betrug 22,8 km/h. Der Wegedatensatz unterscheidet 17 verschiedene Verkehrsmittel. Diese werden zu sieben Verkehrsmittelgruppen zusammengefasst (siehe Tabelle 6), damit die schweizerischen Analyse-Ergebnisse mit denen aus den anderen Teilregionen verglichen werden können.

Durchschnittlich 32,7 Minuten am Tag verbrachten die Befragten im PKW, 28,0 Minuten wurden für den Fuß- und Radverkehr aufgewendet und 11,9 Minuten für Öffentliche Verkehrsmittel. Bei den Distanzen dominiert auch in der schweizerischen Bodenseeregion der PKW mit 19,8 km am Tag, gefolgt vom öffentlichen Nahverkehr mit 5,6 km und dem Fuß- und Radverkehr mit 2,3 km. Auf sonstige Verkehrsmittel entfallen 0,3 km am Tag.

Die Mobilitätserhebung für Liechtenstein (Isopublic Institut für Markt- und Meinungsforschung, 2007) unterscheidet sich in ihrem Untersuchungsdesign deutlich von den Mobilitätserhebungen für Deutschland, die Schweiz und Vorarlberg. Sie erlaubt keine Rückschlüsse auf die Personenverkehrsleistung nach Verkehrsmitteln und somit auch keine Schätzung der spezifischen Verkehrsenergieverbräuche. Dementsprechend können die Daten für diese Arbeit nicht verwendet werden. Um das Verkehrsverhalten in Liechtenstein zu beschreiben, werden in den folgenden Arbeitsschritten ersatzweise die Daten zum Verkehrsverhalten in der schweizerischen Bodenseeregion herangezogen. Dies ist begründbar, da Liechtenstein sowohl siedlungsstrukturelle als auch soziodemographische, ökonomische und kulturelle Ähnlichkeiten mit der Ostschweiz aufweist.

Tabelle 6: Merkmal „Verkehrsmittel“ im Wegedatensatz des MZV 2010

Merkmale im MZV-Datensatz (Bundesamt für Statistik [BfS] & Bundesamt für Raumentwicklung [ARE], 2007)		Neue Verkehrsmittelgruppen	
Nr.	Verkehrsmittel	Nr. NEU	Verkehrsmittelgruppen
15	Zu Fuß	1	Fußgänger
14	Velo	2	Radverkehr
12	Motorrad, Kleinmotorrad	3	Kraftrad
13	Mofa		
9	Auto	4	PKW
10	Lastwagen		
11	Taxi		
2	Bahn	5	Bahn
5	Tram		
3	Postauto	6	Bus
6	Bus		
8	Reisecar		
1	Flugzeug	7	Sonstige Verkehrsmittel
4	Schiff		
7	Sonstiger ÖV		
16	Fahrzeugähnliche Geräte		
17	Andere		

Quelle: Eigene Darstellung.

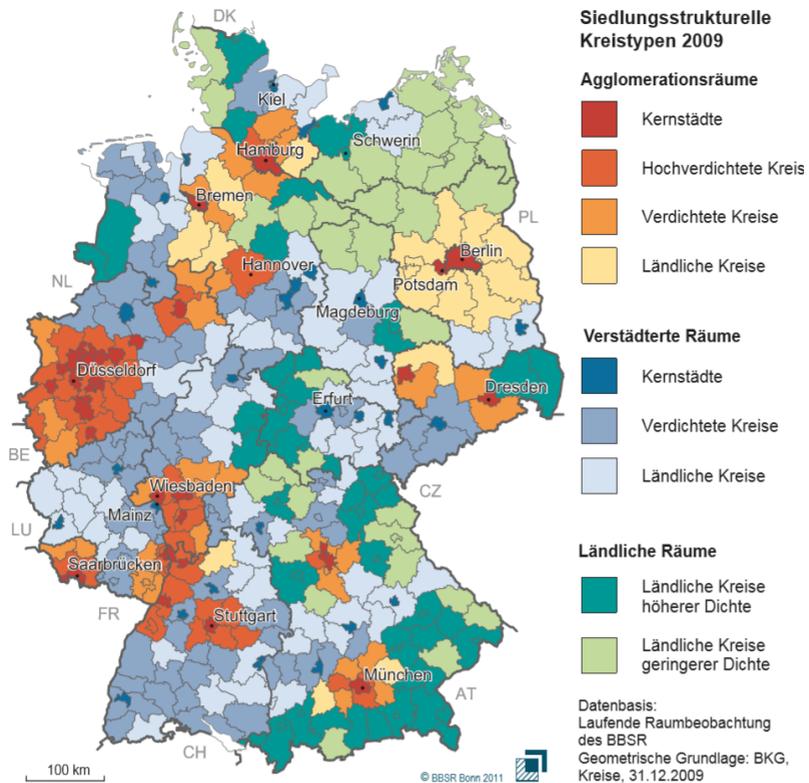
Verkehrsverhalten in der deutschen Teilregion:

In Deutschland wird in mehrjährigen Intervallen die Erhebung »Mobilität in Deutschland (MiD)« durchgeführt, eine nationale Befragung zum Verkehrsverhalten. Für die MiD 2008 (Infas & DLR-Institut für Verkehrsforschung, 2010b), die für diese Arbeit verwendet wird, wurden Haushalte und Personen in ausgewählten Gemeinden, von denen drei in der Bodenseeregion befanden, befragt. Da die Wohnorte der Befragten aus Datenschutzgründen nicht bekanntgegeben werden, ist eine regionalisierte Auswertung der Befragungsdaten jedoch nicht möglich. Der

Wegedatensatz der MiD enthält lediglich ein Merkmal zur Einordnung des Wohnsitzlandkreises der Befragten entsprechend der Kreistypologie des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Stand 2008. Diese Typologie unterteilt das Bundesgebiet in drei verschiedene Raumtypen, die wiederum zwei bis vier Kreistypen beinhalten.

Die Landkreise der deutschen Bodenseeregion gehören zu den Kreistypen 6 »Verstädterter Raum – Verdichtete Kreise«, 7 »Verstädterter Raum – Ländliche Kreise« und 8 »Ländlicher Raum – Ländliche Kreise höherer Dichte« (siehe Abbildung 20 und Tabelle 7). Daher wird in dieser

Abbildung 20: Siedlungsstrukturelle Kreistypen des BBSR



Quelle: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung [BBSR] im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, 2009.

Tabelle 7: Landkreise in der Bodenseeregion gemäß BBSR-Kreistypologie 2008

Nr.	BBSR Kreistyp 2006	Landkreise in der Bodenseeregion
6	Verstädterte Räume – Verdichtete Kreise	Bodenseekreis Konstanz Ravensburg
7	Verstädterte Räume – Ländliche Kreise	Sigmaringen
8	Ländliche Kreise höherer Dichte	Oberallgäu Kempten Lindau

Quelle: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung [BBSR] im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, 2009.

Arbeit das Verkehrsverhalten in der deutschen Teilregion anhand einer Stichprobe aus dem Wegedatensatz der MiD 2008 geschätzt. In dieser Stichprobe sind alle Wege von befragten Personen enthalten, die in einem Landkreis der Typen 6, 7 oder 8 wohnen.

Da es sich bei der MiD 2008 um eine deutschlandweite Befragung handelt, ermöglicht die Auswertung der Stichprobe lediglich allgemeine Aussagen zum Verkehrsverhalten in den betrachteten Kreistypen. Räumliche und soziodemographische Spezifika des Bodenseekreises, der Landkreise Konstanz, Ravensburg, Sigmaringen, Lindau und Oberallgäu oder der Stadt Kempten werden nicht abgebildet. Mangels anderer Datenquellen ist diese Stichprobenauswertung jedoch die einzige Möglichkeit, das Verkehrsverhalten der deutschen Bewohner der Bodenseeregion quantitativ zu beschreiben.

In den Landkreisen der Typen 6, 7 und 8 wurden insgesamt 23.126 Personen befragt. Die Befragten waren durchschnittlich 68,1 Minuten am Tag unterwegs. Davon verbrachten sie 37 Minuten im privaten PKW, 22,6 Minuten mit Zufußgehen und Radfahren, 7,1 Minuten in Öffentlichen Verkehrsmitteln sowie 0,8 Minuten in sonstigen Verkehrsmitteln.

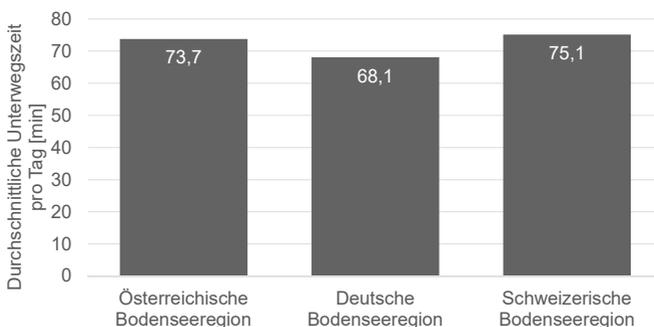
Bei den Distanzen dominiert der PKW, mit dem durchschnittlich 28,0 km zurückgelegt wurden. Es folgten der öffentliche Nahverkehr mit 3,4 km pro Tag, der Fuß- und Radverkehr mit 1,9 km und die sonstigen Verkehrsmittel mit 0,2 km pro Tag.

Alle Auswertungen und Berechnungen erfolgten auf der Grundlage der MiD 2008 und waren durchgeführt worden, bevor die Ergebnisse der MID 2017 veröffentlicht wurden.

Vergleich des Verkehrsverhaltens in den Teilregionen:

Es ist auffällig, dass die durchschnittliche Unterwegszeit in allen betrachteten Teilregionen sehr ähnlich ist. Wie Abbildung 21 zeigt, liegt sie bei 68 Minuten im deutschen Regionsteil, 74 Minuten im österreichischen Regionsteil und 75 Minuten im schweizerischen Regionsteil. Diese Beobachtung stimmt mit der Time-Budget-Theorie (Zahavi & Talavitie, 1980) überein, die postuliert, dass Menschen im Durchschnitt etwa eine Stunde pro Tag unterwegs sind. Empirische Studien belegen die Gültigkeit dieser Hypothese nicht nur für Städte und Regionen der Gegenwart, sondern auch für Städte im historischen Rückblick (Marchetti, 1994). Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Auswertung verschiedener Mobilitätserhebungen zeigt, dass die Time-Budget-Theorie auch für die Bodenseeregion Gültigkeit beanspruchen kann.

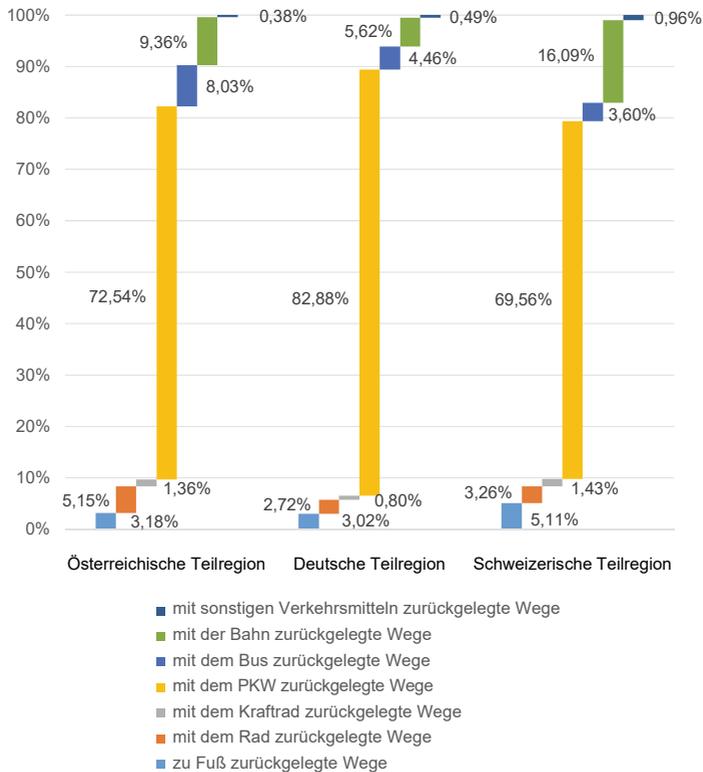
Abbildung 21: Durchschnittliche Unterwegszeit nach Teilregionen



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von BfS & ARE, 2007a; Herry Consult GmbH, 2009b; Infas & DLR, 2010a.

Abbildung 22 zeigt einen Vergleich des Modalsplits (distanzbasierte Berechnung) in den Teilregionen. Das bei weitem dominierende Verkehrsmittel ist in allen drei Regionen der PKW. Auffällig in der österreichischen Teilregion ist der vergleichsweise große Anteil des Busverkehrs. Dies erklärt sich aus dem sehr gut ausgebauten Regionalbusnetz in Vorarlberg bei gleichzeitig geringer Flächenabdeckung des Schienenpersonennahverkehrs. Bemerkenswert ist außerdem der große Anteil des Radverkehrs.

Abbildung 22: Modalsplit (distanzbasiert) nach Teilregionen



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von BfS & ARE, 2007a; Herry Consult GmbH, 2009b; Infas & DLR, 2010a.

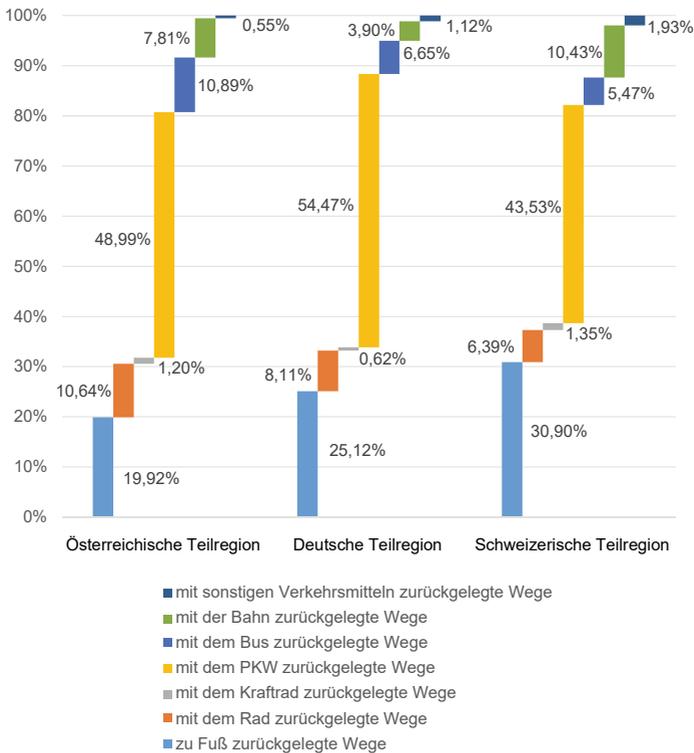
In der schweizerischen Teilregion ist der Anteil des Schienenverkehrs an der Tagesdistanz um den Faktor 2 bis 3 größer als in den anderen Teilregionen. Dies kann mit dem dichten und sehr gut ausgebauten Bahnnetz in der Ostschweiz erklärt werden. Auch der Anteil des Fußgängerverkehrs ist größer als in den anderen Teilregionen. Hierfür gibt es keine offensichtliche Erklärung. Mögliche Gründe könnten der im regionalen Vergleich hohe Urbanisierungsgrad von Teilen der Ostschweiz und das Vorhandensein einiger kompakt angelegter Klein- und Mittelstädte sein.

Da die Daten für die deutsche Teilregion aus einer bundesweiten Stichprobe ähnlich strukturierter Landkreise abgeleitet wurden, lässt sich der ermittelte Modalsplit nicht kausal mit geographischen oder soziodemographischen Eigenschaften der deutschen Teilregion erklären. Jedoch sind auch keine offensichtlichen Widersprüche zwischen der teilregionalen Struktur und dem ermittelten Modalsplit zu erkennen. So ist plausibel davon auszugehen, dass der Anteil des PKW-Verkehrs größer ist als in der schweizerischen und der österreichischen Teilregion, weil der Öffentliche Nahverkehr in der deutschen Teilregion weit weniger gut ausgebaut ist. Außerdem sind sowohl das nördliche Bodenseehinterland als auch das Allgäu größtenteils ländlich strukturiert und weisen somit ungünstige Rahmenbedingungen für den Fuß- und Radverkehr und den Öffentlichen Personen-Nahverkehr (ÖPNV) auf.

Bei der Betrachtung des Anteils der verschiedenen Verkehrsmittel an der Unterwegszeit (siehe Abbildung 23) zeigt sich ein ähnliches Bild. Den größten Anteil am täglichen Zeitbudget nimmt in allen drei Teilregionen der PKW ein, wobei der Anteil in der deutschen Teilregion mit 54,47 % am höchsten und in der schweizerischen Teilregion mit 43,53 % am niedrigsten ist. An zweiter Stelle folgt der Zeitanteil des Fußgängerverkehrs, der in der schweizerischen Teilregion mit 30,90 % am größten und in der österreichischen Teilregion mit 19,92 % am niedrigsten ist. An dritter Stelle liegt der Öffentliche Nahverkehr, der in der österreichischen Teilregion mit 18,7 % am größten und in der deutschen Teilregion mit 10,6 % am niedrigsten ist. In der schweizerischen Teilregion liegt der Zeitanteil des ÖV mit 15,9 % unter dem der österreichischen Teilregion, obwohl beim Anteil an der Tagesdistanz der schweizerische ÖV vorne liegt. Dieser Unterschied ist darauf zurückzuführen, dass in

der schweizerischen Teilregion der schnellere Bahnverkehr eine wichtige Rolle spielt, während in der österreichischen Teilregion sich das Bahnnetz im Wesentlichen auf eine Hauptachse konzentriert und gut ausgebaute, aber langsamere Busverbindungen die Flächenerschließung übernehmen. Die Zeitanteile des Kraftradverkehrs und der sonstigen Verkehrsmittel sind in allen Teilregionen gering und liegen jeweils unter 2 % des Tagezeitbudgets.

Abbildung 23: Modalsplit (reisezeitbasiert) nach Teilregionen



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von BFS & ARE, 2007a; Herry Consult GmbH, 2009b; Infas & DLR, 2010a.

6.5 Bestand der Kraftfahrzeuge

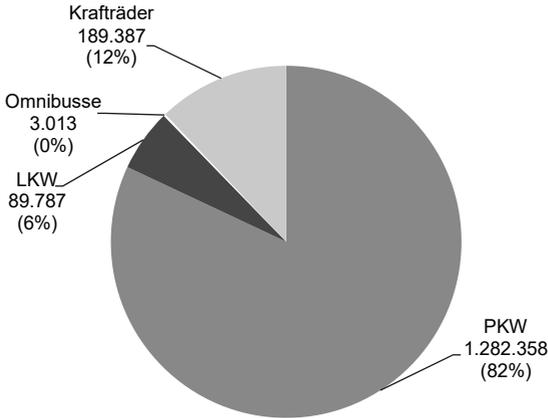
Zum Fahrzeugbestand gibt es in allen vier Ländern der Bodenseeregion gute Datengrundlagen. Sie entstammen den Fahrzeugregistern, in die die wichtigsten technischen Daten jedes Fahrzeugs aufgenommen werden, wenn es zugelassen wird. In Deutschland wird das Fahrzeugregister vom Kraftfahrzeugbundesamt geführt, in der Schweiz und in Liechtenstein von der Motorfahrzeugkontrolle, in Österreich von den Landesregierungen. Es werden im Wesentlichen die gleichen technischen Daten erfasst; lediglich bei einigen qualitativen Daten (z. B. Fahrzeugkategorien und Antriebsarten) werden teilweise unterschiedliche Kategorien verwendet. Die Fahrzeugbestandsdaten sind bis zur Ebene der Zulassungsbezirke² räumlich aufgelöst. Einzelne Eigenschaften werden allerdings nur auf der Landes- oder ggf. sogar der nationalen Ebene veröffentlicht. In dieser Arbeit werden die Daten auf der Ebene von NUTS-3-Regionen betrachtet. Dies sind in Deutschland die Landkreise, in der Schweiz die Kantone und in Liechtenstein das Land. Da Österreich keine Fahrzeugbestandsdaten für die beiden NUTS-3-Regionen Bludenz-Bregenzer Wald und Rheintal-Bodensee veröffentlicht, wird ersatzweise das Land Vorarlberg betrachtet.

Um die Fahrzeugbestände im deutschen, schweizerischen, liechtensteinischen und österreichischen Teil der Region zu erfassen, wurden Daten aus den nationalen Fahrzeugregistern in einen gemeinsamen Datensatz zusammengeführt (siehe Abbildung 24). Danach gab es im Jahr 2010, dem Basisjahr dieser Untersuchung, in der Bodenseeregion 1.564.545 Kraftfahrzeuge. Davon waren 1.282.358 PKW, 89.787 LKW, 3.013 Omnibusse und 189.387 Krafträder.

Der Motorisierungsgrad lag bei 539 PKW je 1000 Einwohner. Von den NUT3-Regionen, deren PKW-Dichte in Abbildung 25 dargestellt ist, weist Liechtenstein mit 749 PKW je 1000 Einwohner den höchsten Motorisierungsgrad auf, während der Motorisierungsgrad im Landkreis Konstanz bei lediglich 500 PKW je 1000 Einwohner lag. Mit Ausnahme Liechtensteins bewegen sich die Motorisierungsgrade der NUTS-3-Regionen zwischen 500 und 583 PKW je tausend Einwohner.

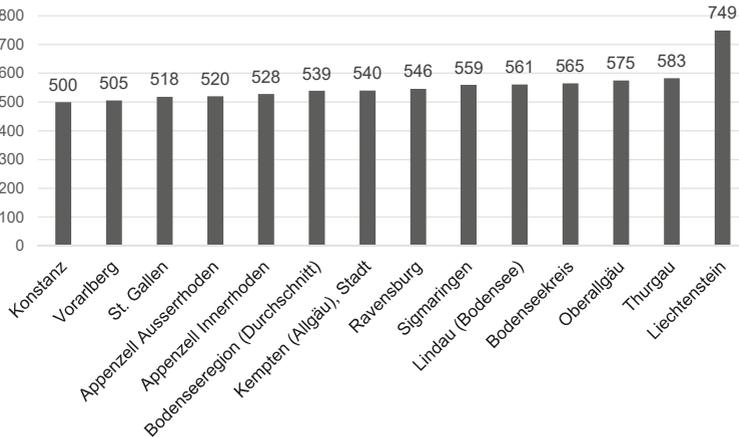
2 Zulassungsbezirke sind in Deutschland die Landkreise, in Österreich die politischen Bezirke, in der Schweiz die Kantone und in Liechtenstein das Land.

Abbildung 24: Fahrzeugtypen in der Bodenseeregion 2010



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlagen von Kraftfahrtbundesamt, 2010; Statistik Austria, 2010; Bundesamt für Statistik; 2010; Amt für Statistik, 2010.

Abbildung 25: PKW-Dichte in der Bodenseeregion 2010 nach NUTS-3-Regionen

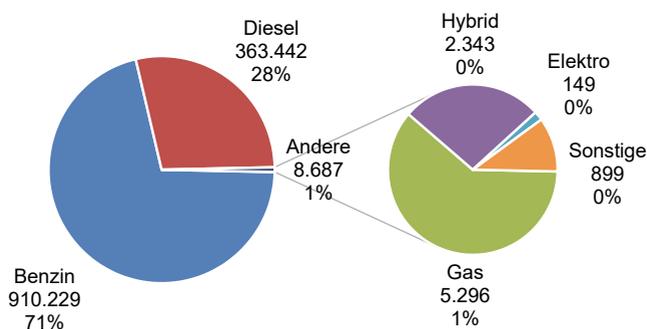


Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlagen von Kraftfahrtbundesamt, 2010; Statistik Austria, 2010; Bundesamt für Statistik; 2010; Amt für Statistik, 2010.

Warum einige NUTS-3-Regionen einen höheren und andere einen niedrigeren Motorisierungsgrad haben, ist aus Abbildung 25 nicht ersichtlich. Es kann vermutet werden, dass ländlich strukturierte NUTS-3-Regionen (Thurgau, Oberallgäu, Sigmaringen) einen höheren Motorisierungsgrad als urbanisierte NUTS-3-Regionen (Vorarlberger Rheintal, St. Gallen, Konstanz) aufweisen. Außerdem scheinen die deutschen NUTS-3-Regionen höhere Motorisierungsgrade aufzuweisen als die schweizerischen, was mit dem dort schlechter ausgebauten ÖV zusammenhängen könnte. Um hierzu genauere Aussagen treffen zu können, sind weitergehende statistische Untersuchungen erforderlich.

Die beiden dominierenden Antriebsarten für PKW sind gemäß Abbildung 26 der Benzinmotor (71 %) und der Dieselmotor (28 %), wobei es bei den Anteilen dieser beiden Antriebsarten erhebliche intraregionale Unterschiede gibt. In Österreich und in Deutschland sind Dieselfahrzeuge stärker vertreten als in der Schweiz und in Liechtenstein. Dies ist eine Folge der unterschiedlichen Besteuerung der Treibstoffe und der Benzin- und Dieselfahrzeuge. Andere Antriebsarten nehmen einen Anteil von etwa 1 % am PKW-Bestand ein. Die wichtigste Subkategorie für PKW mit »anderen« Antrieben ist die der gasbetriebenen Fahrzeuge, die

Abbildung 26: PKW in der Bodenseeregion 2010 nach Antriebsarten

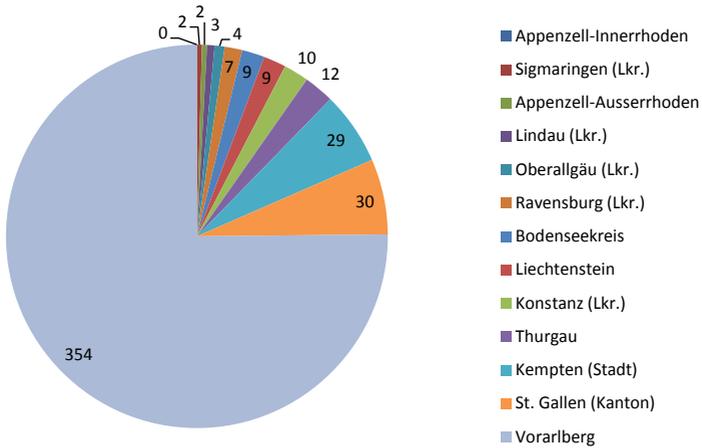


Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlagen von Kraftfahrtbundesamt, 2010; Statistik Austria, 2010; Bundesamt für Statistik, 2010; Amt für Statistik, 2010.

etwa 0,4 % des PKW-Bestandes ausmacht, gefolgt von Hybridfahrzeugen mit etwa 0,2 %. Die 149 rein elektrisch angetriebenen PKW machen 0,012 % des PKW-Bestandes aus (Bundesamt für Statistik (BfS), 2012; Kraftfahrtbundesamt, 2012; Landesstelle für Statistik Vorarlberg, 2012; Stabsstelle für Statistik, 2012).

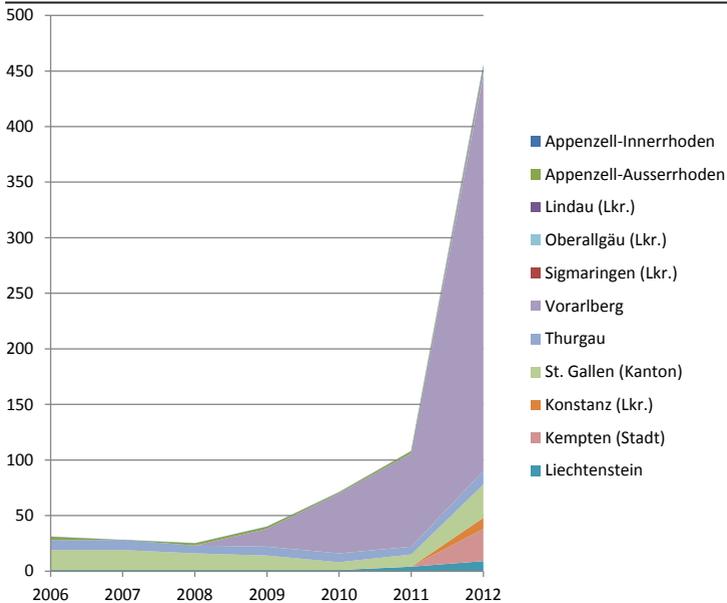
Zur Jahreswende 2011/2012 waren in der Bodenseeregion 471 PKW mit elektrischem Antrieb zugelassen (siehe Abbildung 27). Auffällig sind große Unterschiede innerhalb der Region. In absoluten Zahlen lag Vorarlberg mit 354 Fahrzeugen mit großem Abstand an der Spitze. Den – auf die Bevölkerungsgröße bezogenen – größten relativen Anteil hatte Liechtenstein, dicht gefolgt von Vorarlberg. Auch der bayerische Landkreis Kempten wies einen verhältnismäßig hohen Anteil von Elektrofahrzeugen am PKW-Bestand auf. Hingegen war im baden-württembergischen Landkreis Sigmaringen noch kein einziger Elektro-PKW zugelassen. Viele Elektro-PKW waren in NUTS-3-Regionen zu finden, in denen Modellvorhaben zur Elektromobilität durchgeführt wurden: Vorarlberg ist österreichische Modellregion für Elektromobilität und die in Kempten zugelassenen Fahrzeuge wurden zum Teil über das Interreg-Projekt »E-Tour Allgäu« finanziert. Auch die Zulassungszahlen deuten auf einen starken Einfluss von Modellvorhaben und Förderprogrammen hin. Bis zum Jahr 2008 lagen die jährlichen Neuzulassungen im niedrigen zweistelligen Bereich. Fast alle Neuzulassungen erfolgten im schweizerischen Teil der Bodenseeregion. Mit dem Start der »Modellregion Elektromobilität Vorarlberg« im Jahr 2009 und der »E-Tour Allgäu« im Jahr 2011 nahmen die Neuzulassungen im Jahr 2009 sprunghaft zu, während sie in der Schweiz nahezu konstant blieben (siehe Abbildung 28). Die Zulassungszahlen zeigen, dass bereits 2012 ein Trend zur Elektromobilität bestand, allerdings in einem recht geringen Rahmen. Diese Entwicklung wurde offensichtlich von Modellvorhaben wie der »Modellregion Elektromobilität Vorarlberg« oder der »E-Tour Allgäu« verstärkt.

Abbildung 27: Bestand an PKW mit Elektroantrieb in der Bodenseeregion zur Jahreswende 2011/2012



Quelle: Neumann, Baumgartner & Schär, 2014, S. 319.

Abbildung 28: Neuzulassungen von E-PKW in der Bodenseeregion 2006-2012



Quelle: Neumann et al., 2014, S. 320.

In der Bodenseeregion sind knapp 89.787 Straßengüterverkehrsfahrzeuge zugelassen, von denen etwa 70.454 (78,5 %) in die Kategorie der Leichten Straßengüterverkehrsfahrzeuge mit einem Gewicht bis zu 3,5 t fallen und 19.333 (21,5 %) in die Kategorie der Schwere Straßengüterverkehrsfahrzeuge. Der dominierende Antrieb ist in allen Teilen der Region der Dieselmotor, wobei in der Schweiz der Anteil der LKW mit Benzinmotor etwas höher ist als in Deutschland und Österreich. Alternative Antriebe spielen nur eine untergeordnete Rolle.

Tabelle 8: Anzahl der Straßengüterverkehrsfahrzeuge 2010

Zulassungsbezirk	Straßengüterverkehrsfahrzeuge		
	Insgesamt	Leichte Straßengüterverkehrsfahrzeuge (bis 3,5t)	Schwere Straßengüterverkehrsfahrzeuge (über 3,5t)
Bodenseeregion	89.787	70.454	19.333
Deutsche Teilregion	34.504	25.145	9.359
Konstanz	6.856	5.084	1.772
Bodenseekreis	5.565	4.329	1.236
Ravensburg	9.671	6.812	2.859
Sigmaringen	4.162	2.868	1.294
Kempten (Allgäu), Stadt	1.695	1.153	542
Lindau (Bodensee)	2.226	1.680	546
Oberallgäu	4.329	3.219	1.110
Schweizerische Teilregion	35.842	29.947	5.895
Appenzell Ausserrhoden	1.939	1.653	286
Appenzell Innerrhoden	667	558	109
St. Gallen	20.881	17.194	3.687
Thurgau	12.355	10.542	1.813
Österreichische Teilregion	16.650	13.174	3.476
Vorarlberg	16.650	13.174	3.476
Liechtensteinische Teilregion	2.791	2.188	603
Liechtenstein	2.791	2.188	603

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Daten des KBA, der Statistik Austria, des BFS.

Es gibt etwas mehr als 3.000 Omnibusse in der Bodenseeregion, die größtenteils mit Dieselmotoren fahren. Daneben existieren zahlreiche gasbetriebene Linienbusse. In Liechtenstein machen sie im Basisjahr den größten Teil des Fahrzeugbestands der Liechtensteiner Busanstalt (LBA) aus. Die Stadtbusbetriebe in St. Gallen und Winterthur setzen neben dieselbetriebenen Fahrzeugen auch elektrisch angetriebene Trolleybusse ein. Außerdem gibt es eine kleinere Anzahl von elektrisch angetriebenen Bussen mit Batteriespeicher.

Tabelle 9: Anzahl der Omnibusse 2010

Zulassungsbezirk	Omnibusse insgesamt
Bodenseeregion	3.013
Deutscher Regionsteil	1.034
Konstanz	161
Bodenseekreis	161
Ravensburg	241
Sigmaringen	121
Kempen (Allgäu), Stadt	71
Lindau (Bodensee)	62
Oberallgäu	217
Schweizerischer Regionsteil	1.545
Appenzell Ausserrhoden	84
Appenzell Innerrhoden	41
St. Gallen	1.039
Thurgau	381
Österreichischer Regionsteil	329
Vorarlberg	329
Liechtensteinischer Regionsteil	105
Liechtenstein	105

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Daten des KBA, der Statistik Austria, des BFS.

Die fast 190.000 Krafträder in der Region werden fast ausschließlich mit Benzin angetrieben. Pedelecs, Elektroscooter und andere elektrisch angetriebene Zweiräder spielen im Basisjahr 2010 noch keine Rolle.

Tabelle 10: Anzahl der Krafträder 2010

Zulassungsbezirk	Krafträder insgesamt
Bodenseeregion	189.387
Deutscher Regionsteil	81.137
Konstanz	16.077
Bodenseekreis	16.096
Ravensburg	18.614
Sigmaringen	8.439
Kempton (Allgäu), Stadt	3.321
Lindau (Bodensee)	6.479
Oberallgäu	12.111
Schweizerischer Regionsteil	68.397
Appenzell Ausserrhoden	4.967
Appenzell Innerrhoden	1.524
St. Gallen	38.736
Thurgau	23.170
Österreichischer Regionsteil	36.119
Vorarlberg	36.119
Liechtensteinischer Regionsteil	3.734
Liechtenstein	3.734

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Daten des KBA, der Statistik Austria, des BFS.

6.6 Fahrleistung der Kraftfahrzeuge

Die durchschnittliche Jahresfahrleistung eines PKW in der Bodensee-region liegt bei 13.578 km und bewegt sich zwischen 11.493 km in Liechtenstein und 15.511 km im Landkreis Sigmaringen. Grundsätzlich ist die Fahrleistung der PKW mit Dieselmotor größer als die der PKW mit Benzinmotor. Für Fahrzeuge mit alternativen Antriebsarten lagen zum Zeitpunkt der Bearbeitung noch keine regionalisierten Daten vor.

Die Daten zur Jahresfahrleistung der PKW in Liechtenstein, der schweizerischen und der deutschen Teilregion stammen aus den jeweiligen Verkehrserhebungen. Im Rahmen der Mobilitätserhebung »Mobilität in Vorarlberg« wurden keine Fahrleistungen erhoben, stattdessen werden für Vorarlberg Zahlen aus dem österreichischen »Mikrozensus Energieeinsatz der Haushalte 2009/2010« verwendet (Statistik Austria, 2019).

Tabelle 11: Durchschnittliche Fahrleistung eines PKW nach Teilregionen

Zulassungsbezirk	Durchschnittliche Fahrleistung eines PKW [km/a]				Quellen
	Insgesamt	Benzin	Diesel	Sonstige	
Bodenseeregion	13.578	11.630	18.343	18.346	Eigene Berechnung auf der Grundlage von (Infas & DLR-Institut für Verkehrsforschung, 2010a) und (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, 2009)
Deutsche Teilregion	15.058	12.311	21.530	21.218	
Konstanz	14.723	12.232	21.384	21.572	
Bodenseekreis	14.723	12.232	21.384	21.572	
Ravensburg	14.723	12.232	21.384	21.572	
Sigmaringen	15.511	12.990	22.009	20.446	
Kempten (Allgäu), Stadt	14.840	12.224	21.636	20.775	
Lindau (Bodensee)	14.840	12.224	21.636	20.775	
Oberallgäu	14.840	12.224	21.636	20.775	
Schweizerische Teilregion	11.769	10.955	15.111	13.624	
Appenzell Ausserrhoden	11.661	10.596	16.367	12.000	
Appenzell Innerrhoden	11.661	10.596	16.367	12.000	
St. Gallen	11.633	10.891	14.766	11.426	
Thurgau	12.122	11.192	15.660	19.388	
Österreichische Teilregion	13.093	10.964	14.815	10.007	(Statistik Austria, 2013)
Vorarlberg	13.093	10.964	14.815	10.007	
Liechtensteinische Teilregion	11.493	10.698	14.757	13.304	(Isopublic Institut für Markt- und Meinungsforschung, 2007)
Liechtenstein	11.493	10.698	14.757	13.304	

Quelle: Eigene Berechnung.

Durch Multiplikation der PKW mit den durchschnittlichen Fahrleistungen lässt sich die Gesamtfahrleistung der PKW in der Bodensee-region ermitteln. Sie liegt bei 17,412 Mrd. km im Jahr. Davon entfallen etwa 10,586 Mrd. km (60,8 %) auf PKW mit Benzinantrieb, 6,667 Mrd. km (38,3 %) auf PKW mit Dieselantrieb und 0,159 Mrd. km (0,9 %) auf Fahrzeuge mit sonstigen Antrieben.

Tabelle 12: Gesamtfahrleistung der PKW nach Teilregionen

Zulassungsbezirk	Gesamtfahrleistung der PKW [km/a]			
	Insgesamt	Benzin	Diesel	Sonstiger Antrieb
Bodenseeregion	17.412.183.864	10.586.039.812	6.666.769.655	159.374.397
Deutsche Teilregion	9.713.310.288	5.573.071.686	4.026.126.746	114.111.856
Konstanz	2.002.387.636	1.289.387.352	686.747.160	26.253.124
Bodenseekreis	1.753.618.096	1.011.794.344	720.726.336	21.097.416
Ravensburg	2.296.086.604	1.245.645.720	1.026.517.536	23.923.348
Sigmaringen	1.173.028.480	631.119.150	526.411.262	15.498.068
Kempen (Allgäu), Stadt	513.446.399	273.585.344	231.613.380	8.247.675
Lindau (Bodensee)	668.132.518	391.168.000	271.272.168	5.692.350
Oberallgäu	1.306.610.555	730.371.776	562.838.904	13.399.875
Schweizerische Teilregion	4.975.794.889	3.821.879.998	1.116.273.325	37.641.566
Appenzell Ausserrhoden	320.994.764	238.282.848	80.983.916	1.728.000
Appenzell Innerrhoden	97.008.197	70.728.300	26.039.897	240.000
St. Gallen	2.853.163.980	2.179.398.010	656.821.212	16.944.758
Thurgau	1.704.627.948	1.333.470.840	352.428.300	18.728.808
Österreichische Teilregion	2.409.656.070	972.057.276	1.432.625.315	4.973.479
Vorarlberg	2.409.656.070	972.057.276	1.432.625.315	4.973.479
Liechtensteinische Teilregion	313.422.617	219.030.852	91.744.269	2.647.496
Liechtenstein	313.422.617	219.030.852	91.744.269	2.647.496

Quelle: Eigene Berechnung.

Zur Fahrleistung und zur Transportleistung des Güterverkehrs gibt es verschiedene europäische Statistiken. Die beste räumliche Auflösung (NUTS 0, 1 und 2) hat die sog. »Regionalstatistik des Verkehrs« (EUROSTAT, 2013b). Die »Regionalstatistik des Verkehrs« enthält keine Informationen zur Situation in der Schweiz und in Liechtenstein und ist somit für dieses Projekt nicht ausreichend. Zudem stammen die Daten von 2001 und sind daher veraltet. Besser geeignet ist die Straßenverkehrsstatistik (EUROSTAT, 2013a). Erschwert wird die Schätzung des Energieverbrauchs des Güterverkehrs durch die unterschiedlichen Nomenklaturen in den Bodenseeanrainerstaaten und auf EU-Ebene.

Tabelle 13: Fahrleistung der Omnibusse 2010

Zulassungsbezirk	Fahrleistung [km]
Bodenseeregion	131.366.800
Deutscher Regionsteil	45.082.400
Konstanz	7.019.600
Bodenseekreis	7.019.600
Ravensburg	10.507.600
Sigmaringen	5.275.600
Kempton (Allgäu), Stadt	3.095.600
Lindau (Bodensee)	2.703.200
Oberallgäu	9.461.200
Schweizerischer Regionsteil	67.362.000
Appenzell Ausserrhoden	3.662.400
Appenzell Innerrhoden	1.787.600
St. Gallen	45.300.400
Thurgau	16.611.600
Österreichischer Regionsteil	14.344.400
Vorarlberg	14.344.400
Liechtensteinischer Regionsteil	4.578.000
Liechtenstein	4.578.000

Quelle: Eigene Berechnung.

Tabelle 14: Fahrleistung der Krafträder 2010

Zulassungsbezirk	Fahrleistung [km]
Bodenseeregion	502.807.833
Deutscher Regionsteil	223.613.572
Konstanz	44.308.212
Bodenseekreis	44.360.576
Ravensburg	51.300.184
Sigmaringen	23.257.884
Kempten (Allgäu), Stadt	9.152.676
Lindau (Bodensee)	17.856.124
Oberallgäu	33.377.916
Schweizerischer Regionsteil	168.616.327
Appenzell Ausserrhoden	12.253.589
Appenzell Innerrhoden	3.759.708
St. Gallen	94.515.840
Thurgau	58.087.190
Österreichischer Regionsteil	99.543.964
Vorarlberg	99.543.964
Liechtensteinischer Regionsteil	11.033.970
Liechtenstein	11.033.970

Quelle: Eigene Berechnung.

6.7 Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen der Kraftfahrzeuge

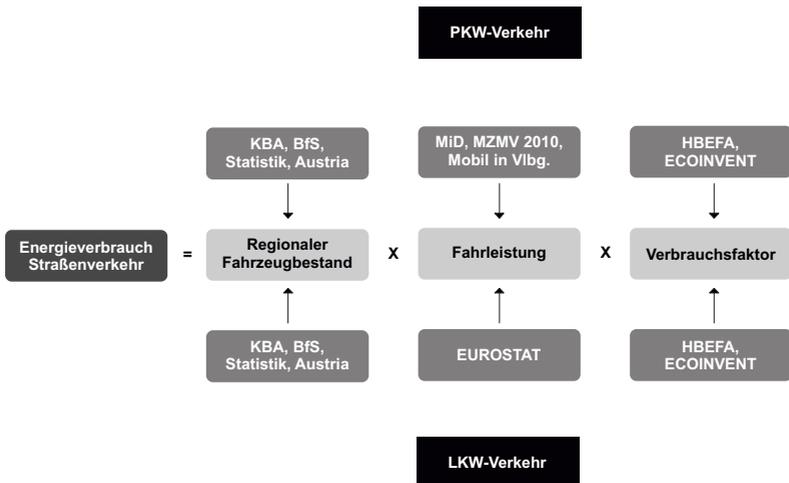
Zum Kraftstoffverbrauch und den CO₂-Emissionen der PKW in der Region liegen keine Zahlen vor, sie lassen sich aber auf Grundlage der Daten zum Fahrzeugbestand und zur Fahrleistung mit Hilfe geeigneter Emissionsfaktoren berechnen (Abbildung 29). Hierfür wird in dieser Arbeit das *Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA)* der Version 3.1 verwendet (Infras, 2010). Es enthält empirisch validierte Emissionsfaktoren für den PKW-Bestand in Deutschland, Österreich und der Schweiz. Letztere werden mangels genauere Daten auch für

Liechtenstein verwendet. Für PKW mit »sonstigen« Antrieben erfolgt keine Berechnung des Kraftstoffverbrauchs.

Die Durchschnittsverbräuche der PKW unterscheiden sich geringfügig in den verschiedenen Teilregionen. Durchschnittlich am meisten Benzin verbrauchen die schweizerischen PKW (8,5 l / 100 km). Die deutschen und österreichischen PKW benötigen für dieselbe Distanz etwa einen Liter Benzin weniger (7,6 bzw. 7,4 l / 100 km). Auch bei den Diesel-PKW ist der Durchschnittsverbrauch mit 6,3 l / 100 km am höchsten. Es folgen die deutschen Diesel-PKW mit 5,8 l / 100 km und die österreichischen Diesel-PKW mit 5,6 l / 100 km. Insgesamt verbrauchen die PKW in der Bodenseeregion im Jahr etwa 1,2 Mrd. Liter Kraftstoff. Davon entfallen etwa 835 Mio. Liter (etwa 626.250 t) auf Benzin und 393 Mio. Liter (etwa 195.880 t) auf Diesel. Dies entspricht einem Endenergieverbrauch von 7.428 GWh durch PKW mit Benzin-Motor und 3.927 GWh durch PKW mit Dieselmotor.

Die betriebsbedingte CO₂-Emission eines durchschnittlichen PKW liegt in der schweizerischen Teilregion bei 200 g CO₂/km für benzinbetriebene PKW und 167 g CO₂/km für Diesel, in der deutschen Teilregion

Abbildung 29: Baseline-Analyse für den Energieverbrauch des Straßenverkehrs



Quelle: Eigene Darstellung.

bei 179 g bzw. 156 g CO₂/km und in der österreichischen Teilregion bei 175 g bzw. 148 g CO₂/km. Diese durchschnittlichen CO₂-Emissionen liegen somit deutlich über den Flottenverbrauchs-Richtwerten, die bei Neuzulassungen zur Anwendung kommen.

Jeder PKW in der Bodenseeregion, der mit Benzin angetrieben wird, emittiert etwa 3 t CO₂ im Jahr. Die CO₂-Emissionen eines durchschnittlichen Diesel-PKW liegen mit 2,75 t pro Jahr etwas niedriger. Regionsweit führt dies zu einem jährlichen CO₂-Ausstoß von 3,722 Mio. t CO₂ im Jahr, wovon etwa 2,722 Mio. t (73,1 %) auf PKW mit Benzinantrieb und 1,000 Mio. t (26,9 %) auf PKW mit Dieselantrieb zurückzuführen sind.

Tabelle 15: Kraftstoffverbrauch der PKW 2010

Zulassungsbezirk	Kraftstoffverbrauch [l]		
	Insgesamt	Benzin	Diesel
Bodenseeregion	1.228.339.329	835.051.808	393.287.521
Deutscher Teilregion	660.289.701	423.553.448	236.736.253
Konstanz	138.374.172	97.993.439	40.380.733
Bodenseekreis	119.275.079	76.896.370	42.378.709
Ravensburg	155.028.306	94.669.075	60.359.231
Sigmaringen	78.918.037	47.965.055	30.952.982
Kempten (Allgäu), Stadt	34.411.353	20.792.486	13.618.867
Lindau (Bodensee)	45.679.571	29.728.768	15.950.803
Oberallgäu	88.603.183	55.508.255	33.094.928
Schweizerische Teilregion	395.137.713	324.477.612	70.660.101
Appenzell Ausserrhoden	25.356.496	20.230.214	5.126.282
Appenzell Innerrhoden	7.653.158	6.004.833	1.648.325
St. Gallen	226.607.674	185.030.891	41.576.783
Thurgau	135.520.385	113.211.674	22.308.711
Österreichische Teilregion	152.210.405	72.126.650	80.083.755
Vorarlberg	152.210.405	72.126.650	80.083.755
Liechtensteinische Teilregion	20.701.510	14.894.098	5.807.412
Liechtenstein	20.701.510	14.894.098	5.807.412

Quelle: Eigene Berechnung.

Tabelle 16: CO₂-Emissionen der PKW 2010

Zulassungsbezirk	CO ₂ -Emissionen [t]		
	Insgesamt	Benzin	Diesel
Bodenseeregion	3.722.649	2.722.440	1.000.209
Deutsche Teilregion	2.369.919	1.742.568	627.351
Konstanz	466.237	359.228	107.009
Bodenseekreis	426.903	314.599	112.304
Ravensburg	571.870	411.918	159.952
Sigmaringen	292.466	210.441	82.025
Kempten (Allgäu), Stadt	128.202	92.112	36.090
Lindau (Bodensee)	162.133	119.863	42.270
Oberallgäu	322.107	234.406	87.702
Schweizerische Teilregion	953.016	765.767	187.249
Appenzell Ausserrhoden	61.328	47.743	13.585
Appenzell Innerrhoden	18.539	14.171	4.368
St. Gallen	546.851	436.673	110.178
Thurgau	326.298	267.180	59.118
Österreichische Teilregion	340.438	170.219	170.219
Vorarlberg	333.277	170.219	163.058
Liechtensteinische Teilregion	59.276	43.886	15.390
Liechtenstein	59.276	43.886	15.390

Quelle: Eigene Berechnung.

Tabelle 17: Kraftstoffverbrauch der Straßengüterverkehrsfahrzeuge 2010

Zulassungsbezirk	Kraftstoffverbrauch [l]			
	Insgesamt	Leichte SGF		Schwere SGF
		Benzin	Diesel	Diesel
Bodenseeregion	362.867.266	16.996.820	78.795.333	267.075.113
Deutsche Teilregion	173.024.332	2.208.748	31.498.091	139.317.493
Konstanz	33.193.366	438.882	6.376.602	26.377.882
Bodenseekreis	24.203.251	356.239	5.447.993	18.399.019
Ravensburg	51.689.328	619.082	8.511.349	42.558.897
Sigmaringen	23.106.222	266.427	3.577.391	19.262.404
Kempton (Allgäu), Stadt	9.613.408	108.504	1.436.726	8.068.178
Lindau (Bodensee)	10.380.016	142.496	2.109.798	8.127.722
Oberallgäu	20.838.741	277.118	4.038.232	16.523.391
Schweizerische Teilregion	111.172.724	12.755.753	29.880.812	68.536.159
Appenzell Ausserrhoden	5.682.137	761.738	1.595.320	3.325.079
Appenzell Innerrhoden	2.061.652	237.018	557.384	1.267.250
St. Gallen	67.319.247	6.909.304	17.544.325	42.865.618
Thurgau	36.109.688	4.847.693	10.183.783	21.078.212
Österreichische Teilregion	68.534.219	936.669	15.386.658	52.210.892
Vorarlberg	68.534.219	936.669	15.386.658	52.210.892
Liechtensteinische Teilregion	10.135.991	1.095.650	2.029.772	7.010.569
Liechtenstein	10.135.991	1.095.650	2.029.772	7.010.569

Quelle: Eigene Berechnung.

Tabelle 18: Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen der Omnibusse 2010

Zulassungsbezirk	Kraftstoffverbrauch [l]	CO ₂ -Emissionen [t]
Bodenseeregion	55.915.648	150.933
Deutscher Regionsteil	19.140.912	50.722
Konstanz	2.980.355	7.898
Bodenseekreis	2.980.355	7.898
Ravensburg	4.461.276	11.822
Sigmaringen	2.239.894	5.936
Kempton (Allgäu), Stadt	1.314.318	3.483
Lindau (Bodensee)	1.147.714	3.041
Oberallgäu	4.017.000	10.645
Schweizerischer Regionsteil	29.521.967	78.234
Appenzell Ausserrhoden	1.605.078	4.254
Appenzell Innerrhoden	783.431	2.076
St. Gallen	19.853.284	52.612
Thurgau	7.280.174	19.293
Österreichischer Regionsteil	5.246.422	16.660
Vorarlberg	5.246.422	16.660
Liechtensteinischer Regionsteil	2.006.347	5.317
Liechtenstein	2.006.347	5.317

Quelle: Eigene Berechnung.

Tabelle 19: Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen der Krafträder 2010

Zulassungsbezirk	Kraftstoffverbrauch [l]	CO ₂ -Emissionen [t]
Bodenseeregion	18.456.745	46.959
Deutscher Regionsteil	7.769.052	19.641
Konstanz	1.539.409	3.892
Bodenseekreis	1.541.229	3.896
Ravensburg	1.782.333	4.506
Sigmaringen	808.053	2.043
Kempten (Allgäu), Stadt	317.993	804
Lindau (Bodensee)	620.379	1.568
Oberallgäu	1.159.656	2.932
Schweizerischer Regionsteil	6.635.140	17.112
Appenzell Ausserrhoden	482.185	1.244
Appenzell Innerrhoden	147.946	382
St. Gallen	3.719.248	9.592
Thurgau	2.285.761	5.895
Österreichischer Regionsteil	3.618.360	9.087
Vorarlberg	3.618.360	9.087
Liechtensteinischer Regionsteil	434.193	1.120
Liechtenstein	434.193	1.120

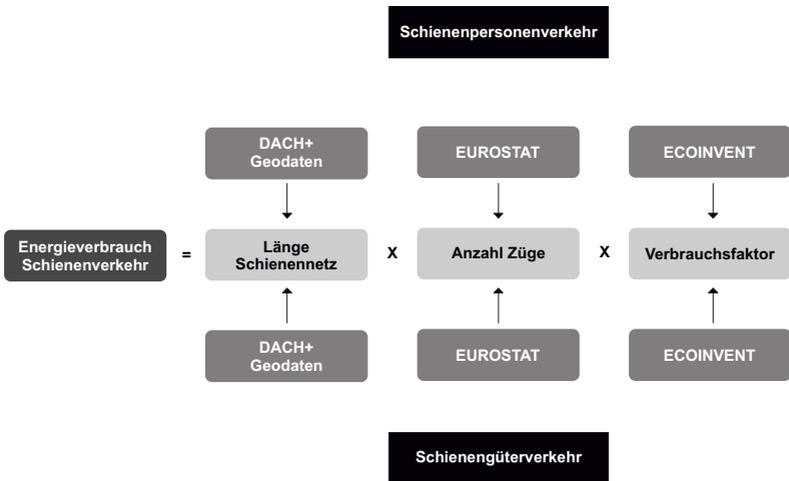
Quelle: Eigene Berechnung.

6.8 Schienenverkehr

Der Energieverbrauch des Schienenverkehrs wurde mit Hilfe des EUROSTAT-Datensatzes »Traffic flows of trains on the rail network (number of trains, 2010 data) [rail_tf_netseg10]« (EUROSTAT 2014) geschätzt (Abbildung 30). Dieser Datensatz enthält Informationen zum Verkehrsaufkommen (Zugbewegungen) auf allen Strecken des europäischen Eisenbahnnetzes, differenziert nach Personen- und Güterzügen. Ferner unterscheidet der Datensatz zwischen Haupt- und Nebenstrecken sowie zwischen elektrifizierten und nicht elektrifizierten Strecken.

Die gesamte Schienenverkehrsleistung ist in zwei Kategorien eingeteilt: den Schienenpersonennahverkehr und den Schienenpersonenfernverkehr. Diese Unterscheidung ist wichtig, da sich die Fahrzeuge des Nah- und des Fernverkehrs deutlich im Hinblick auf Größe, Beförderungskapazität, Auslastung, Gewicht und Energieverbrauch unterscheiden.

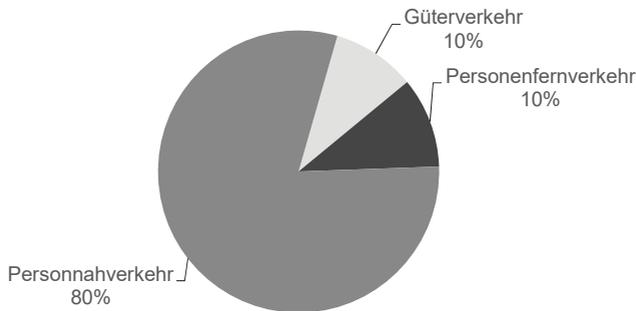
Abbildung 30: Baseline-Analyse des Schienenverkehrs



Quelle: Eigene Darstellung.

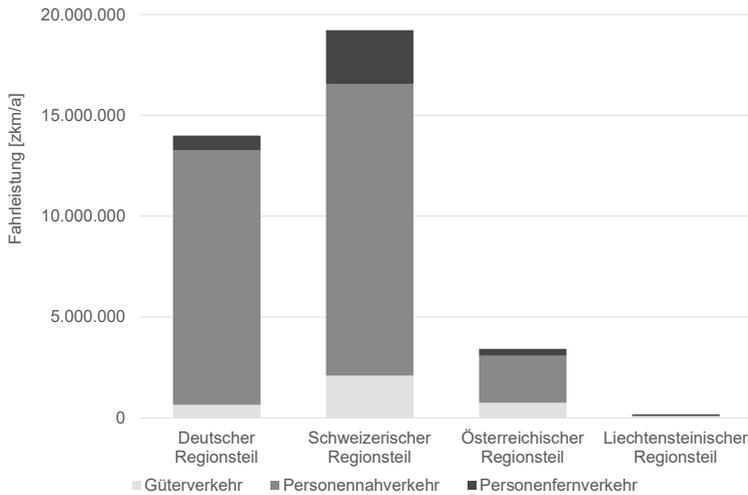
der geringen Bedeutung des Schienenpersonenverkehrs im Fürstentum den geringsten Anteil auf. Außerdem fällt auf, dass der Schienenpersonenfernverkehr und der Schienengüterverkehr auf dem schweizerischen Streckennetz einen deutlich größeren Anteil haben als in der österreichischen und insbesondere der deutschen Teilregion (Abbildung 33). Etwa 60 % des Endenergieverbrauchs des Schienenverkehrs, aber nur etwa 40 % der CO₂-Emissionen entfallen auf elektrisch betriebene Züge, der Rest auf Züge mit Dieselantrieb (Abbildung 34). Der Endenergieverbrauch und insbesondere die CO₂-Emissionen des Schienenverkehrs in der deutschen Teilregion sind wesentlich größer als in den übrigen Teilregionen, weil das Streckennetz der deutschen Teilregion größtenteils verdieselt ist, während in den übrigen Teilregionen ausschließlich elektrische Züge verkehren (Abbildung 35).

Abbildung 32: Fahrleistung des Schienenverkehrs 2010 nach Verkehrsarten



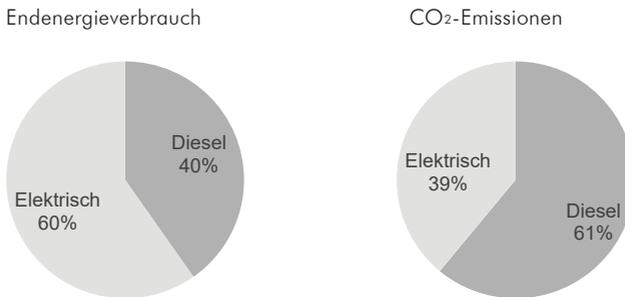
Quelle: Eigene Berechnung.

Abbildung 33: Fahrleistung des Schienenverkehrs 2010 nach Teilregionen und Verkehrsarten



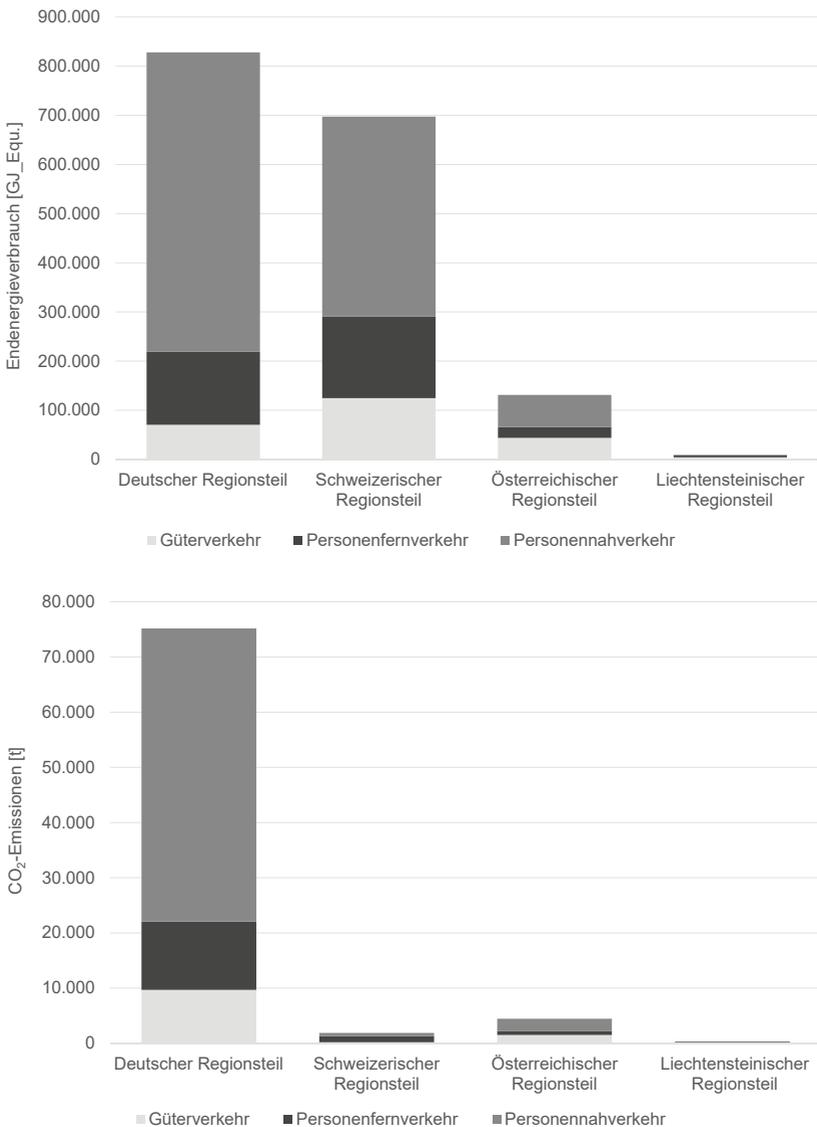
Quelle: Eigene Berechnung.

Abbildung 34: Endenergieverbrauch und CO₂-Emissionen nach Traktionsarten



Quelle: Eigene Berechnung.

Abbildung 35: Endenergieverbrauch und CO₂-Emissionen des Schienenverkehrs 2010 nach Teilräumen und Verkehrsarten



Quelle: Eigene Berechnung.

6.9 Potenzial für die Erzeugung erneuerbarer Energie

Das Potenzial für die Erzeugung erneuerbarer Energie wurde im Rahmen des BAER-Projekts ermittelt. Droege et al. (2014) beschreiben ausführlich die Methoden und die Ergebnisse dieser Potenzialermittlung.

Im Rahmen der Potenzialerhebung wird zunächst das theoretische Potenzial für die Erzeugung erneuerbarer Energie identifiziert. Dieses technische Potenzial wird in einem weiteren Schritt mit den zu beachtenden planerischen Restriktionen (z. B. Natur- und Landschaftsschutzgebiete, Denkmalensemble oder Wasserschutzgebiete) überlagert. Mittels dieser Überlagerung lässt sich das Potenzial der technisch möglichen Erzeugung von erneuerbarer Energie identifizieren. Bei der Potenzialermittlung wird zwischen diffusen und konkreten Potenzialen unterschieden:

- ▶ Zu diffusen Potenzialen zählen alle Erzeugungstechnologien, die im Siedlungsraum realisiert werden können. Keinen wesentlichen zusätzlichen Flächenbedarf auslösen und nicht sehr stoffstromintensiv sind, wie die Solarenergie-Nutzung (Dach- und Fassaden), die Nutzung von Erd- und Umgebungswärme, die Nutzung von Abwasserwärme (vor Eintritt in die Kanalisation) und die Nutzung von Brennholz in Einzelfeuerungsanlagen.
- ▶ Als konkrete Potenziale werden hingegen alle Erzeugungstechnologien bezeichnet, die stoffstromintensiv und/oder flächenrelevant sind und daher in der Regel außerhalb des Siedlungsraums errichtet werden. Hierzu zählen insbesondere PV-Freiflächenanlagen, Windparks, Wasserkraftanlagen, geothermische Heizzentralen oder Heizkraftwerke sowie Biomasse-Heizzentralen und Blockheizkraftwerke (Droege et al., 2014b).

Ermittlung der diffusen Potenziale für die Erzeugung erneuerbarer Energie:

Für die Ermittlung der diffusen Potenziale wird das Gebiet in prototypische Stadt- und Landschaftsräume eingeteilt. Diese Methode wurde erstmals in der Studie *Leitbilder und Potenziale eines solaren Städtebaus* (Everding, Ecofys, FH Köln & RWTH Aachen, 2004) beschrieben und von Genske et al. im Rahmen des BBSR-Forschungsprojekts »Nutzung

städtischer Freiflächen für erneuerbare Energien« weiterentwickelt (Genske, Jödecke & Ruff, 2009).

Die Stadtraum-Prototypen sind durch ihre Entstehungszeit und die zu diesem Zeitpunkt verfolgten städtebaulichen Leitbilder gekennzeichnet (Everding et al., 2004). So gelten

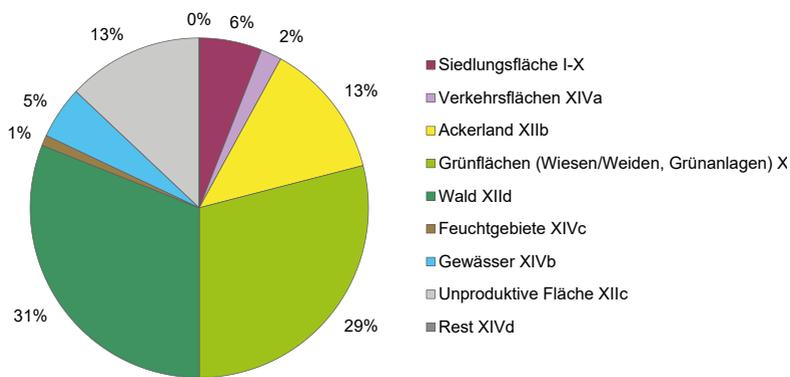
- ▶ für Gründerzeitquartiere stadtbaukünstlerische Prinzipien,
- ▶ für Wohnsiedlungen der 1920er und 1930er Jahre das Prinzip der Stadterweiterung nach dem Wohlfahrtsprinzip,
- ▶ für Wohnsiedlungen und Stadtquartiere der 1950er Jahre verschiedene Leitbilder des organischen Städtebaus, der gegliederten und aufgelockerten Stadt und der Stadtkonsolidierung im Zuge des Wiederaufbaus,
- ▶ für die Siedlungen der 1960er und 1970er Jahre das Prinzip der Urbanität durch Dichte,
- ▶ für den Städtebau der 1980er Jahre das Prinzip des behutsamen Stadumbaues durch Stadterneuerung und
- ▶ für die städtebaulichen Maßnahmen seit den 1990er Jahren das Prinzip der Nachhaltigkeit.

Jeder dieser Stadtraumtypen hat spezifische Merkmale hinsichtlich der vorherrschenden Gebäudetypen, der Bebauungsdichte, der Freiflächen sowie der äußeren und inneren Erschließung. Sie unterscheiden sich insbesondere aber auch hinsichtlich ihres Potenzials für die Erzeugung erneuerbarer Energie: Beispielsweise eignen sich die Dächer und Fassaden gründerzeitlicher Bauwerke (Siedlungsraumtyp II) aufgrund ihrer zum Teil komplexen Formen und aufwendigen Gestaltung nur eingeschränkt für die solare Nutzung, während bei Hochhäusern in der Regel sowohl die Dächer als auch die Fassaden gut dafür geeignet sind. Auch andere Energieerzeugungspotenziale wie Erdwärmesonden können in einigen Stadtraumtypen besser genutzt werden als in anderen.

Während Stadtraumtypen für die energetische Klassifizierung des Siedlungsraums verwendet werden, kommen für die Klassifizierung unbebauter Flächen außerhalb des Siedlungszusammenhangs Landschaftsraumtypen zur Anwendung. Auch für jeden Landschaftsraumtyp lassen sich spezifische Potenziale für die Erzeugung erneuerbarer Energie bestimmen. Diese Potenziale umfassen insbesondere Wind- und

Wasserkraft, die Gewinnung von Solarstrom mittels photovoltaischer Freiflächenanlagen, Tiefengeothermie und Biomasse (Droege et al., 2014b).

Abbildung 36: Relative Verteilung der Siedlungs- und Landschaftsraumtypen in der Bodenseeregion



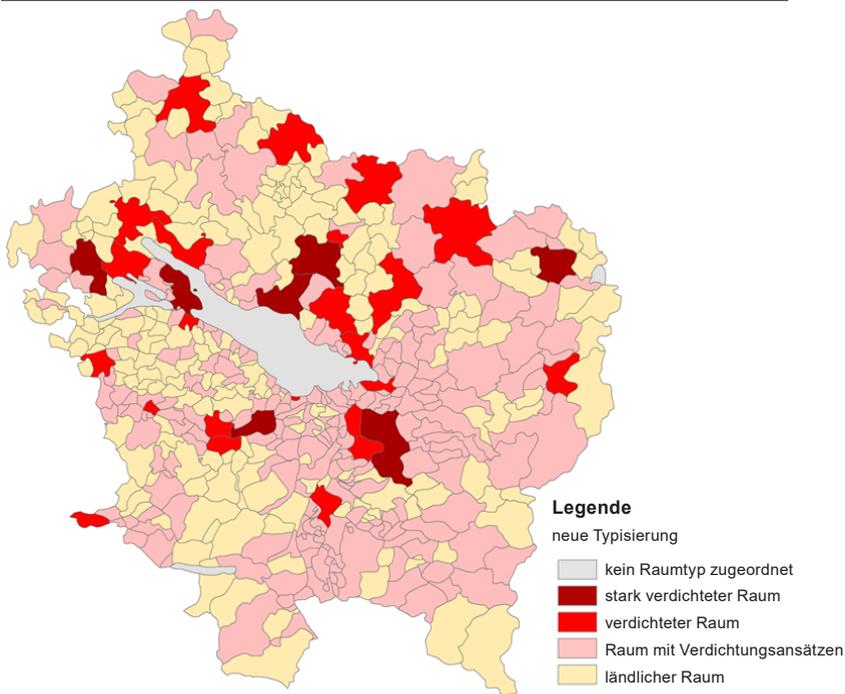
Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Droege et al., 2014b.

Die Anteile der verschiedenen Stadt- und Landschaftsraumtypen wurden in einem mehrstufigen Verfahren auf der Basis verschiedener Geodatenätze mittels GIS ermittelt. Ausgangsbasis war der Datensatz des CORINE Land Cover (CLC) 2006, der die Flächennutzung der EU-Mitgliedsstaaten sowie der Schweiz und Liechtensteins in einheitlicher Nomenklatur darstellt (Corine Land Cover, 2006). Der CLC-Datensatz enthält mehrere Freiraumkategorien und zwei Kategorien für Siedlungsräume (Wohnflächen und Industrie- und Gewerbeflächen). Verkehrsflächen werden nicht gesondert ausgewiesen. Für die Ermittlung des Erzeugungspotenzials der Freiräume waren die Freiraumkategorien des CLC-Datensatzes ausreichend. Wie in Abbildung 36 dargestellt, ist die größte Freiraumkategorie Wald (31,6 %), gefolgt von Grünland (28,9 %), wozu Grünflächen, also Wiesen, Weiden und Grünanlagen gehören, unproduktiven Flächen (größtenteils Fels, 13,4 %), Ackerland (12,6 %), Gewässern (4,7 %), Feuchtgebieten (0,7 %) und Restflächen (nicht zuordenbare Flächen, 0,3 %). Hinsichtlich der Siedlungsflächen (5,7 % des Gesamttraums) unterscheidet der Datensatz nur zwischen

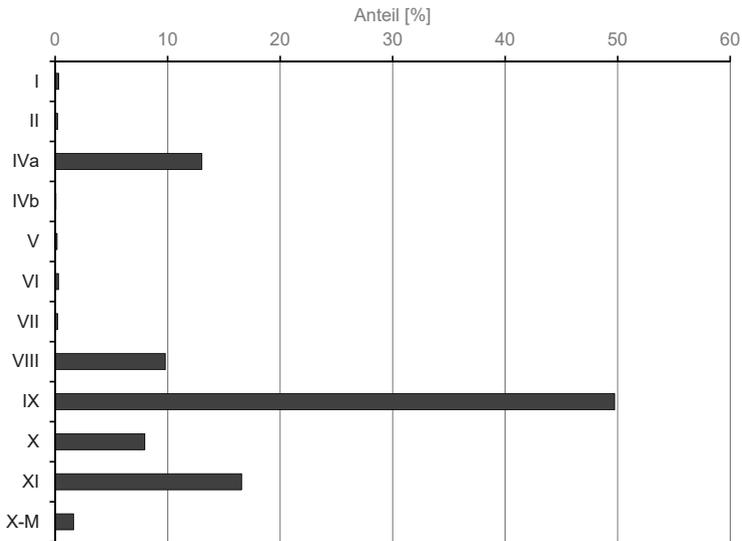
Wohnbauflächen und Gewerbeflächen. Für die Potenzialanalyse ist es erforderlich, den Anteil der o. g. Stadtraumtypen zu bestimmen, was auf Grundlage der zwei CLC-Siedlungsflächenkategorien nicht möglich ist.

Um den Anteil der verschiedenen Stadtraumtypen an den Siedlungsflächen zu schätzen, wurde zunächst eine Raumkategorisierung des BAER-Raums mit vier Raumkategorien entwickelt. Anschließend wurden alle Gemeinden der Bodenseeregion diesen vier Raumkategorien zugeordnet (siehe Abbildung 37). Für jede Kategorie wurde dann die durchschnittlichen Anteile der Stadtraumtypen ermittelt (siehe Abbildung 38) (Droege et al., 2014b).

Abbildung 37: Einteilung der Gemeinden in der Bodenseeregion in Raumkategorien



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Droege et al., 2014b.

Abbildung 38: Relative Verteilung der Siedlungsraumtypen

- I Vorindustrielle Altstadt
- II Gründerzeit
- IVa dörfliche und kleinteilige Strukturen
- IVb Mehrfamilienhäuser mit Gewerbe, Handel und Dienstleistungen
- V Werks- und Genossenschaftssiedlungen
- VI Sozialer Wohnungsbau
- VII Hochhäuser
- VIII Geschosswohnungsbau
- IX Ein- und Zweifamilienhausgebiete
- X Gewerbegebiete
- XI Zweckbauten
- X-M Gewerbe in Mischgebieten

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Droege et al., 2014b.

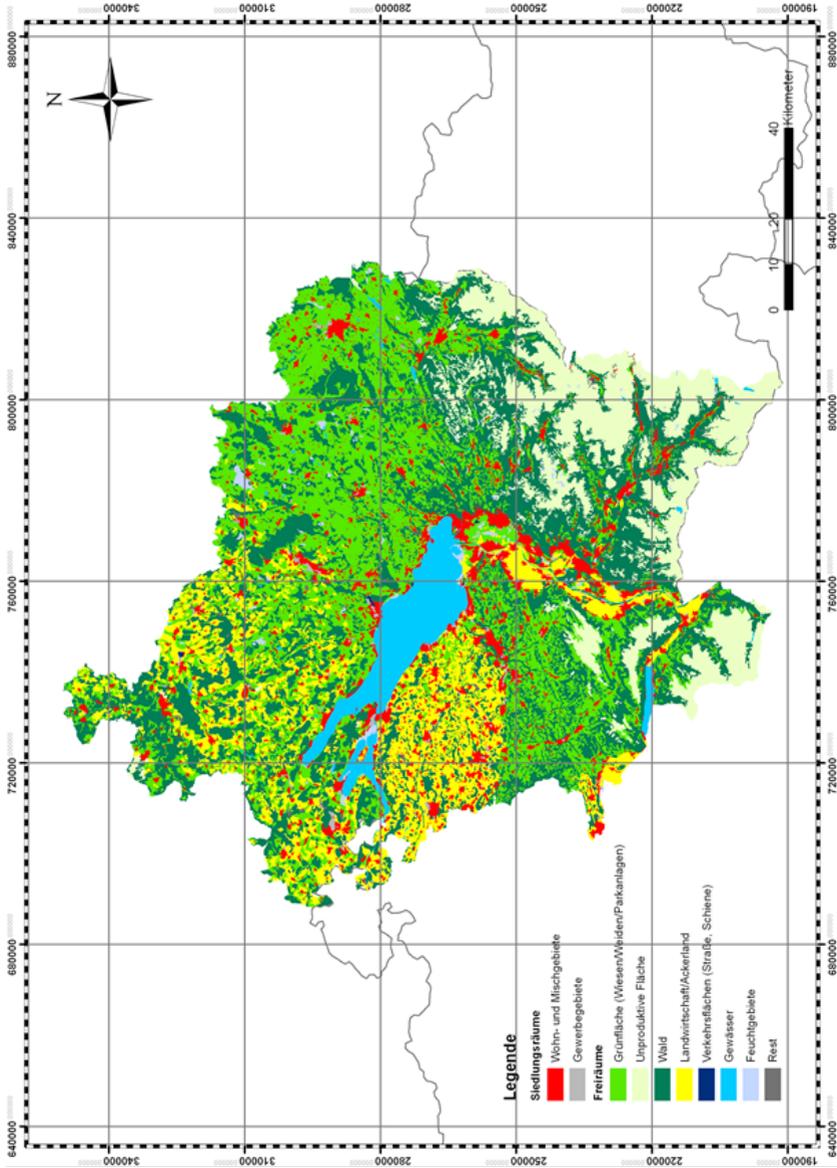
Schließlich wurden auf Basis dieser Anteile die Flächenanteile der einzelnen Stadtraumtypen für jede Gemeinde hochgerechnet. Tabelle 20 und Abbildung 39 zeigen die Flächen aller Siedlungs- und Landschaftstypen in der Bodenseeregion. Diese Flächen dienen als Eingangsdaten für die Ermittlung der diffusen Potenziale für die Erzeugung erneuerbarer Energie.

Tabelle 20: Siedlungs- und Landschaftsraumtypen in der Bodenseeregion

Siedlung- und Landschaftsraumtyp	SRT	Nutzung	Flächen [ha]
Vorindustrielle Altstadt	I		226
Gründerzeit (klassisch)	II	Mischnutzung	151
Dörfliche und kleinteilige Strukturen	IVa		9.257
Mehrfamilienhäuser mit GHD	IVb		51
Werks- und Genossenschaftssiedlungen	V		122
Siedlungen des sozialen Wohnungsbaus	VI		210
Hochhäuser	VII	Wohnen	154
Geschosswohnungsbau	VIII		6.963
Ein- und Zweifamilienhausgebiete	IX		35.349
Gewerbegebiete	X		5.655
Zweckbau	XI	Arbeiten	11.779
Gewerbe in Mischgebieten	X-M		1.160
Grünflächen (Wiesen/Weiden, Grünanlagen)	XIIa		362.397
Landwirtschaft/Ackerland	XIIb		158.208
Unproduktive Fläche	XIIc		168.379
Wald	XIId	Freiraum	395.656
Verkehrsflächen (Straße, Schiene)	XIVa		25.442
Gewässer	XIVb		59.334
Feuchtgebiete	XIVc		8.518
Rest	XIVd		3.476
Summe			1.252.486

Quelle: Droege et al., 2014b.

Abbildung 39: Siedlungs- und Landschaftsraumtypen in der Bodenseeregion



Quelle: Droege et al., 2014b.

Ermittlung der konkreten Potenziale für die Erzeugung erneuerbarer Energie:

Die konkreten Potenziale für die Erzeugung erneuerbarer Energie wurden durch die Auswertung einer großen Anzahl von regionalen Potenzialstudien erfasst.

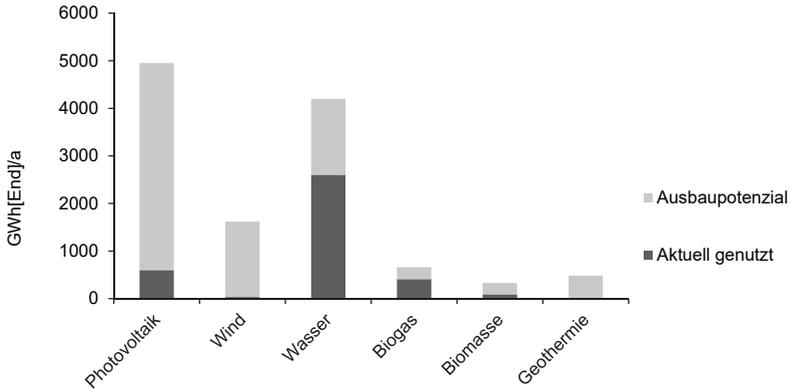
Hinsichtlich des Biomassepotenzials stellte sich die Datenlage als ausgesprochen inhomogen heraus. Daher wurde das Biomassepotenzial auf Grundlage der CLC-Daten neu berechnet. Dabei wurde unterstellt, dass die Ackerfläche maximal zu 20 % energetisch genutzt wird, wobei eine Aufteilung in 40 % Raps, 40 % Mais, 15 % Weizen und 5 % Kurzumtrieb erfolgte. Außerdem wurde angenommen, dass 10 % der Grünlandfläche, 20 % des jährlichen Holzzuwachses und 20 % des anfallenden Stroh energetisch genutzt werden (Droege et al., 2014b).

Bei der Ermittlung des regenerativen Erzeugungspotenzials wurden mehrere bereits vorliegende Studien zu den Teilregionen berücksichtigt, u. a. zur Wind- und Wasserkraft sowie zur Tiefengeothermie. Näheres findet sich bei Droege et al. (2014b).

Mit Hilfe dieser Studien sowie auf Basis umfangreicher eigener Berechnungen wurde das regenerative Potenzial der Bodenseeregion bestimmt. Abbildung 40 zeigt die Potenziale für die regenerative Stromerzeugung im Innovationsszenario und setzt sie zu den 2010 bereits genutzten Anteilen in Beziehung. Danach weisen Photovoltaik, Wasserkraft und, mit etwas Abstand, die Windkraft die größten Potenziale auf. Kleinere Anteile haben Biomasse, Biogas und Tiefengeothermie. Für Photovoltaik und Windkraft besteht noch ein erhebliches Ausbaupotenzial. Die Potenziale von Wasserkraft und Windkraft werden dagegen schon größtenteils genutzt (Droege et al., 2014b).

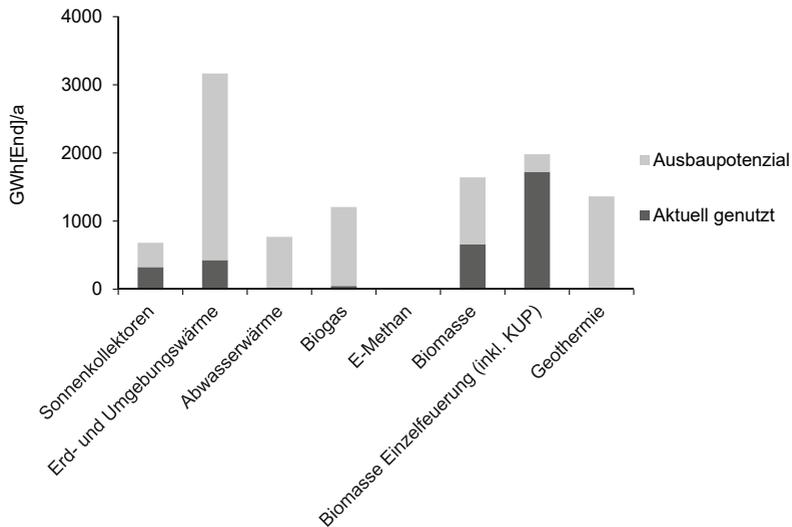
Das größte Potenzial für die Wärmeversorgung weisen die Erd- und die Umgebungswärme auf. Dies ist typisch für (teilweise) ländlich geprägte Regionen mit dörflichen und kleinteiligen Strukturen und einem großen Anteil an Einfamilienhausgebieten. Diese Siedlungstypen eignen sich sehr gut für die Nutzung von Erd- und Umgebungswärme. Dieses Potenzial wird bislang (Stand 2010) kaum genutzt. Ein ebenfalls großes, wenn auch größtenteils bereits ausgeschöpftes Potenzial hat die Verwendung von Biomasse in Einzelfeuerung. Wenig genutzt werden zurzeit (Stand 2010) Biogas und Abwasserwärme. Auch das Potenzial

Abbildung 40: Tatsächlich nutzbares Potenzial für die Optionen der regenerativen Stromerzeugung



Quelle: Droege et al., 2014b.

Abbildung 41: Tatsächlich Nutzbares Potenzial für die Optionen der regenerativen Wärmeerzeugung



Quelle: Droege et al., 2014b.

für solarthermische Systeme, die sich primär für die Bereitstellung von Warmwasser eignen, ist noch nicht ausgeschöpft. Das Potenzial industrieller Abwärme konnte mangels Datengrundlage nicht ermittelt werden (Droege et al., 2014b). Einen Überblick über das tatsächlich nutzbare Potenzial für die verschiedenen Optionen der regenerativen Wärmeerzeugung gibt Abbildung 41.

Schließlich wurden in der Studie auch das Potenzial für die Erzeugung von E-Methan aus Überschussstrom untersucht. Diese Technologie weist zwar nur über einen geringen Wirkungsgrad auf, aber sie verfügt über andere Vorteile. Sie erlaubt es, Spitzen bei der Stromerzeugung zu glätten und so die Netzstabilität zu erhöhen. E-Methan kann über das bestehende Erdgasnetz an den Verbraucher geliefert werden. Außerdem kann es als Treibstoff für Fahrzeuge eingesetzt werden (Droege et al. 2014b).

Potenzial der Verkehrsflächen für die Erzeugung erneuerbarer Energie:

Die Siedlungs- und Verkehrsfläche in der Bodenseeregion weist verschiedene Potenziale für die Gewinnung erneuerbarer Energie auf. Genutzt werden bislang vor allem gebäudebezogene Potenziale (Dächer und Fassaden für die photovoltaische Erzeugung von Strom und die solarthermische Erzeugung von Wärme; Wärmepumpen in und unter Gebäuden oder gebäudenah auf dem Grundstück situiert). Doch auch die Verkehrsflächen und sonstige Freiflächen im Siedlungszusammenhang können für die Gewinnung erneuerbarer Energie genutzt werden, z. B. für die Installation von PV-Anlagen. Auch wenn sich nur ein kleiner Teil der Verkehrsflächen zur Energieerzeugung dienen kann, ist das Potenzial aufgrund der schieren Größe beachtlich (siehe Tabelle 21). In Deutschland beispielsweise nehmen die Verkehrsflächen 17.190 km² oder 4,8 % der Landesfläche ein. Etwas kleiner sind die Flächenanteile in Österreich (2,4 % oder 2.014 km²), der Schweiz (2,2 % oder 893 km²) und in Liechtenstein (2,8 % oder 4,5 km²) (Statistisches Bundesamt [destatis], 2010; Umweltbundesamt, 2010b; Bundesamt für Statistik [BfS], o. J.; Bundesamt für Statistik [BfS], 2009).

Tabelle 21: Verkehrsflächen in Deutschland, Österreich, der Schweiz und Liechtenstein

	Deutschland 2008	Österreich 2010	Schweiz 1992/97	Liechtenstein 2005
Verkehrsfläche	17.190 km ²	2.014 km ²	893 km ²	4,5 km ²
Landesfläche	357.124 km ²	83.879 km ²	41.285 km ²	160 km ²
Anteil Verkehrsfläche	4,8 %	2,4 %	2,2 %	2,8 %

Quelle: Statistisches Bundesamt (destatis) 2010; Umweltbundesamt 2010b; Bundesamt für Statistik (BfS) o.J.; Bundesamt für Statistik (BfS) 2009.

Relativ häufig ist die photovoltaische Nutzung von Lärmschutzwänden. So wurden bereits vor mehr als zwanzig Jahren an einigen Abschnitten der Autobahnen in der Schweiz Lärmschutzwände mit Solarzellen aufgestellt. Mittlerweile gibt es in den Bodenseeanrainerstaaten eine ganze Reihe ähnlicher Projekte. Recht bekannt ist die 2009 errichtete Solaranlage an der A3 bei Goldbach in Deutschland, eine 2.700 Meter lange Lärmschutzeinhausung, auf der Photovoltaikmodule installiert wurden. In Österreich ermittelte 2007 der Autobahn- und Schnellstraßenbetreiber ASFINAG das Potenzial seiner Lärmschutzanlagen für die Erzeugung von Solarstrom. Nach dieser Untersuchung eignen sich etwa ein Drittel der 2,5 Mio. m² Lärmschutzwandfläche der ASFINAG für die Solarstromerzeugung. Auch die Lärmschutzwände an Bahnstecken können photovoltaisch genutzt werden, zum Potenzial dieser Lärmschutzwände liegen aber keine öffentlich zugänglichen Untersuchungen vor. Aufgrund der steigenden Anforderungen an den Verkehrslärmschutz ist allerdings damit zu rechnen, dass zukünftig entlang der Autobahnen und Eisenbahnlinien weitere Lärmschutzwände entstehen werden und somit auch das photovoltaische Nutzungspotenzial dieser Anlagen zunehmen wird (Neumann et al., 2014, S. 337-341).

Innerorts sind in erster Linie die Flächen des ruhenden Verkehrs für die Installation von Solaranlagen geeignet. Dazu zählen Parkhäuser, Parkdecks und Parkplätze. In den Bodenseeanrainerstaaten gibt es bereits eine größere Anzahl von Parkhäusern, deren Dach- oder Fassadenflächen mit Photovoltaik-Paneelen versehen sind. Im internationalen Vergleich noch wenig verbreitet ist die solare Nutzung von

Parkplatzflächen, was auf die fehlende Überdachung von Parkplätzen in Mitteleuropa zurückzuführen ist. In Südeuropa und sowie subtropischen und tropischen Ländern ist es dagegen üblich, Parkplätze vor Supermärkten, Flughäfen oder Stadien zu überdachen, um die Aufheizung der abgestellten Fahrzeuge zu verringern. Diese Überdachungen können mit Solarzellen bestückt werden, um Elektrofahrzeuge zu laden oder angrenzende Gebäude mit Strom zu versorgen. Künftig könnte diese Lösung auch in der Bodenseeregion zur Anwendung kommen.

Der solare Ertrag von Dach- und Fassadenflächen wurde schon oft untersucht, aber zum solaren Ertrag von Parkplatzflächen gibt es nur wenige Studien. Um diese Datenlücke zu füllen und um eine erste Einschätzung zum Erzeugungspotenzial der Parkplätze in der Bodenseeregion zu erhalten, wurde von der Universität Liechtenstein und der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) im Rahmen von BAER das solare Erzeugungspotenzial der Parkplätze in der Stadt Frauenfeld (22.665 Einwohner) analysiert. Gegenstand der Untersuchung waren 48 Parkplätze in einer Größe von 630 bis 6.080 m². Die Studie ergab, dass allein auf diesen Parkplätzen etwa ein Drittel des Energiebedarfs der in Frauenfeld zugelassenen PKW gedeckt werden könnte, wenn es sich um Elektrofahrzeuge handelte. Über der Grundfläche eines Parkplatzes besteht also ein bisher ungehobenes Potenzial der Installation von zwei Kilowatt Photovoltaikleistung, was dem Solartreibstoff für 10.000 PKW-Kilometer im Jahr entspricht. Dieses Potenzial gilt es nicht nur im privaten Bereich, sondern auch auf öffentlichen Flächen zu heben (Neumann et al., 2012).

Erste Prototypen zeigen, dass auch die Fahrbahnfläche selbst für die Gewinnung von Solarstrom eingesetzt werden kann. So hat die Niederländische Organisation für angewandte naturwissenschaftliche Forschung TNO mit einigen Partnern ein SolaRoad genanntes System von Solarmodulen entwickelt, die sich in Fahrbahnen integrieren lassen. Das System wurde ab 2014 in einen Radweg auf einem Forschungsgelände von TNO eingebaut und dort einem Praxistest unterzogen. Seit 2017 gibt es vier weitere Demonstrationsprojekte, zwei davon in den Niederlanden und zwei in Frankreich (Solaroad, 2020). In den USA wird ein ähnliches System unter der Bezeichnung Solar Roadways entwickelt (Solar Roadways, 2020). Beide Systeme befinden sich an der Schwelle zum Markteintritt.

Es liegen bislang wenige Studien vor, die das Erzeugungspotenzial von Verkehrsflächen systematisch erfassen. Hegger und Dettmar (2014) gehen davon aus, dass das Potenzial von Hauptgeschäfts- und Industriestraßen mit einem hohen Anteil an LKW-Verkehr für die Stromgewinnung genutzt werden kann, indem piezoelektrische Elemente unter dem Asphalt zum Einsatz kommen. In ihrer Studie werden außerdem die Überdeckung von Parkplatzflächen mit PV-Modulen sowie der Einsatz von thermischen Kollektoren im Straßenasphalt für Niedertemperaturwärme untersucht (Hegger & Dettmar, 2014, S. 78-83). Droege et al. (2014) gehen in ihrem Exzellenzscenario davon aus, dass bis zum Jahr 2050 1 % der Verkehrsflächen für die photovoltaische Gewinnung von Solarstrom genutzt werden kann. Im Trendszenario werden die Verkehrsflächen nicht für die Energiegewinnung genutzt. Nachdem sich diese Arbeit hinsichtlich der Potenziale für die Gewinnung erneuerbarer Energie grundsätzlich auf die im Rahmen des BAER-Projekts entstandene Studie von Droege et al. (2014) bezieht, werden die Annahmen für das Trendszenario (0 % der Verkehrsflächen werden energetisch genutzt) und das Exzellenzscenario (1 % der Flächen werden energetisch genutzt) übernommen. Für das Zielszenario, das bei Droege et al. (2014) nicht vorgesehen war, wird in dieser Arbeit angenommen, dass 2 % der Verkehrsflächen innerorts und außerorts energetisch genutzt werden.

7 Szenario-Generierung

Im Folgenden werden drei Szenarien entworfen: ein Trendszenario, das die gegenwärtige Entwicklung fortschreibt, ein Alternativszenario, das von einer im Vergleich zum Trendszenario schnelleren Diffusion alternativer Antriebe und erneuerbarer Energietechnologien im Szenariofeld ausgeht, und ein Zielszenario, in dem die Inputparameter und Annahmen zum Verhalten der Akteure so gewählt sind, dass bis zum Jahr 2050 der Endenergiebedarf der Region vollständig aus regional erzeugter erneuerbarer Energie gedeckt wird.

7.1 Merkmale des Trendszenarios

Das Trendszenario geht u. a. davon aus, dass sich die gegenwärtigen zu beobachtende Entwicklungstendenzen langfristig fortsetzen. Die Region entwickelt sich entsprechend diesen (globalen) Trends, agiert aber nicht in einer Pionierrolle.

Der Bedeutung der erneuerbaren Energie für die Energieversorgung wächst stetig, wenn auch langsam. Die Regionen bleiben jedoch weiterhin von fossilen Energieträgern abhängig. Die Energiepreise bleiben kaufkraftbereinigt auf ungefähr dem gegenwärtigen Niveau. Aufgrund langfristig sinkender Kosten können erneuerbare Energietechnologie und erneuerbare Antriebsarten ihre Marktpositionen allmählich verbessern.

Erneuerbare Energien verlieren ihren Sonderstatus und werden ein Bestandteil des Alltags. In der Bevölkerung überwiegt ein pragmatischer Umgang mit erneuerbarer Energietechnologie. Sie wird nicht aus Imagegründen oder Idealismus eingesetzt, sondern wenn sie Kosten sparen hilft. Es gibt keine regional koordinierte Verkehrs- und Energiewende als eigenständiges Projekt, vielmehr lediglich mehr oder weniger isolierte Aktivitäten verschiedener Akteure. Länder und Kantone nehmen eine abwartende Haltung ein. Einspeisetarife werden schrittweise reduziert und abgeschafft. Förderprogramme für erneuerbare Energien laufen weiter, werden aber sukzessive reduziert, da zuvor geförderte Technologien die Marktreife erreichen. Die regionalen Unternehmen profitieren in

begrenztem Umfang vom Trend zu erneuerbaren Energien und alternativer Mobilität. Es gelingt ihnen aber nicht, sich von den Mitbewerbern aus anderen Regionen abzusetzen.

Die Städte und Gemeinden vertreten unterschiedliche Auffassungen im Hinblick auf eine Energie- und Verkehrswende: Einige unterstützen sie aktiv, wenige versuchen, sie zu blockieren, die meisten verhalten sich indifferent. Erneuerbare Energieprojekte werden in der Regel kleinmaßstäblich umgesetzt. Die Ausweisung größerer Vorrangflächen scheitert am Mangel an politischem Willen und oft auch am Widerstand der Bürgerinnen und Bürger.

Straßenverkehr und Verkehr werden weiterhin parallel ausgebaut. Im Bahnverkehr werden laufende Ausbau- und Elektrifizierungsmaßnahmen abgeschlossen. Für eine weitergehende Elektrifizierung der (deutschen) Bahnnetze in der Bodenseeregion fehlt aber der politische Wille. Mehrere umstrittene Straßenbaumaßnahmen wie die Bodenseeschnellstraße S18 (Verbindung der österreichischen Rheintalautobahn A14 mit der schweizerischen Autobahnen A1 und A13), der Stadttunnel Feldkirch und zahlreiche Umgehungsstraßenprojekte werden realisiert. Aufgrund des gleichzeitigen Ausbaus von Straße und Schiene verändert sich der Modalsplit im Betrachtungszeitraum nur unwesentlich.

Die institutionelle Zersplitterung in der Region bleibt bestehen. Zwar wird die grenzüberschreitende Zusammenarbeit im Rahmen bestehender Formate wie INTERREG oder der Internationalen Bodenseekonferenz fortgesetzt, aber es entsteht keine darüber hinausreichende institutionelle Verflechtung. Das Angebot für den Öffentlichen Nahverkehr in der Region wird nach wie vor von mehreren unabhängig voneinander operierenden Verkehrsverbänden realisiert.

Personenverkehr:

Aufgrund des gleichzeitigen Ausbaus der Straßeninfrastruktur und des öffentlichen Nahverkehrs verändert sich der personenbezogene Modalsplit in den vier Teilregionen der Bodenseeregion nicht. Da die schweizerische und die österreichische Teilregion bis 2050 stärker wachsen werden als die deutsche Teilregion und diese beiden stark wachsenden Teilregionen einen im regionalen Vergleich überdurchschnittlichen Anteil des ÖV und Fußgänger- und Radfahrerverkehrs (künftig

Langsamverkehr) an der Personenverkehrsleistung haben, erhöht sich der Anteil des ÖV und des Langsamverkehrs bis zum Jahr 2050 leicht, während der Anteil des Motorisierten Individualverkehrs (PKW und Krafträder) leicht zurückgeht.

Getrieben vom Bevölkerungswachstum wächst auch der PKW-Bestand in der Bodenseeregion von 1,12 Mio. PKW im Basisjahr auf 1,27 Mio. PKW im Jahr 2050. Dies entspricht einer Zunahme von 13,3 %. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich die durchschnittliche Fahrleistung der PKW in den vier Teilregionen bis 2050 nicht wesentlich verändert. Da sich aufgrund der Bevölkerungsentwicklung der Anteil der in Österreich, der Schweiz und Liechtenstein zugelassenen Fahrzeuge am regionalen Fahrzeugbestand erhöht und diese durchschnittlich weniger Kilometer im Jahr zurücklegen als Fahrzeuge im deutschen Teil der Bodenseeregion, nimmt die durchschnittliche Jahresfahrleistung aller Fahrzeuge bis zum Jahr 2050 leicht ab.

Alternative Antriebsarten bleiben im Betrachtungszeitraum eine Nischenanwendung. In Anlehnung an das Trendszenario der Shell-PKW-Studie wird davon ausgegangen, dass bis zum Jahr 2050 Elektro-PKW einen Anteil an den Neuzulassungen von 8,2 % erreichen. Die größten Anteile haben nach wie vor die Benzin-PKW mit 46,4 % und Diesel-PKW mit 44,2 %. Die Anteile der Fahrzeuge mit Gas- und Flüssiggasantrieb und sonstigen Antriebsarten an den Neuzulassungen bleiben mit jeweils unter 1 % marginal.

Die PKW in der Bodenseeregion sind im Schnitt etwa 8 Jahre alt. Bis sich der PKW-Bestand einmal vollständig erneuert, vergehen etwa vierzig Jahre. Dementsprechend liegt im Jahr 2050 der Anteil der elektrisch betriebenen PKW am Gesamtbestand unter dem Anteil an den Neuzulassungen, und zwar bei etwa 7 %. Der Anteil der Benzin-PKW am Bestand wird sich deutlich reduzieren, und zwar von 67 % im Jahr 2010 auf nur noch 51 % im Jahr 2012, während sich der Anteil der Diesel-PKW von 32 % auf 41 % erhöht. Der Grund für diese Entwicklung liegt darin, dass die Benzin-PKW im Basisjahr ein wesentlich höheres Durchschnittsalter haben als die Diesel-PKW und daher früher aus dem Bestand ausscheiden.

Die Gesamtfahrleistung der PKW nimmt im Betrachtungszeitraum geringfügig ab, nämlich von 6,73 Milliarden auf 6,59 Mrd.

Fahrzeugkilometer. Bei dieser Abnahme handelt es sich um einen statistischen Effekt, der aufgrund des bereits beschriebenen stärkeren Bevölkerungswachstums in der schweizerischen, liechtensteinischen und österreichischen Bodenseeregion eintritt.

Der Anteil der Krafräder am Modalsplit der vier Teilregionen bleibt ebenfalls unverändert. Die Anzahl der Krafräder wächst von 184.409 im Jahr 2010 auf 211.823 im Jahr 2050. Gleichmaßen steigt ihre Fahrleistung von 259 Mio. auf 303 Mio. Fahrzeugkilometer. Im Trendszenario wird davon ausgegangen, dass Krafräder mit Elektroantrieb bis zum Jahr 2050 einen Zulassungsanteil von 10 % erreichen werden. Dieser für ein Trendszenario relativ hohe Anteil wurde gewählt, da bei Krafrädern das Reichweitenproblem (und damit verbunden auch das Speicher- und Gewichtsproblem) des Elektroantriebs aufgrund einer geringeren durchschnittlichen Wegelänge nicht in gleich hohem Maße wie bei PKW besteht. Die technologischen Hürden sind mithin niedriger und die Markteinführung kann rascher erreicht werden. Das Beispiel China zeigt, dass es bereits mit der vorhandenen Technologie möglich ist, zumindest den Motorroller-Bestand ganzer Großstädte zu elektrifizieren. Somit erscheint ein Zulassungsanteil von 10 % bis 2050 auch in demokratisch verfassten und marktwirtschaftlich ausgerichteten Gesellschaften erreichbar.

Die Fahrleistung des Öffentlichen Nahverkehrs (Bus und Bahn) wird sich aufgrund des stärkeren Wachstums der schweizerischen und österreichischen Teilregionen bis zum Jahr 2050 ungeachtet des gleichzeitigen Ausbaus der Straßeninfrastruktur leicht erhöhen. So steigert sich die Fahrleistung des Busverkehrs von 105,92 auf 116,08 Mio. Fahrzeugkilometer und des Bahnverkehrs von 51,28 auf 60,49 Mio. Fahrzeugkilometer.

Im Trendszenario werden Busse auch im Jahr 2050 in der Regel von einem Dieselantrieb angetrieben. Der Elektroantrieb gewinnt an Bedeutung, erreicht aber lediglich einen Zulassungsanteil von 10 %.

Die Bahnstrecken in der österreichischen, schweizerischen und liechtensteinischen Teilregion sind bereits im Basisjahr vollständig elektrifiziert, während das deutsche Streckennetz mit Ausnahme der Hochrheinbahn Konstanz HBF – Radolfzell – Singen (Hohentwiel) – Schaffhausen – Erzingen (– Basel), der Schwarzwaldbahn Singen (Hohentwiel) – Hattingen – Immendingen (– Offenburg) und der Gäubahn

Immendingen bzw. Hattingen – Tuttlingen (– Stuttgart HBF) und dem kurzen deutschen Abschnitt der Vorarlbergbahn Lindau HBF – Staatsgrenze D/A (– Bludenz) nicht elektrifiziert ist. Allerdings befindet sich die Elektrifizierung von zwei weiteren Strecken im deutschen Regionsteil bereits im Bau. Dies betrifft die Bahnstrecken Lindau HBF – Hergatz – Kisslegg (– Memmingen – München HBF) und Lindau – HBF – Friedrichshafen Stadt – Ravensburg (– Ulm HBF). Die Maßnahmen sollen bis zum Jahr 2020 bzw. 2021 abgeschlossen werden. Im Trendszenario wird daher davon ausgegangen, dass sich in der deutschen Teilregion der Anteil der Fahrleistung im Schienenpersonenverkehr, die auf elektrifizierten Strecken erbracht wird, bis zum Jahr 2050 von 57 % auf 65 % erhöht.

Der Fußgängerverkehr nimmt aufgrund der Einwohnerentwicklung leicht zu, und zwar von 1,09 Mrd. Personenkilometer im Jahr 2010 auf 1,23 Mrd. Personenkilometer im Jahr 2050. Ähnliches gilt für den Radverkehr, der sich von 902,42 Mio. Fahrzeugkilometer auf 1,01 Mrd. Fahrzeugkilometer erhöht. Eine deutliche Verkehrsverlagerung auf den Fuß- und Radverkehr unterbleibt, weil es nicht gelingt, Anreize für eine flächensparende und auf den Öffentlichen Nahverkehr abgestimmte Siedlungsentwicklung zu setzen.

Güterverkehr:

Für den Güterverkehr konnte im Rahmen der Arbeit keine genauere Schätzung der zukünftigen Verkehrsnachfrage erfolgen. Es wird daher pauschal angenommen, dass sich die Transportleistung wie auch die Fahrleistung im Straßengüterverkehr während des Betrachtungszeitraums gegenüber dem Basisjahr um 50 % erhöht.

Ferner wird von einer gleichbleibenden Auslastung der Schweren und Leichten Straßengüterverkehrsfahrzeuge ausgegangen. Aus diesen Annahmen ergibt sich, dass auch die Anzahl der Güterverkehrsfahrzeuge im Untersuchungszeitraum um 50 % zunimmt: Bei den Leichten Güterverkehrsfahrzeugen von 70.454 auf 105.682, bei den Schweren Güterverkehrsfahrzeugen von 19.333 auf 29.001.

Bei den Leichten Nutzfahrzeugen hat der Dieselantrieb im Basisjahr einen Zulassungsanteil von etwa 83 %, auf den Benzinantrieb entfallen die verbleibenden 17 %. Die zukünftigen Zulassungsanteile werden in Anlehnung an das Trendszenario der Shell-Nutzfahrzeugstudie (Shell

Deutschland Oil GmbH, 2016) modelliert. Danach tritt bei den Leichten Nutzfahrzeugen aufgrund der technologischen Entwicklung eine Diversifizierung der Antriebsarten ein: Neben Benzin- und Dieselantrieb wird es im Jahr 2019 auch eine größere Anzahl Leichter Nutzfahrzeuge mit Hybridantrieb, Elektroantrieb und Erdgasantrieb geben. Dieser Entwicklungspfad erscheint aus heutiger Sicht plausibel, da bereits heute mehrere große Hersteller Leichte Nutzfahrzeuge mit diesen Antrieben in ihrem Programm haben, beispielsweise VW, Fiat und Ford. Im Trendszenario sinken dementsprechend und in Anlehnung an die Shell-Nutzfahrzeugstudie (Shell Deutschland Oil GmbH, 2016) die Zulassungsanteile von Diesel- und Benzinfahrzeugen im Trendszenario auf 72 % bzw. 5 % der Neuzulassungen. Die restlichen 28 % entfallen auf Hybridfahrzeuge (15 %), auf erdgasbetriebene Fahrzeuge (5 %) und auf Elektrofahrzeuge (4 %).

Anders stellt sich die Situation bei den Schwere Nutzfahrzeugen dar: Hier liegt der Neuzulassungsanteil der Dieselfahrzeuge im Basisjahr bei nahezu 100 %. Die Entwicklung von alternativen Antrieben für Schwere Nutzfahrzeuge stellt eine große technologische Herausforderung dar, die aufgrund fehlender politischer Impulse und des fragmentierten Vorgehens der Akteure im Trendszenario nicht bewältigt werden kann. Dementsprechend spielen alternative Antriebe auch im Jahr 2050 nur eine marginale Rolle und beschränken sich auf Nischenanwendungen, etwa im Bereich der City-Logistik. Diese marginale Rolle findet ihren Ausdruck in einem Neuzulassungsanteil von nur 5 % Elektrofahrzeugen am Ende des Betrachtungszeitraums.

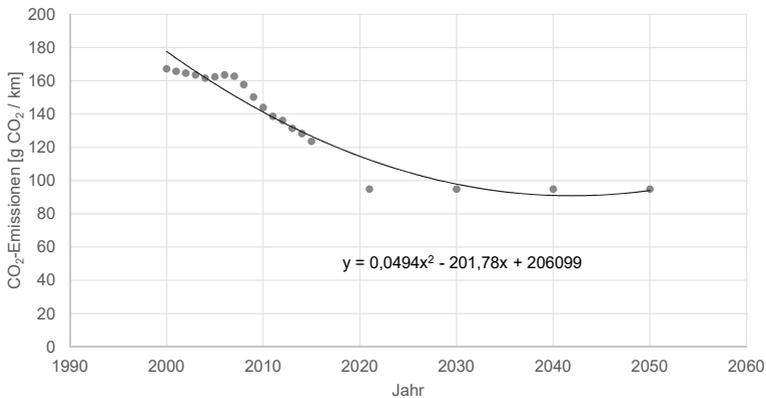
Energieeffizienz der Fahrzeuge:

Es wird angenommen, dass der Besetzungsgrad der Personenverkehrsfahrzeuge (d. h. die durchschnittliche Anzahl der Fahrgäste je Fahrzeug) und der Auslastungsgrad der Güterverkehrsfahrzeuge (d. h. die durchschnittliche Beladung) im Zeitverlauf unverändert bleiben. Der Grund für diese Annahme sind fehlende regionalisierte Prognosedaten.

Bei Fahrzeugen mit Verbrennungsantrieben (Benzin, Diesel, Erdgas und Flüssiggas) wird davon ausgegangen, dass sich der Durchschnittsverbrauch der neuzugelassenen Fahrzeuge von 2010 bis 2050 um ein Drittel reduziert. Hierbei handelt es sich um eine Trendprognose auf

der Grundlage von Daten aus dem österreichischen CO₂-Monitoring (siehe Abbildung 43).

Abbildung 43: CO₂-Emissionen neuzugelassener PKW in Österreich 2000-2050



Quelle: Eigene Berechnung auf der Grundlage von Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft & Umweltbundesamt, 2011-2016.

Bei den Hybrid- und Elektrofahrzeugen wird keine weitere Effizienzsteigerung angenommen, da diese Antriebstechnologien per se wesentlich effizienter sind als Verbrennungsmotoren. Dementsprechend wird davon ausgegangen, dass bei diesen Antriebsarten das Potenzial für weitere Effizienzsteigerungen gering ist und im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt werden kann.

Erneuerbare Energieerzeugung:

Die Ausschöpfung des technischen Potenzials für die regenerative Energieerzeugung entspricht dem im BAER-Projekt untersuchten Trendszenario (Droege et al., 2014). Für die Energiepartei Mobilität ist insbesondere die Erzeugung von Strom, Biodiesel und Biogas relevant.

Bei der photovoltaischen Stromerzeugung wird im Trendszenario davon ausgegangen, dass 50 % des hebbaren Potenzials bis 2050 ausgeschöpft werden. Dies entspricht einer Zunahme der Stromerzeugung von 600 GWh im Jahr 2010 auf 2.278 GWh im Jahr 2050.

Bei der Stromerzeugung durch Wind wird von einer vollständigen Ausnutzung des technischen Potenzials ausgegangen, wobei im Gegensatz zum Alternativ- und zum Zielszenario das Repowering bestehender Anlagen unterbleibt. Dadurch wächst die Stromerzeugung von 34 GWh/a im Jahr 2010 auf 1.220 GWh/a im Jahr 2050.

Bei der Wasserkraft wird im Trendszenario wie in den beiden anderen Szenarien davon ausgegangen, dass das hebbare Potenzial im Betrachtungszeitraum vollständig ausgeschöpft wird. Da die Wasserkraft im österreichischen und schweizerischen Teil der Bodenseeregion bereits in der Vergangenheit stark ausgebaut wurde und größere Wasserkraftanlagen sowohl ökologisch bedenklich als auch politisch kaum noch durchsetzbar sind, entspringt das hebbare Potenzial vor allem Kleinstwasserkraftanlagen. Deren Realisierung steigert die Stromerzeugung aus Wasserkraft von 2.603 GWh/a im Jahr 2010 auf 4.198 GWh/a im Jahr 2050.

Auch bei der Biomassenutzung und der Erzeugung von Biogas wird in allen drei Szenarien von einer vollständigen Nutzung des hebbaren Potenzials ausgegangen. Entsprechend den im Kapitel Potenzialermittlung beschriebenen Annahmen wird davon ausgegangen, dass 20 % der Ackerflächen für die Erzeugung von Biomasse genutzt werden können.

Für das Trendszenario ist nicht davon auszugehen, dass es zur Produktion von Überschussstrom kommt. Dementsprechend wird auch keine Produktion von E-Methan als Speichermedium überschüssiger Energie stattfinden.

Im Trendszenario kommt es zu keiner Nutzung von Verkehrsflächen für die Erzeugung von Solarstrom. Dies erklärt sich aus der verhaltenen Technologieentwicklung in diesem Szenario und der eingeschränkten Bereitschaft von regionaler Wirtschaft und Politik, innovative Ansätze zu unterstützen.

7.2 Merkmale des Alternativszenarios

Im Alternativszenario wird davon ausgegangen, dass sich alternative Mobilitätsformen und erneuerbare Energietechnologien in der Bodenseeregion rascher verbreiten als im Trendszenario. Erneuerbare Energietechnologien gelangen aufgrund von technologischer Innovation innerhalb und außerhalb der Region schnell zur Marktreife. Steigende

Energiepreise unterstützen die Markteinführung erneuerbarer Energietechnologie und alternativer Antriebsarten und die Verkehrsverlagerung vom Motorisierten Individualverkehr (MIV) zu ÖV und Fuß- und Radverkehr.

Die Bevölkerung ist in diesem Szenario innovationsfreundlich und offen für Experimente. Die Länder und Kantone nehmen eine überwiegend unterstützende Rolle ein: Sie fördern die Forschung und Entwicklung in den Bereichen erneuerbarer Energietechnologien, alternativer Antriebsarten und Mobilitätsformen und unterstützen die Markteinführung neuer Technologien und Antriebsarten durch Pilotprojekte und Förderprogramme. Sie überprüfen und revidieren in ihren Kompetenzbereichen Gesetze und Verordnungen, die der Markteinführung erneuerbarer Energie- und Mobilitätstechnologien im Wege stehen. Die Mehrzahl der Gemeinden unterstützt die regionale Verkehrs- und Energiewende. Sie betreiben Energieraumplanung, erstellen Energie- und Klimaschutzkonzepte und arbeiten an einer besseren Abstimmung von Siedlungs- und Verkehrsentwicklung. Die Umsetzung dieser Konzepte erfolgt u. a. im Rahmen der Bebauungs- und Zonenpläne. Kommunale Förderprogramme unterstützen die Einführung erneuerbarer Energietechnologien und von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben. Auch im Rahmen der eigenen Beschaffung fördern die Kommunen die regionale Verkehrs- und Energiewende.

Für den Öffentlichen Verkehr wird ein grenzüberschreitender integrierter Taktverkehr eingeführt. Ermöglicht wird dies durch eine im Vergleich zum Trendszenario bessere Zusammenarbeit der Verkehrsanbieter in der Region. Gemeinsam gelingt es ihnen, sich bei den Landes- und Kantonalregierungen zusätzliche Mittel für den Ausbau des öffentlichen Nahverkehrs zu sichern. Parallel zur Einführung des integrierten Taktfahrplans wird der »Verkehrsverbund Bodensee« ins Leben gerufen, der von den Kommunen getragen wird und der die bisherigen Verkehrsverbände ersetzt. Die wichtigsten Aufgaben des Verkehrsverbunds Bodensee sind eine einheitliche Fahrplan- und Tarifgestaltung in der Region und die Entwicklung grenzüberschreitender multimodaler Mobility Services. Diese umfassen neben physischen Mobilitätsangeboten auch Online-Services.

Neue Geschäftsmodelle für Energie- und Mobilitätsdienstleistungen werden von den regionalen Energieversorgern und Mobilitätsdienstleistern entwickelt und implementiert.

Im Umfeld der Hochschul- und Forschungseinrichtungen entstehen Innovations-Ökosysteme, die neue Produkte und Dienstleistungen für die Energiewende entwickeln und zur Marktreife bringen.

Die Bodenseeregion wächst weiter zusammen, auch auf der regulatorischen Seite. Hemmnisse für den grenzüberschreitenden Handel und den Austausch von Energie werden schrittweise beseitigt und technische Standards werden vereinheitlicht.

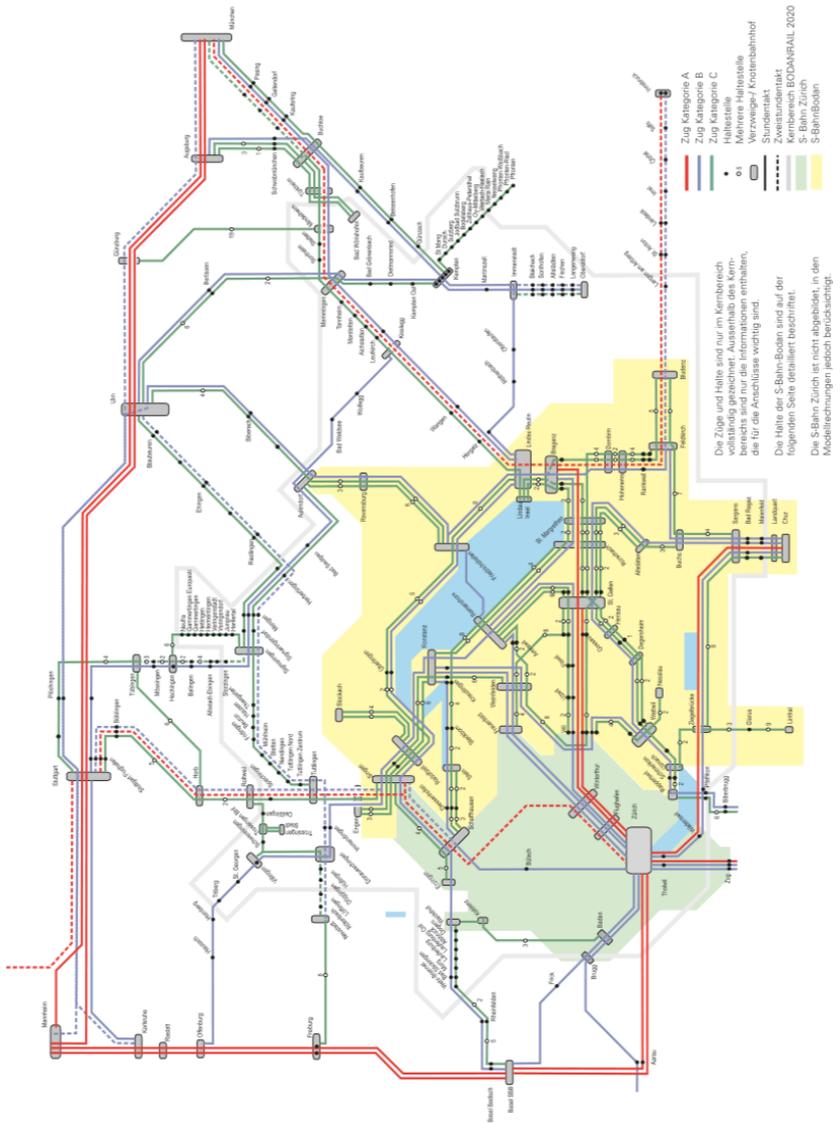
Personenverkehr:

Eine entscheidende Innovation des Alternativszenarios ist die Einführung eines grenzüberschreitenden Verkehrsverbundes und Integralen Taktfahrplans (ITF), die zur Verlagerung von Wegen auf den Öffentlichen Nahverkehr führen. Bereits im Jahr 2001 wurde im Rahmen des Interreg II--Projekts BODAN-RAIL 2020 ein solcher ITF für die Bodenseeregion entwickelt (Kluth, Mück, Rihs, Stohler & Strittmatter, 2001b; Kluth, Mück, Rihs, Stohler & Strittmatter, 2001a; PTV AG, 2010).

Im Rahmen des Projekts wurde auch abgeschätzt, wie sich die Umsetzung auf die Personenverkehrsleistung des Eisenbahnverkehrs auswirkt. Beim Vollausbau des in Abbildung 44 dargestellten Basiskonzepts rechnen die Gutachter regionsweit mit einer Zunahme um 47,5 %. Die größte Zunahme wird Liechtenstein verzeichnen (+ 118,5 %), wo der Bahnverkehr bislang nur eine untergeordnete Rolle spielte. Danach folgen Vorarlberg (+ 78,8 %) und die deutsche Teilregion (+ 70,1 %). Am geringsten wird sich die Personenverkehrsleistung im schweizerischen Teil der Bodenseeregion auswirken (+ 45,3 %), da die dortige Infrastruktur sehr leistungsfähig ist und daher weniger stark ausgebaut werden muss als in den anderen Teilen der Region (Kluth et al., 2001a).

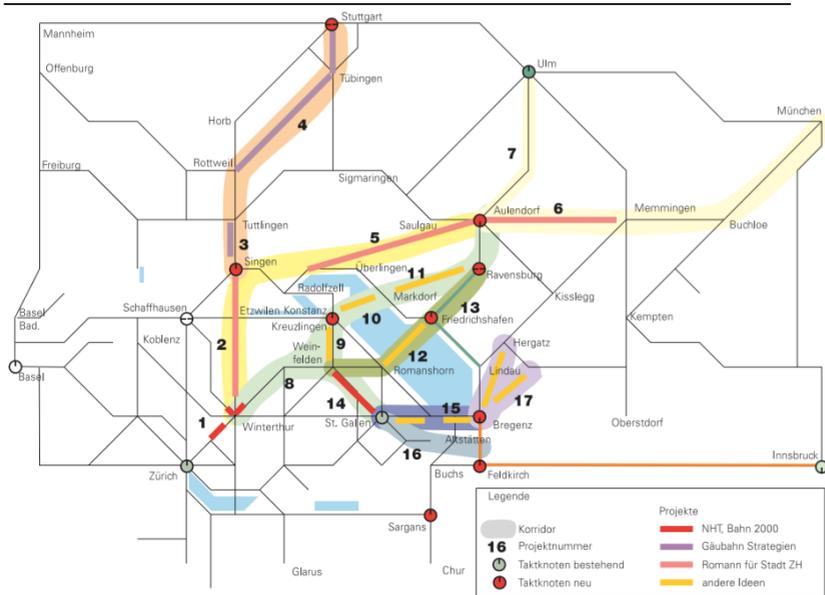
Die Projektpartner des BODAN-RAIL 2020-Projekts schlugen den Ausbau des Bahnnetzes bis zum Jahr 2020 vor (Kluth et al., 2001a). Aufgrund bereits eingetretener Verzögerungen ist dies nicht mehr möglich. Im Alternativszenario »Sanfte Transformation« wird allerdings davon ausgegangen, dass die verbleibenden Ausbaumaßnahmen im nächsten Jahrzehnt durchgeführt werden können und somit der ITF bis 2030 in vollem Umfang eingeführt werden kann.

Abbildung 44: Liniennetz-Konzept BODAN-RAIL



Quelle: Kluth et al., 2001b; Kluth et al., 2001a.

Abbildung 45: TEN-Ergänzungskonzept



Quelle: Kluth et al., 2001b; Kluth et al., 2001a.

Als langfristige Option schlägt BODAN-RAIL 2020 ein Ergänzungskonzept mit weiteren Ausbaumaßnahmen vor, um die Bodenseeregion effektiver an die Metropolregionen Zürich, München und Stuttgart anzubinden und in die sogenannten Transeuropäischen Netze (TEN) zu integrieren. Dieses sogenannte TEN-Ergänzungskonzept (siehe Abbildung 45) enthält Vorschläge für die Beschleunigung und zum Teil großzügige Neutrassierung von Strecken (z. B. zwischen Lindau und Hergatz) sowie Ideen für neue Eisenbahntunnel (z. B. zur Unterquerung des Bodensees und des Säntis-Massivs). Im Alternativszenario »Sanfte Transformation« wird davon ausgegangen, dass dieses TEN-Ergänzungskonzept bis zum Jahr 2050 umgesetzt werden kann.

Die Projektdokumentation von BODAN-RAIL 2020 enthält keine Informationen zu den Auswirkungen des TEN-Ergänzungskonzepts auf die Verkehrsleistung und die Fahrleistung des Schienenpersonenverkehrs. Um die Auswirkungen auf den Modalsplit abzubilden, wird im Alternativszenario »Sanfte Transformation« davon ausgegangen, dass

die Kapazität des Schienenpersonenverkehrs durch die Umsetzung des TEN-Ergänzungskonzepts zusätzlich zur Realisierung des ITF um weitere 50 % wachsen wird. Die Zuwächse sind nach nationalen Teilregionen und kapazitätserhöhenden Maßnahmen aufgeschlüsselt in Tabelle 22 aufgelistet.

Mit der Zunahme der Personenverkehrsleistung wächst auch die Transportkapazität des Schienenpersonenverkehrs. Im Trendszenario wird vereinfachend unterstellt, dass es sich hierbei um einen linearen Zusammenhang handelt. Die neu geschaffene Transportkapazität führt zu einer Verkehrsverlagerung vom Straßenverkehr auf den Schienenverkehr. Allerdings werden keine Personenkilometer verlagert, sondern Reisezeitanteile.

Tabelle 22: Kapazitätzunahme des Schienenpersonenverkehrs im Alternativszenario

	Kapazitätzunahme 2010 bis 2030 durch Taktfahrplan	Kapazitätzunahme 2031 bis 2050 durch TEN-Ergänzungsnetz	Gesamte Kapazitätzunahme 2010 bis 2050
Deutsche Teilregion	+ 70,10 %	+ 34,90 %	+ 105,50 %
Österreichische Teilregion	+ 78,80 %	+ 39,40 %	+ 118,20 %
Schweizerische Teilregion	+ 38,70 %	+19,35 %	+ 58,05 %
Liechtensteinische Teilregion	+ 118,50 %	+ 59,00 %	+ 177,50 %

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Kluth et al., 2001a.

Neben einer Ausweitung des Bahnverkehrs wird im Szenario auch von einer Ausweitung des Busverkehrs ausgegangen, da bei weitem nicht alle Gemeinden der Bodenseeregion einen Bahnanschluss haben. Der Busverkehr bleibt daher auch bei einem deutlich verbesserten Bahnangebot als Zubringer unverzichtbar. Darüber hinaus wird der ITF im Schienenverkehr seine volle Wirkung erst dann entfalten können, wenn auch die Qualität des Zubringerverkehrs verbessert wird. Im Alternativszenario wird daher angenommen, dass im Vergleich zum Basisjahr die Kapazität im Busverkehr und die Fahrleistung um jeweils 100 % zunehmen und die Auslastung der Busse bei durchschnittlich 12 Personen pro Fahrzeug und Fahrt stagniert.

Ferner wird unterstellt, dass sich der Anteil des Fußgänger- und des Fahrradverkehrs am täglichen Reisezeitbudget der Regionsbewohner bis zum Jahr 2050 verdoppelt und sich die Reisezeitanteile der übrigen Verkehrsmittel entsprechend reduzieren. Eine Zunahme des Fuß- und Radverkehrsanteils lässt sich seit mehreren Jahren in vielen europäischen Großstädten feststellen und ist auf mehrere Ursachen zurückzuführen. Dazu gehören ein Wertewandel bei der jüngeren Generation, die weniger autoaffin als die Generationen zuvor ist, ein besseres Image des Fuß- und Radverkehrs, eine stärkere Priorisierung des Fuß- und Radverkehrs in der Verkehrsplanung und, damit verbunden, eine zunehmend bessere Infrastruktur für den Fuß- und Radverkehr.

Im Alternativszenario wird davon ausgegangen, dass sich der bislang nur in Großstädten zu beobachtende Trend auch in der ganzen Bodenseeregion fortsetzt. Treiber dieser Entwicklung könnten neben den oben beschriebenen Faktoren auch neue, kompaktere Formen der Siedlungsentwicklung sein, die das Zufußgehen und Radfahren attraktiver machen. Die ausufernde Siedlungsflächenentwicklung in der Region ebenso wie Vorschläge für eine nachhaltigere Siedlungsstruktur werden in Fachkreisen stark diskutiert (siehe dazu u. a.: Forschungsgruppe Bodenseestadt, 2003; Seifert, Murat, Bühler & Blödt, 2006; Amt der Vorarlberger Landesregierung & Vorarlberger Rheintalgemeinden, 2006; Herzberg, Scherer & Schnell, 2010; Stadtland Dipl.-Ing. Alfred Eichberger GmbH, 2014).

Durch die Verkehrsverlagerung auf die Öffentlichen Verkehrsmittel sowie auf den Fuß- und Radverkehr sinkt die Verkehrsleistung des MIV, damit auch die Nachfrage nach Fahrzeugen und somit die Neuzulassungen von PKW und Krafrädern.

Bezüglich des Anteils der verschiedenen PKW-Antriebe orientiert sich das Alternativszenario »Sanfte Transformation« am Alternativszenario der Shell-PKW-Studie. Den stärksten Zuwachs bei den Neuzulassungen verzeichnen demnach PKW mit Hybridantrieben, deren Anteil am Ende des Betrachtungszeitraums 29 % betragen wird, während Elektro-PKW einen Anteil von 20 % erreichen. Im Unterschied zum Trendszenario setzen sich auch Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb auf dem Markt durch. Allerdings beginnt die Markteinführung dieser Technologie erst im Jahr 2020 und der Anteil an den Neuzulassungen

erreicht bis zum Ende des Betrachtungszeitraums lediglich 10,5 %. Einen noch geringeren Anteil an Neuzulassungen weisen Fahrzeuge mit Erdgas-Antrieb auf: Er steigt von 0,2 % im Basisjahr auf 2,7 % am Ende des Betrachtungszeitraum. Deutlich zurückgehen werden die Neuzulassungsanteile der PKW mit Benzinmotor (Rückgang um 68,5 % im Basisjahr auf 17,4 % im Jahr 2050) und mit Dieselmotor (Rückgang um 30,7 % auf 16,6 %). Der Anteil der PKW mit Flüssiggasantrieb bleibt mit 0,1 % über den gesamten Betrachtungszeitraum hinweg sehr gering.

Bei den Kraffrädern erreicht der elektrische Antrieb im Jahr 2050 einen Anteil von 50 % an den Neuzulassungen, während die verbleibenden 50 % der neuzugelassenen Kraffräder auch am Ende des Betrachtungszeitraums noch über einen Benzinantrieb verfügen werden.

Elektrobusse erreichen im Jahr 2050 einen Neuzulassungsanteil von 60 %. Dieser hohe Anteil erklärt sich aus der aktiven Unterstützung der regionalen Energiewende durch den größten Teil der Kommunen. Die verbleibenden 40 % der im Jahr 2050 neuzugelassenen Busse verfügen über einen Dieselantrieb.

Da Politik und Öffentlichkeit die Energie- und Verkehrswende größtenteils unterstützen, werden die wichtigsten Strecken des Eisenbahnnetzes in der deutschen Teilregion elektrifiziert. Dadurch steigt der Anteil der Fahrleistung auf elektrifizierten Strecken im Schienenpersonenfernverkehr von 41,3 % auf 75,0 % und im Schienenpersonennahverkehr von 32,9 % auf 60,0 %. Es werden aber nicht alle Strecken elektrifiziert, da dies für viele Nebenstrecken nicht wirtschaftlich wäre.

Der Fuß- und Radverkehr wächst aufgrund der Einwohnerentwicklung und günstigerer Rahmenbedingungen (kompaktere und multifunktionale Siedlungsentwicklung, Verkehrsberuhigung und bessere Abstimmung von Siedlungs- und Verkehrsentwicklung).

Güterverkehr:

Die Annahmen zu Transport- und Fahrleistung des Straßengüterverkehrs decken sich mit jenen des Trendszenarios. Allerdings setzen sich im Alternativszenario Straßengüterverkehrsfahrzeuge mit alternativen Antriebsarten schneller durch. Die Zulassungsanteile der alternativen Antriebsarten orientieren sich dabei am Alternativszenario der Shell-Nutzfahrzeugstudie (Shell Deutschland Oil GmbH, 2016).

Den größten Neuzulassungsanteil bei den Leichten Nutzfahrzeugen haben im Jahr 2050 nach wie vor Fahrzeuge mit Dieselantrieb, deren Anteil sich jedoch von 93,1 % auf 48,2 % fast halbiert. Es folgen Fahrzeuge mit Hybridantrieb (21,0 %), Elektrofahrzeuge (21 %), Fahrzeuge mit Brennstoffzellen-Antrieb (8,0 %) und Fahrzeuge mit Benzinantrieb (4,0 %).

Bei den Schweren Nutzfahrzeugen sinkt der Neuzulassungsanteil der Dieselfahrzeuge von nahezu 100 % im Basisjahr auf nur noch 20 % im Jahr 2050. Den größten Zulassungsanteil (60 %) werden dann Fahrzeuge mit Flüssiggasantrieb einnehmen. Jeweils 10 % entfallen auf Fahrzeuge mit Elektroantrieb und mit Hybridantrieb.

Die Fahrleistung des Schienengüterverkehrs auf elektrifizierten Strecken steigt von 57 % auf 80,0 % im Jahr 2050.

Energieeffizienz der Fahrzeuge:

Wie im Trendszenario wird angenommen, dass der Besetzungsgrad der Personenverkehrsfahrzeuge (d. h. die durchschnittliche Anzahl der Fahrgäste je Fahrzeug) und der Auslastungsgrad der Güterverkehrsfahrzeuge (d. h. die durchschnittliche Beladung) im Zeitverlauf unverändert bleiben. Ebenfalls wird unterstellt, dass sich der Durchschnittsverbrauch der neuzugelassenen Fahrzeuge mit Verbrennungsantrieben (Benzin, Diesel, Erdgas und Flüssiggas) von 2010 bis 2050 um ein Drittel reduziert.

Erneuerbare Energieerzeugung:

Die Ausschöpfung des technischen Potenzials für die regenerative Energieerzeugung entspricht weitgehend jener des im BAER-Projekt untersuchten Exzellenzszenarios (Droege et al., 2014). Für die Energiepartei Mobilität ist insbesondere die Erzeugung von Strom, Biodiesel und Biogas relevant.

Bei der photovoltaischen Stromerzeugung wird im Trendszenario davon ausgegangen, dass 100 % des hebbaren Potenzials bis 2050 ausgeschöpft werden. Dies entspricht einer Zunahme der Stromerzeugung von 600 GWh im Jahre 2010 auf 4.950 GWh im Jahr 2050.

Bei der Stromerzeugung durch Wind wird von einer vollständigen Ausnutzung des technischen Potenzials und einem Repowering älterer Anlagen ausgegangen. Dadurch wächst die Stromerzeugung von 34 GWh/a im Jahr 2010 auf 1.220 GWh/a im Jahr 2050.

Bei der Wasserkraft wird, wie in den beiden anderen Szenarien, angenommen, dass das hebbare Potenzial im Betrachtungszeitraum vollständig ausgeschöpft wird. Da die Wasserkraft im österreichischen und im schweizerischen Teil der Bodenseeregion bereits in der Vergangenheit stark ausgebaut wurde und weitere größere Wasserkraftanlagen sowohl ökologisch bedenklich als auch politisch kaum noch durchsetzbar sind, kann weiteres hebbares Potenzial nur durch Kleinwasserkraftanlagen entstehen. Deren Realisierung steigert die Stromerzeugung aus Wasserkraft von 2.603 GWh/a im Jahr 2010 auf 4.198 GWh/a im Jahr 2050.

Auch bei der Biomassenutzung und der Erzeugung von Biogas wird im Alternativszenario von einer vollständigen Nutzung des hebbaren Potenzials ausgegangen. Entsprechend den im Kapitel 6.9 beschriebenen Annahmen wird davon ausgegangen, dass 20 % der Ackerflächen für die Erzeugung von Biomasse genutzt werden können.

1 % der Verkehrsflächen (z. B. Parkplätze, Lärmschutzwände, Überdachungen entlang von Autobahnen) werden photovoltaisch für die Stromerzeugung genutzt.

7.3 Merkmale des Zielszenarios

Im Zielszenario einigen sich die Entscheidungsträger in der Bodenseeregion darauf, bis zum Jahr 2050 den Endenergiebedarf der Region vollständig mit regional erzeugter erneuerbarer Energie zu decken. Für die Umsetzung wird eine neue internationale Institution geschaffen, die verschiedene Aktivitäten der Länder und Kantone in der Region unterstützt, koordiniert und die Zielerreichung regelmäßig prüft. Die Kommunen sind in die Energieautonomie-Aktivitäten eingebunden und unterstützen die Erreichung der ambitionierten Ziele. Potenzialflächen für die Erzeugung erneuerbarer Energien werden konsequent planerisch gesichert und es werden Anreize für private wie öffentliche Bauherren und Investoren gesetzt, um Potenziale für die Energieerzeugung wie auch für die Steigerung der Energieeffizienz zu heben.

Eine wichtige Rolle spielt in diesem Zusammenhang eine interkommunal organisierte und auf den Öffentlichen Nahverkehr abgestimmte, kompakte Siedlungsentwicklung. Sie fördert den Fuß- und Radverkehr sowie die Nutzung des Öffentlichen Nahverkehrs und steigert somit langfristig die Energieeffizienz des Verkehrssystems. Damit erhöhen sich

die Anteile des Fuß- und Radverkehrs und des Öffentlichen Nahverkehrs am Modalsplit.

Wie im Alternativszenario werden auch im Zielszenario ein grenzüberschreitender ITF und ein einheitliches Verkehrs- und Tarifangebot eingeführt. Außerdem wird der Bahnverkehr bis 2050 vollständig elektrifiziert.

Neue Technologien für die Erzeugung, Übertragung und Speicherung erneuerbarer Energie und Fahrzeuge mit alternativen Antriebsarten verbreiten sich rasch in der Region.

Etwa bis zum Jahr 2030 beschließen die Landes- bzw. Kantonalregierungen einen Zulassungsstopp für Fahrzeuge mit konventionellen Antrieben. Dadurch wird sichergestellt, dass im Jahr 2050 – je nach Fahrzeugtyp – keine oder nur eine sehr geringe Anzahl von Fahrzeugen mit konventioneller Antriebstechnik im Bestand verbleibt.

Personenverkehr:

Die Verkehrsverlagerung vom MIV auf Fuß- und Radverkehr entspricht jener des Alternativszenarios.

Wie oben beschrieben, erfolgt etwa im Jahr 2030 ein Zulassungsstopp für Fahrzeuge, die mit fossilen Brennstoffen angetrieben werden.

Die Neuzulassungen aller PKW mit fossilen Antrieben (Benzin-, Diesel-, Erdgas- und Flüssiggasmotor) sinken bis zum Jahr 2030 auf 0 %, da ab dann ein Zulassungsstopp gilt.

Entsprechend den im Alternativszenario beschriebenen Trends nehmen bei den PKW zunächst die Neuzulassungen von Fahrzeugen mit Hybridantrieben stark zu: Sie steigen bis zum Jahr 2030 auf einen Anteil von 25 %. Im Alternativszenario fungieren Elektro-Benzin-Hybridantriebe allerdings nur als Brückentechnologie, da auch sie fossile Brennstoffe benötigen, wenn auch in geringerem Umfang als Fahrzeuge mit konventionellen Verbrennungsmotoren. Entsprechend wird im Zielszenario davon ausgegangen, dass sie nur bis zum Jahr 2035 zugelassen werden dürfen, also fünf Jahre länger als Fahrzeuge mit konventionellen Verbrennungsmotoren.

Der Zulassungsanteil von Elektro-PKW steigt zunächst bis zum Jahr 2030 auf 50 % an. Sobald ab dem Jahr 2036 keine Fahrzeuge mit fossilen Brennstoffen mehr zugelassen werden dürfen, beträgt der Anteil an den

Neuzulassungen 66,7 %. Er bleibt auf diesem Niveau bis zum Ende des Betrachtungszeitraums.

Aufgrund der dynamischen Technologieentwicklung spielt im Zielszenario auch der Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb eine wesentliche Rolle. Es wird davon ausgegangen, dass die Markteinführung im Jahr 2025 erfolgt. Aufgrund des bis dahin bereits absehbaren Zulassungstopps für Fahrzeuge mit fossilen Antrieben entwickelt sich der Neuzulassungsanteil dynamisch und steigt bis zum Jahr 2030 auf 25 %. Mit Inkrafttreten des Zulassungstopps für Hybridantriebe im Jahr 2035 steigt der Zulassungsanteil der Brennstoffzellenfahrzeuge auf 33,3 %.

Da Krafräder längere Erneuerungszyklen haben als PKW, wird der Zulassungstopp für fossil angetriebene Fahrzeuge bereits im Jahr 2025 verhängt. In diesem Jahr erreicht der Zulassungsanteil elektrisch angetriebener Krafräder, der zuvor stetig angestiegen ist, 100 %. Dass es bereits mit bestehender Technologie möglich ist, den gesamten Krafrad-Bestand zu elektrifizieren, zeigt das Beispiel chinesischer Großstädte. Aus Gründen der Luftreinhaltung sind dort seit mehr als zehn Jahren nur noch Elektro-Mopeds bzw. Roller und E-Scooter erlaubt.

Bei den Bussen werden ab 2030 nur noch Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb zugelassen. Dieses Ziel erscheint durchaus erreichbar zu sein, da mehrere Großstädte in den DACH-Ländern das Ziel verfolgen, ihre Omnibus-Flotte bereits bis zum Jahr 2030 vollständig zu elektrifizieren, so z. B. Berlin (Fülling, 2018) und München (Münchner Verkehrsgesellschaft mbH, 2019).

Im Hinblick auf den Eisenbahnverkehr wird davon ausgegangen, dass alle Bahnstrecken in der deutschen Teilregion bis 2050 elektrifiziert werden und somit der gesamte Bahnverkehr in der Bodenseeregion elektrisch ist.

Die Zunahme des Fuß- und Radverkehrs entspricht jener des Alternativszenarios.

Güterverkehr:

Die Annahmen zu Transport- und Fahrleistung des Straßengüterverkehrs decken sich mit denen des Trendszenarios. Es wird im Zielszenario jedoch von einer vollständigen Umstellung des Fahrzeugbestands der Leichten und Schwere Straßengüterverkehrsfahrzeuge bis zum Jahr

2050 ausgegangen. Dieser beinhaltet einen Zulassungsstopp für Fahrzeuge mit fossiler Antriebstechnologie im Jahr 2030. Sie werden sukzessive durch Fahrzeuge mit alternativen Antrieben ersetzt.

Straßengüterverkehrsfahrzeuge verbrauchen im beladenen Zustand viel Energie und müssen große Entfernungen überwinden, wenn sie im Fernverkehr zum Einsatz kommen. Die Batterien von Elektrofahrzeugen können je kg Gewicht deutlich weniger Energie speichern als ein Diesel- oder ein Benzintank. Dies setzt der Reichweite und der Wirtschaftlichkeit von elektrisch angetriebenen Straßengüterverkehrsfahrzeugen enge Grenzen. Der in seiner technologischen Entwicklung im Prinzip weit fortgeschrittene elektrische Antrieb kann also nur eingeschränkt bei Straßengüterverkehrsfahrzeugen eingesetzt werden. Daher stellt die Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs eine große technologische Herausforderung vor allem für die Batterieentwicklung dar.

Bei den Schweren Straßengüterverkehrsfahrzeugen wird im Zielszenario davon ausgegangen, dass Elektrofahrzeuge ab dem Jahr 2030 trotz der beschriebenen technischen Einschränkungen einen Zulassungsanteil von 30 % erreichen. Dieser relativ große Anteil an den Neuzulassungen erklärt sich daraus, dass ein gewisser Anteil von Schweren Straßengüterverkehrsfahrzeugen, z. B. Kommunalfahrzeuge, auf Kurzstrecken eingesetzt wird. In diesem Einsatzspektrum kann der elektrische Antrieb den mit fossilen Brennstoffen betriebenen Verbrennungsmotor am leichtesten ersetzen. Ferner wird bei Hybridfahrzeugen von einem Neuzulassungsanteil von 10 % ausgegangen, da der Hybridantrieb gewissen Nachteile eines ausschließlich elektrischen Antriebs wie die begrenzte Reichweite und die begrenzte Leistung ausgleichen kann.

Es wird jedoch angenommen, dass im Güterverkehr Fahrzeuge mit Flüssiggasantrieb den größten Anteil an den Neuzulassungen der Schweren Straßengüterverkehrsfahrzeuge haben. Flüssiggas hat eine hohe Energiedichte und eignet sich daher auch als Treibstoff für Schwere Güterverkehrsfahrzeuge. Schwere Nutzfahrzeuge mit Flüssiggasantrieb sind bereits auf dem Markt, werden derzeit aber mit verflüssigtem Erdgas, einem fossilen Brennstoff, betrieben. Flüssiggas lässt sich aber auch aus erneuerbarer und in der Bodenseeregion verfügbarer Biomasse herstellen (Liquified Biomethane – LBM oder Liquified Synthetic Methane – LSM) (Deutsche Energieagentur [DNA], 2014). Im Zielszenario wird

daher davon ausgegangen, dass bis zum Jahr 2050 60 % der Schwere Straßengüterverkehrsfahrzeuge mit Flüssiggas (LBM oder LSM) betrieben werden, das aus Biomasse unter Verwendung von regional aus PV oder Wasserkraft erzeugtem Strom hergestellt wird.

Bei den Leichten Straßengüterverkehrsfahrzeugen ist die Umstellung schneller zu erreichen. Bereits heute (2019) haben sich einige Großunternehmen wie Ikea, Metro und die Deutsche Post AG dazu verpflichtet, 50 % ihrer Fahrzeuge im Gewichtssegment zwischen 3,5 und 7,5 t bis zum Jahr 2030 auf elektrischen Antrieb umzustellen (The Climate Group, 2019). Im Zielszenario wird davon ausgegangen, dass sich der bereits jetzt erkennbare Trend verstärkt und Elektrofahrzeuge bei den Leichten Straßengüterverkehrsfahrzeugen ab dem Jahr 2030 einen Zulassungsanteil von 65 % erreichen. Dieser relativ große Anteil erklärt sich daraus, dass viele dieser Fahrzeuge im Lieferverkehr auf Kurzstrecken eingesetzt werden. In diesem Einsatzspektrum kann der elektrische Antrieb den mit fossilen Brennstoffen betriebenen Verbrennungsmotor am ehesten ersetzen. Ferner wird von einem Neuzulassungsanteil von 35 % für Brennstoffzellenfahrzeuge ausgegangen, da dieser Antrieb Nachteile eines ausschließlich elektrischen Antriebs, wie Begrenzungen in Reichweite und Leistung, vermeiden kann. Nachteile des Brennstoffzellenantriebs sind die gegenwärtig (2019) noch nicht absehbare Serienreife und die hohen Kosten.

Der Schienengüterverkehr wird ab dem Jahr 2050 vollständig auf elektrifizierten Strecken erbracht.

Energieeffizienz der Fahrzeuge:

Wie im Trendszenario wird angenommen, dass der Besetzungsgrad der Personenverkehrsfahrzeuge (d. h. die durchschnittliche Anzahl der Fahrgäste je Fahrzeug) und der Auslastungsgrad der Güterverkehrsfahrzeuge (d. h. die durchschnittliche Beladung) im Zeitverlauf unverändert bleiben. Ebenfalls wird davon ausgegangen, dass sich der Durchschnittsverbrauch der neuzugelassenen Fahrzeuge mit Verbrennungsantrieben (Benzin, Diesel, Erdgas und Flüssiggas) von 2010 bis 2050 um ein Drittel reduziert.

Erneuerbare Energieerzeugung:

Die Ausschöpfung des technischen Potenzials für die regenerative Energieerzeugung entspricht weitgehend jener des im BAER-Projekt untersuchten Exzellenzscenario (Droege et al., 2014). Für die Energiepartei Mobilität ist insbesondere die Erzeugung von Strom, Biodiesel und Biogas relevant.

Bei der photovoltaischen Stromerzeugung wird im Trendszenario davon ausgegangen, dass 100 % des hebbaren Potenzials bis 2050 ausgeschöpft werden. Dies entspricht einer Zunahme der Stromerzeugung von 600 GWh im Jahr 2010 auf 4.950 GWh im Jahr 2050.

Bei der Stromerzeugung durch Wind wird eine vollständige Ausnutzung des technischen Potenzials und ein Repowering älterer Anlagen vorausgesetzt. Dadurch wächst die Stromerzeugung von 34 GWh/a im Jahr 2010 auf 1.220 GWh/a im Jahr 2050.

Bei der Wasserkraft wird, wie in den beiden anderen Szenarien, angenommen, dass das hebbare Potenzial im Betrachtungszeitraum vollständig ausgeschöpft wird. Da die Wasserkraft im österreichischen und schweizerischen Teil der Bodenseeregion bereits in der Vergangenheit stark ausgebaut wurde und größere Wasserkraftanlagen sowohl ökologisch bedenklich als auch politisch kaum noch durchsetzbar sind, bieten nur noch Kleinwasserkraftanlagen hebbares Potenzial. Deren Realisierung steigert die Stromerzeugung aus Wasserkraft von 2.603 GWh/a im Jahr 2010 auf 4.198 GWh/a im Jahr 2050.

Auch bei der Biomassenutzung und der Erzeugung von Biogas wird im Alternativszenario von einer vollständigen Nutzung des hebbaren Potenzials ausgegangen. Entsprechend den im Kapitel 6.9 beschriebenen Annahmen wird davon ausgegangen, dass 20 % der Ackerflächen für die Erzeugung von Biomasse genutzt werden können.

2 % der Verkehrsflächen (z. B. Parkplätze, Lärmschutzwände und Überdachungen entlang von Autobahnen) werden photovoltaisch für die Stromerzeugung genutzt.

Tabelle 23 fasst die Merkmale der drei Szenarien zusammen.

Tabelle 23: Merkmale der Szenarien

Merkmal	Trendszenario	Alternativszenario „Sanfte Transformation“	Zielszenario „Energieautonomie“
PKW	<p>Zunahme der PKW-Fahrleistung um ca. 10 % bis 2050 aufgrund des Bevölkerungswachstums</p> <p>Neuzulassungen im Jahr 2050:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 46,4 % Benzin-PKW: ▶ 44,2 % Diesel-PKW ▶ 8,2 % Elektro-PKW ▶ Andere alternative Antriebsarten jeweils weniger als 1 % 	<p>Rückgang der PKW-Fahrleistung aufgrund des Modal Shifts zum Öffentlichen Nahverkehr</p> <p>Neuzulassungen im Jahr 2050:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 29 % Hybrid-PKW ▶ 20 % Elektro-PKW ▶ 17,4 % Benzin-PKW ▶ 16,6 % Diesel-PKW ▶ 10,5 % Brennstoffzellen-PKW ▶ 2,7 % Erdgas-PKW 	<p>Rückgang der PKW-Fahrleistung aufgrund eines Modal Shifts zum Öffentlichen Nahverkehr</p> <p>Neuzulassungen im Jahr 2050:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 66,7 % Elektro-PKW ▶ 33,3 % Brennstoffzellen-PKW
Krafträder	<p>Zunahme der Kraftrad-Fahrleistung um ca. 10 % bis 2050 aufgrund des Bevölkerungswachstums</p> <p>Neuzulassungen im Jahr 2050:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 90 % Benzin-Krafträder ▶ 10 % Elektro-Krafträder 	<p>Rückgang der Kraftrad-Fahrleistung aufgrund des Modal Shifts zum Öffentlichen Nahverkehr</p> <p>Neuzulassungen im Jahr 2050:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 50 % Benzin-Krafträder ▶ 50 % Elektro-Krafträder 	<p>Rückgang der Kraftrad-Fahrleistung aufgrund des Modal Shifts zum Öffentlichen Nahverkehr</p> <p>Neuzulassungen im Jahr 2050:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 100 % Elektro-Krafträder
Omnibusse	<p>Zunahme der Omnibus-Fahrleistung um ca. 10 % bis 2050 aufgrund des Bevölkerungswachstums</p> <p>Neuzulassungen im Jahr 2050:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 90 % Diesel-Busse ▶ 10 % Elektro-Busse 	<p>Zunahme der Omnibus-Fahrleistung um 50 % bis 2050 aufgrund der Einführung eines ITF</p> <p>Neuzulassungen im Jahr 2050:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 40 % Diesel-Busse ▶ 60 % Elektro-Busse 	<p>Zunahme der Omnibus-Fahrleistung um 50 % bis 2050 aufgrund der Einführung eines ITF</p> <p>Neuzulassungen im Jahr 2050:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 100 % Elektro-Busse

Merkmal	Trendszenario	Alternativszenario „Sanfte Transformation“	Zielszenario „Energieautonomie“
Schiene- personen- verkehr	<p>Leichte Zunahme der Schienenpersonenverkehrsleistung entsprechend Bevölkerungswachstum</p> <p>Anteil der auf elektrifizierten Strecken erbrachten Schienenpersonennahverkehrsleistung 2050:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ Deutsche Teilregion 65 % ▶ Andere Teilregionen 100 % 	<p>Starke Zunahme der Schienenpersonenverkehrsleistung durch Einführung eines integralen Taktfahrplans></p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ Deutsche Teilregion + 105,50 % ▶ Österreichische Teilregion + 118,20 % ▶ Schweizerische Teilregion + 58,05 % ▶ Liechtensteinische Teilregion + 177,5 % <p>Anteil der auf elektrifizierten Strecken erbrachten Schienenpersonennahverkehrsleistung 2050:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ Deutsche Teilregion 75 % ▶ Andere Teilregionen 100 % 	<p>Starke Zunahme der Schienenpersonenverkehrsleistung durch Einführung eines integralen Taktfahrplans</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ Deutsche Teilregion + 105,50 % ▶ Österreichische Teilregion + 118,20 % ▶ Schweizerische Teilregion + 58,05 % ▶ Liechtensteinische Teilregion + 177,5 % <p>Anteil der auf elektrifizierten Strecken erbrachten Schienenpersonennahverkehrsleistung 2050:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ Deutsche Teilregion 100 % ▶ Andere Teilregionen 100 %
Leichte Straßen- güter- verkehrs- fahrzeuge	<p>Zunahme der Fahrleistung um 50 % bis 2050</p> <p>Neuzulassungen im Jahr 2050:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 72 % Dieselantrieb ▶ 15 % Hybridantrieb ▶ 5 % Benzinantrieb ▶ 5 % Erdgasantrieb ▶ 4 % Elektrofahrzeuge 	<p>Zunahme der Fahrleistung um 50 % bis 2050</p> <p>Neuzulassungen im Jahr 2050:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 48,2 % Dieselantrieb ▶ 21,0 % Hybridantrieb ▶ 4 % Benzinantrieb ▶ 21 % Elektroantrieb ▶ 8 % Brennstoffzellenantrieb 	<p>Zunahme der Fahrleistung um 50 % bis 2050</p> <p>Neuzulassungen im Jahr 2050:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 65 % Elektroantrieb ▶ 35 % Hybridantrieb

Merkmal	Alternativszenario		
	Trendszenario	„Sanfte Transformation“	Zielszenario „Energieautonomie“
Schwere Straßen-güter-verkehrs-fahrzeuge	Zunahme der Fahrleistung um 50 % bis 2050 Neuzulassungen im Jahr 2050: ▶ 95 % Dieselantrieb ▶ 5 % Elektroantrieb	Zunahme der Fahrleistung um 50 % bis 2050 Neuzulassungen im Jahr 2050: ▶ 20 % Dieselantrieb ▶ 60 % Flüssig-gasantrieb ▶ 10 % Hybridantrieb ▶ 10 % Elektroantrieb	Zunahme der Fahrleistung um 50 % bis 2050 Neuzulassungen im Jahr 2050: ▶ 60 % Flüssiggas-antrieb ▶ 30 % Elektroantrieb ▶ 10 % Hybrid-fahrzeuge
Schienen-güter-verkehr	Zunahme der Fahrleistung um 50 % bis 2050 80 % der Fahrleistung werden auf elektrifizierten Strecken erbracht.	Zunahme der Fahrleistung um 50 % bis 2050 80 % der Fahrleistung werden auf elektrifizierten Strecken erbracht.	Zunahme der Fahrleistung um 50 % bis 2050 100 % der Fahrleistung werden auf elektrifizierten Strecken erbracht.
Energieverbrauch der Privathaushalte	▶ Gemäß Trendszenario des BAER-Projekts	▶ Gemäß Exzellenzszenario des BAER-Projekts	▶ Gemäß Exzellenzszenario des BAER-Projekts
Energieverbrauch der Industrie	▶ Gemäß Trendszenario des BAER-Projekts	▶ Gemäß Exzellenzszenario des BAER-Projekts	▶ Gemäß Exzellenzszenario des BAER-Projekts
Energieverbrauch von Gewerbe, Handel und Dienstleistungen	▶ Gemäß Trendszenario des BAER-Projekts	▶ Gemäß Exzellenzszenario des BAER-Projekts	▶ Gemäß Exzellenzszenario des BAER-Projekts
Energieverbrauch der Landwirtschaft	▶ Gemäß Trendszenario des BAER-Projekts	▶ Gemäß Exzellenzszenario des BAER-Projekts	▶ Gemäß Exzellenzszenario des BAER-Projekts

Merkmal	Trendszenario	Alternativszenario „Sanfte Transformation“	Zielszenario „Energieautonomie“
Photo- voltaik	▶ Realisierung von 50 % des hebbaren Potenzials bis 2050.	▶ Realisierung von 100 % des hebbaren Potenzials bis 2050	▶ Realisierung von 100 % des hebbaren Potenzials bis 2050
Windkraft	▶ Realisierung von 100 % des hebbaren Potenzials ▶ Kein Repowering	▶ Realisierung von 100 % hebbaren Potenzials ▶ Repowering älterer Anlagen	▶ Realisierung von 100 % des hebbaren Potenzials ▶ Repowering älterer Anlagen
Wasser- kraft	▶ Realisierung von 100 % des hebbaren Potenzials	▶ Realisierung von 100 % des hebbaren Potenzials	▶ Realisierung von 100 % des hebbaren Potenzials
Biomasse	▶ 20 % der Ackerflächen werden für die Biomasseproduktion verwendet.	▶ 20 % der Ackerflächen werden für die Biomasseproduktion verwendet.	▶ 20 % der Ackerflächen werden für die Biomasseproduktion verwendet.
Bio- methan	▶ Keine Produktion von Biomethan aus Überschussstrom.	▶ Keine Produktion von Biomethan aus Überschussstrom.	▶ Produktion von Biomethan, sofern Überschussstrom erzeugt wird.
Photo- voltaische Nutzung von Verkehrs- flächen	▶ Keine energetische Nutzung von Verkehrsflächen.	▶ 1 % der Verkehrsflächen werden energetisch genutzt.	▶ 2 % der Verkehrsflächen werden energetisch genutzt.

Quelle: Eigene Darstellung.

8 Bewertung und Diskussion der Szenarien

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der verschiedenen Szenario-Berechnungen beschrieben und miteinander verglichen. Eine Übersichtstabelle zu allen drei Szenarien befindet sich am Ende des Kapitels.

8.1 Trendszenario

Das Trendszenario spiegelt verschiedene, gegenwärtig bereits absehbare Entwicklungstrends wider. Es geht davon aus, dass die Bedeutung alternativer Antriebsarten zwar zunehmen wird, aber konventionelle Antriebsarten auch im Jahr 2050 vorherrschen werden. Die Erzeugung erneuerbarer Energie gewinnt weiterhin an Bedeutung, wobei aber davon auszugehen ist, dass sich die Ausbaugeschwindigkeit verlangsamt.

8.1.1 Verkehrsnachfrage

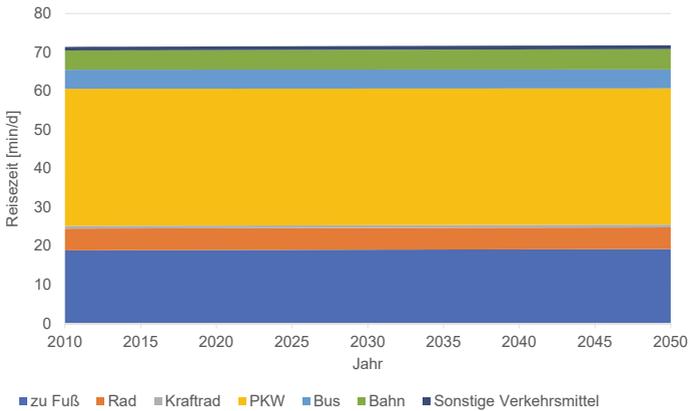
Die Anteile der verschiedenen Verkehrsmittel an der Reisezeit pro Person bleiben gleich, wie in Abbildung 46 dargestellt, da Straße und Schiene parallel ausgebaut werden und es daher zu keinem Modal Shift kommt. Aufgrund des Bevölkerungswachstums wird die Gesamtreisezeit, also die Zeit, während der alle Bewohnerinnen und Bewohner der Bodenseeregion unterwegs sind, dennoch um etwa 10 % zunehmen (siehe Abbildung 47).

Die tägliche Personenverkehrsleistung nimmt im Untersuchungszeitraum von 23,82 Mrd. Personenkilometern im Jahr 2010 auf 26,75 Mrd. Personenkilometer im Jahr 2050 zu (siehe Abbildung 48).

Die Zunahme der Personenverkehrsleistung ist ein Ergebnis des Einwohnerzuwachses in der Ostschweiz, in Liechtenstein und in Vorarlberg; im deutschen Teil der Bodenseeregion geht die Fahrleistung bis zum Ende des Betrachtungszeitraums leicht zurück (siehe Abbildung 49).

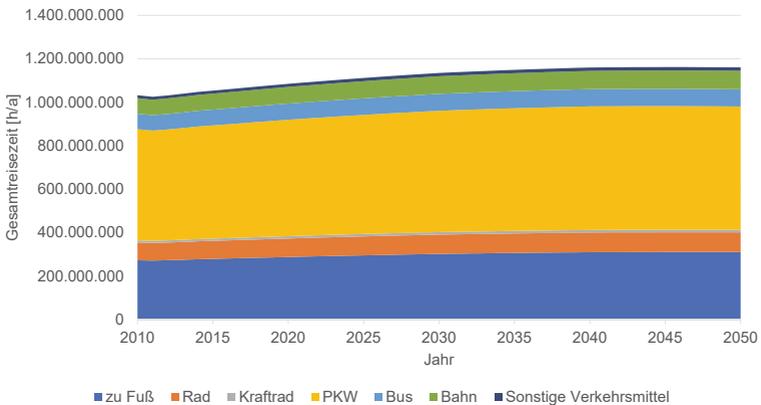
Auch die Fahrleistung des Personenverkehrs nimmt entsprechend dem Bevölkerungswachstum zu (siehe Abbildung 50). Da kein Modal Shift eintritt, verändern sich die Anteile der Verkehrsmittel im Vergleich zum Basisjahr nicht.

Abbildung 46: Entwicklung der mittleren Reisezeit je Person im Trendszenario



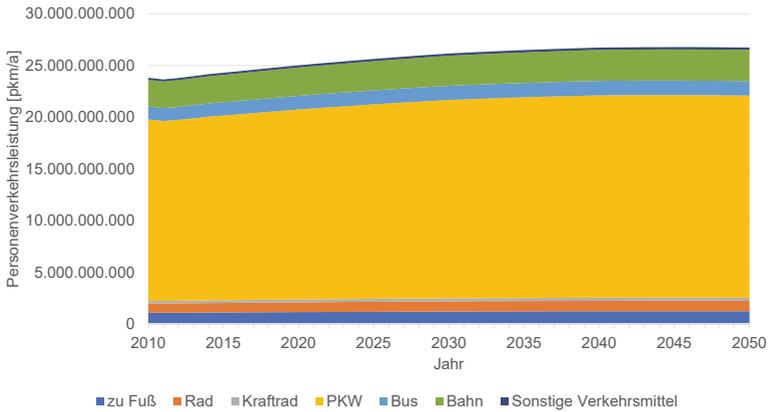
Quelle: Eigene Berechnung.

Abbildung 47: Entwicklung der Gesamtreisezeit im Trendszenario



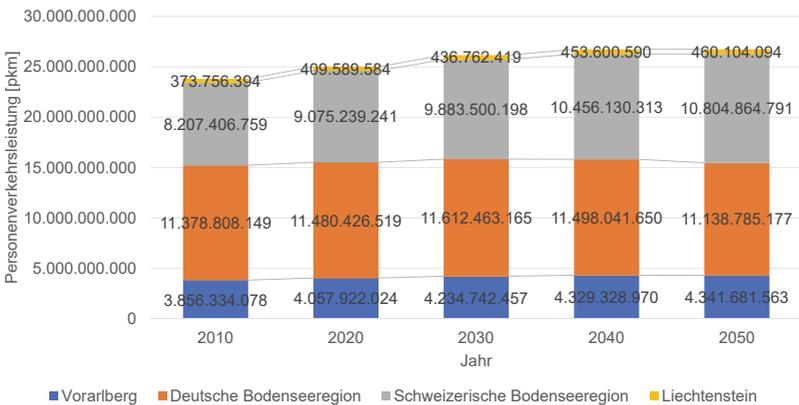
Quelle: Eigene Berechnung.

Abbildung 48: Entwicklung der Verkehrsleistung des Straßenpersonenverkehrs im Trendszenario

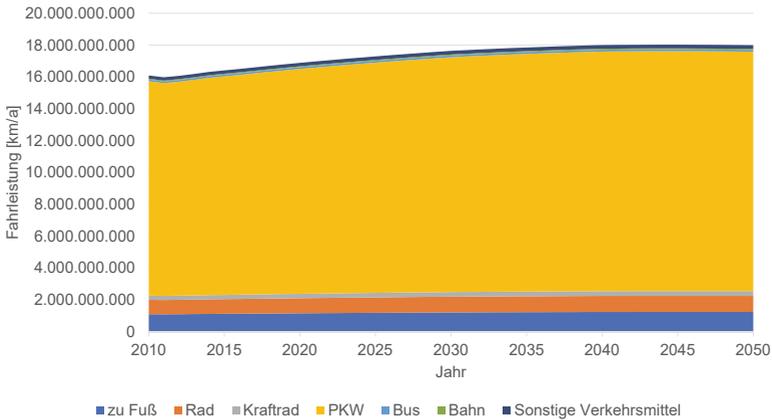


Quelle: Eigene Berechnung.

Abbildung 49: Trendszenario Bodenseeregion: Personenverkehrsleistung nach Teilregionen 2010-2050



Quelle: Eigene Berechnung.

Abbildung 50: Entwicklung der Fahrleistung des Straßenpersonenverkehrs im Trendszenario

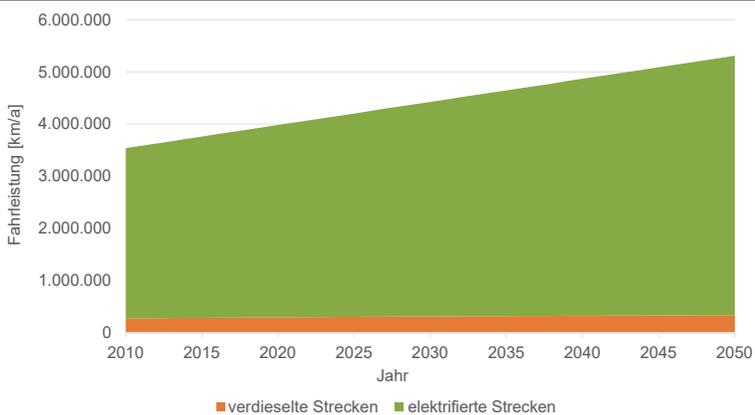
Quelle: Eigene Berechnung.

Die Fahrleistung des Schienengüterverkehrs wächst entsprechend der getroffenen Annahme bis zum Ende des Betrachtungszeitraums um 50 % an (siehe Abbildung 51). Dies betrifft sowohl elektrifizierte Strecken (+ 52,3 %) als auch nichtelektrifizierte bzw. verdieselte Strecken (+ 22,1 %). Die unterschiedlichen Zuwachsraten erklären sich daraus, dass das Bestandsnetz in der schweizerischen und der österreichischen Teilregion sowie in Liechtenstein bereits elektrifiziert ist und dementsprechend alle Zuwächse in diesen Teilregionen auf elektrifizierte Strecken entfallen. Außerdem werden auch im Bahnnetz der deutschen Teilregion einige Strecken während des Betrachtungszeitraums elektrifiziert.

Die Fahrleistung des Schienenpersonenverkehrs nimmt entsprechend dem Bevölkerungswachstum zu. Ein Bevölkerungswachstum findet vor allem in der schweizerischen und der österreichischen Teilregion sowie in Liechtenstein statt, wo die Bahnstrecken bereits im Basisjahr vollständig elektrifiziert sind. In der deutschen Teilregion, deren Bahnnetz größtenteils nicht elektrifiziert ist, schrumpft die Bevölkerung bis zum Jahr 2050 leicht. Aufgrund der demographischen Entwicklungen in den Teilregionen, des unterschiedlichen Elektrifizierungsgrads der Bestandsnetze und der Elektrifizierung einiger Strecken im Bahnnetz der

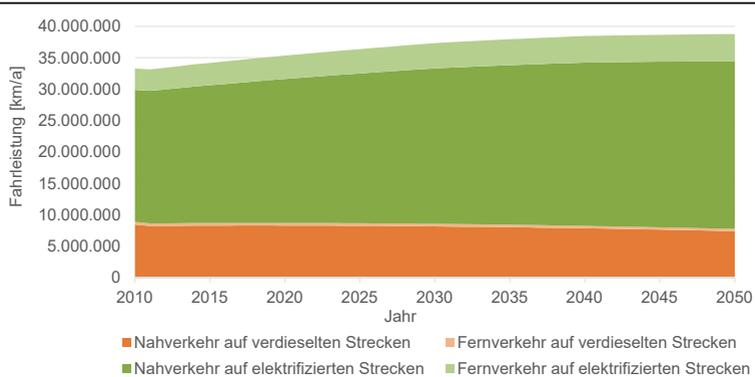
deutschen Teilregion nimmt der Anteil der Fahrleistung auf elektrifizierten Strecken um 27,2 % zu, während der Anteil der nichtelektrifizierten Strecken um 12,7 % abnimmt. Abbildung 52 zeigt die Entwicklung der Fahrleistung des Schienenpersonen- und fernverkehrs aufgeschlüsselt nach Streckentypen (verdieselt und elektrifiziert).

Abbildung 51: Entwicklung der Fahrleistung des Schienengüterverkehrs im Trendszenario



Quelle: Eigene Berechnung.

Abbildung 52: Entwicklung der Fahrleistung des Schienenpersonenverkehrs im Trendszenario



Quelle: Eigene Berechnung.

8.1.2 Fahrzeugbestandsentwicklung

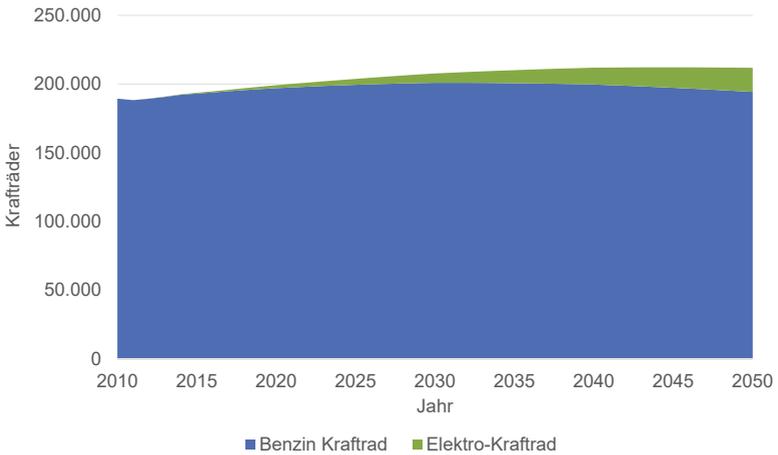
Der bestimmende Faktor für die Größe des Bestands der Straßenpersonenverkehrsfahrzeuge ist im Trendszenario die Bevölkerungsentwicklung, da kein Modal Shift stattfindet. Im Straßengüterverkehr nehmen die Verkehrsleistung und damit auch die Anzahl der Fahrzeuge bis zum Jahr 2050 um 50 % zu. Die Anteile der Antriebsarten am Fahrzeugbestand wurden mit dem oben beschriebenen Zulassungsmodell berechnet.

Im Jahr 2050 gibt es in der Bodenseeregion etwa 212.000 Krafträder, etwa 22.000 mehr als im Jahr 2010 (siehe Abbildung 53). Nur etwa 17.500 oder 8,2 % davon werden von einem Elektromotor angetrieben, der weit aus größere Teil (ca. 194.500 oder 91,7 %) von einem konventionellen Benzinmotor. Somit gibt es im Jahr 2050 auf den Straßen der Bodenseeregion mehr Krafträder, die von einem konventionellen Benzinmotor angetrieben werden, als im Basisjahr 2010.

Wie in Abbildung 54 dargestellt, nimmt die Anzahl der PKW im Trendszenario von 1.117.800 im Basisjahr 2010 auf 1.265.700 zu (+ 13,2 %). Davon entfallen 92.200 (7,2 %) auf Elektro-PKW und 11.800 (0,9 %) auf Hybrid-PKW. Die größten Anteile am Bestand haben PKW mit Benzinmotor (592.700 bzw. 46,8 %) und mit Dieselmotor (565.500 bzw. 44,7 %). Ferner gibt es 2.400 PKW (0,2 %) mit einem Erdgasmotor (CNG) und 1.150 PKW (0,1 %) mit einem Flüssiggasmotor (LPG). Auch bei den PKW ist also der Anteil der Fahrzeuge mit alternativen Antrieben am Fahrzeugbestand gering.

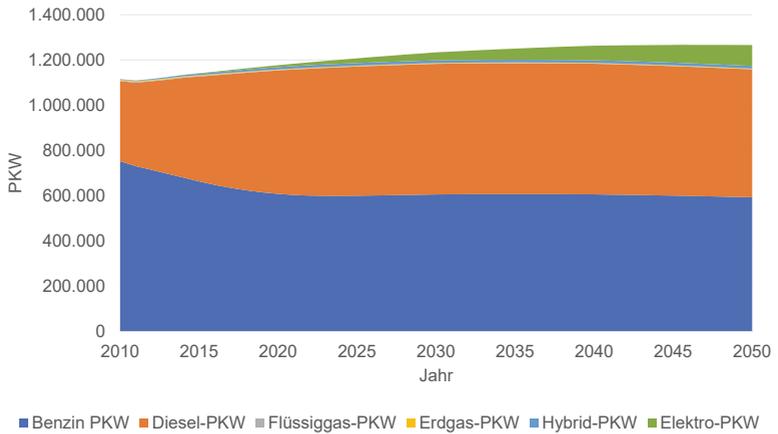
Auffällig ist der starke Rückgang der Benzin-PKW in den ersten 10 Jahren des Betrachtungszeitraums. Dieser Rückgang ist darauf zurückzuführen, dass in den Jahren vor dem Basisjahr 2010 der Anteil der Benzin-PKW an den Neuzulassungen kontinuierlich zulasten der Diesel-PKW zurückging. Die Benzin-PKW sind im Basisjahr dementsprechend im Durchschnitt älter als die Diesel-PKW und scheiden daher eher aus dem Bestand aus.

Abbildung 53: Entwicklung des Kraftrad-Bestands im Trendszenario



Quelle: Eigene Berechnung.

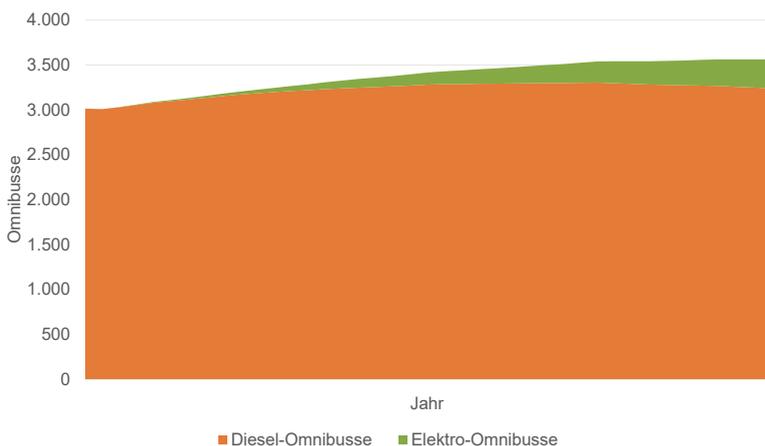
Abbildung 54: Entwicklung des PKW-Bestands im Trendszenario 2010-2050



Quelle: Eigene Berechnung.

Die Anzahl der Omnibusse nimmt von 3.013 auf 3.545 zu (+ 17,6 %). 320 (10,6 %) der Omnibusse werden im Jahr 2050 von einem Elektromotor angetrieben, 3.245 (89,4 %) der Omnibusse fahren mit Dieselantrieb (siehe Abbildung 55).

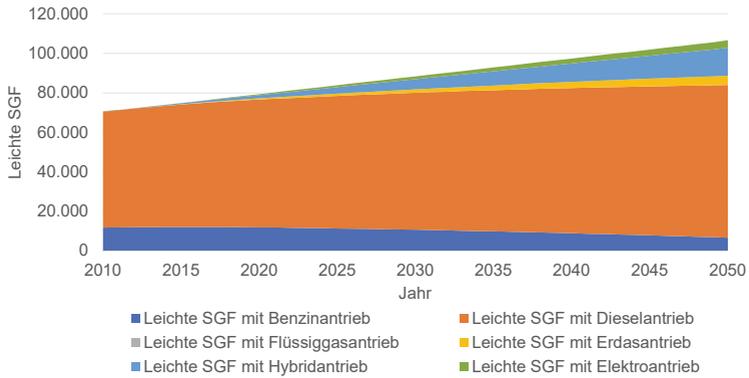
Abbildung 55: Entwicklung des Omnibus-Bestands im Trendszenario 2010-2050



Quelle: Eigene Berechnung.

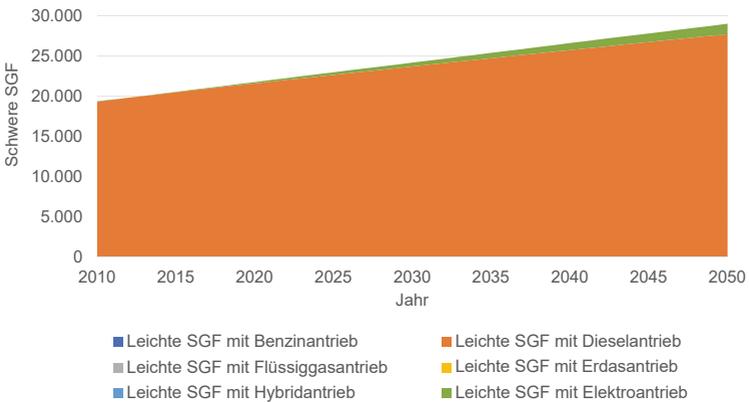
Im Basisjahr gibt es in der Bodenseeregion 70.454 Leichte Straßengüterverkehrsfahrzeuge (LSGF), die sich auf 58.739 (83,4 %) Dieselfahrzeuge und 11.723 (16,6 %) Benzinfahrzeuge aufteilen. Wie aus Abbildung 56 hervorgeht, wächst bis zum Jahr 2050 ihre Anzahl auf 105.682 (+ 50 %), was der angenommenen Zunahme der Verkehrsleistung entspricht. Den größten Anteil am Fahrzeugbestand nehmen dann nach wie vor LSGF mit Dieselantrieb (77.372 bzw. 73,2 %) ein. An zweiter Stelle folgen Fahrzeuge mit Hybridantrieb (14.161 bzw. 13,4 %), gefolgt von Fahrzeugen mit Benzinantrieb (6.638 bzw. 6,3 %), Erdgasantrieb (4.728 bzw. 4,5 %) und Elektroantrieb (3.775 bzw. 3,6 %). Auch bei den LSGF nimmt die Anzahl der Dieselfahrzeuge bis zum Jahr 2050 zu, während die Anzahl der Benzinfahrzeuge abnimmt. Hybrid- aber auch Elektro- und Erdgasfahrzeuge verzeichnen starke Zuwächse.

Abbildung 56: Entwicklung des Bestands Leichter Straßengüterverkehrs-fahrzeuge im Trendszenario 2010-2050



Quelle: Eigene Berechnung.

Abbildung 57: Entwicklung des Bestands Schwerer Straßengüterverkehrs-fahrzeuge im Trendszenario 2010-2050



Quelle: Eigene Berechnung.

Die Anzahl der Schweren Straßengüterverkehrsfahrzeuge (SSGF) wächst von 19.333 Fahrzeugen im Jahr 2010 auf 29.001 Fahrzeuge im Jahr 2050 (+ 50 %; siehe Abbildung 57). Elektrofahrzeuge erreichen bis

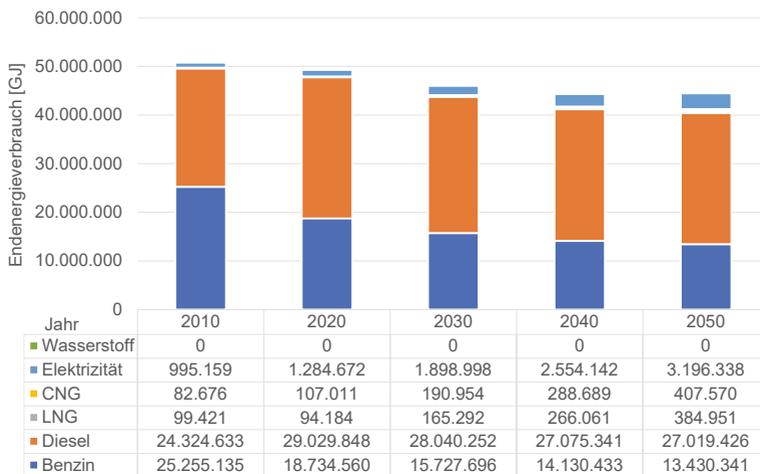
dahin nur einen Anteil von 4,4 % (1.302 Fahrzeuge) am Bestand. 95,6 % aller SSGF (27.707 Fahrzeuge) werden auch im Jahr 2050 von einem Dieselmotor angetrieben.

8.1.3 Endenergieverbrauch

Im Trendszenario sinkt der Endenergieverbrauch des Verkehrs von 50.747.699 GJ im Basisjahr 2010 auf 38.509.833 GJ im Jahr 2050. Dies entspricht einem Rückgang um 24,1 %. Der geringste Endenergieverbrauch wird um das Jahr 2040 verzeichnet. Anschließend steigt der Verbrauch wieder leicht aufgrund der Zunahme des Güterverkehrs.

Dabei halbiert sich der Benzinverbrauch nahezu (- 47,2 %), während der Dieserverbrauch bis zum Jahr 2040 um etwa 10 % zunimmt, um anschließend leicht zu sinken. Die starke Abnahme des Benzinverbrauchs ist nicht nur auf eine – wenn auch langsame – Einführung alternativer Antriebsarten zurückzuführen, sondern auch auf das Ausscheiden einer größeren Anzahl von PKW mit Benzin-Antrieb aus dem Bestand. Die Zunahme des Dieserverbrauchs ist dagegen größtenteils eine Folge des starken Wachstums des Güterverkehrs.

Abbildung 58: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Verkehr beim Trendszenario 2010-2050



Quelle: Eigene Berechnung.

Der Elektrizitätsbedarf verdreifacht sich während des Betrachtungszeitraums ungefähr. Dies ist vorwiegend auf die Markteinführung von Straßenverkehrsfahrzeugen mit Elektro- und Hybridantrieb zurückzuführen sowie in geringerem Umfang auf die Elektrifizierung von Bahnstrecken.

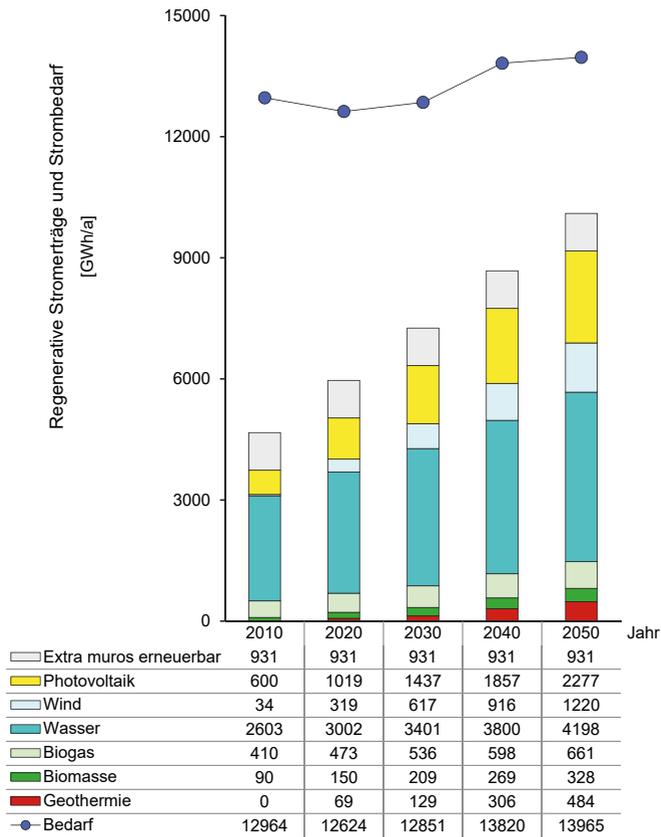
Der Verbrauch von Erdgas (CNG) und Flüssiggas (LPG) wächst stark, bleibt aber insgesamt auf sehr niedrigem Niveau.

8.1.4 Regenerative Erträge

Im Trendszenario verdoppelt sich der Stromertrag aus erneuerbaren Quellen ungefähr (siehe Abbildung 59). Die wichtigste Quelle der erneuerbaren Stromerzeugung bleibt bis zum Jahr 2015 die Wasserkraft. Auf dem zweiten Platz folgt mit einer sehr großen Zuwachsrate die Photovoltaik. Auf dem dritten Platz befindet sich im Basisjahr 2010 das Biogas, das aber nur relativ geringe Zuwachsraten aufweist und während des Betrachtungszeitraums von der Windkraft auf den vierten Platz verdrängt wird. Letztere spielt im Basisjahr eine sehr geringe Rolle, gewinnt aber im Trendszenario bis zum Jahr 2040 sehr stark an Bedeutung: Der Ertrag vervierzigfacht sich in etwa.

Der Strombedarf wächst im Trendszenario um 7,8 %. Dieses Wachstum ist auf die Bevölkerungszunahme, aber auch auf die zunehmende Bedeutung der Elektromobilität zurückzuführen.

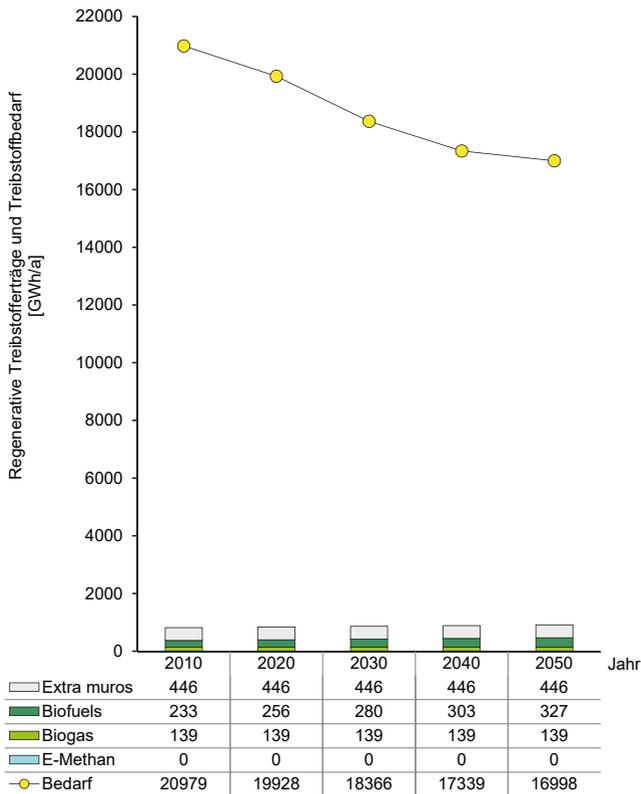
Abbildung 59: Regenerative Stromerträge und Strombedarf im Trendszenario



Quelle: Eigene Berechnung mit STEM.

Der Treibstoffbedarf sinkt leicht, vor allem aufgrund von technologiebedingten Effizienzsteigerungen sowie der langsam einsetzenden Markteinführung von Elektrofahrzeugen. Die Region bleibt aber weiterhin massiv von importierten fossilen Treibstoffen abhängig (Abbildung 60).

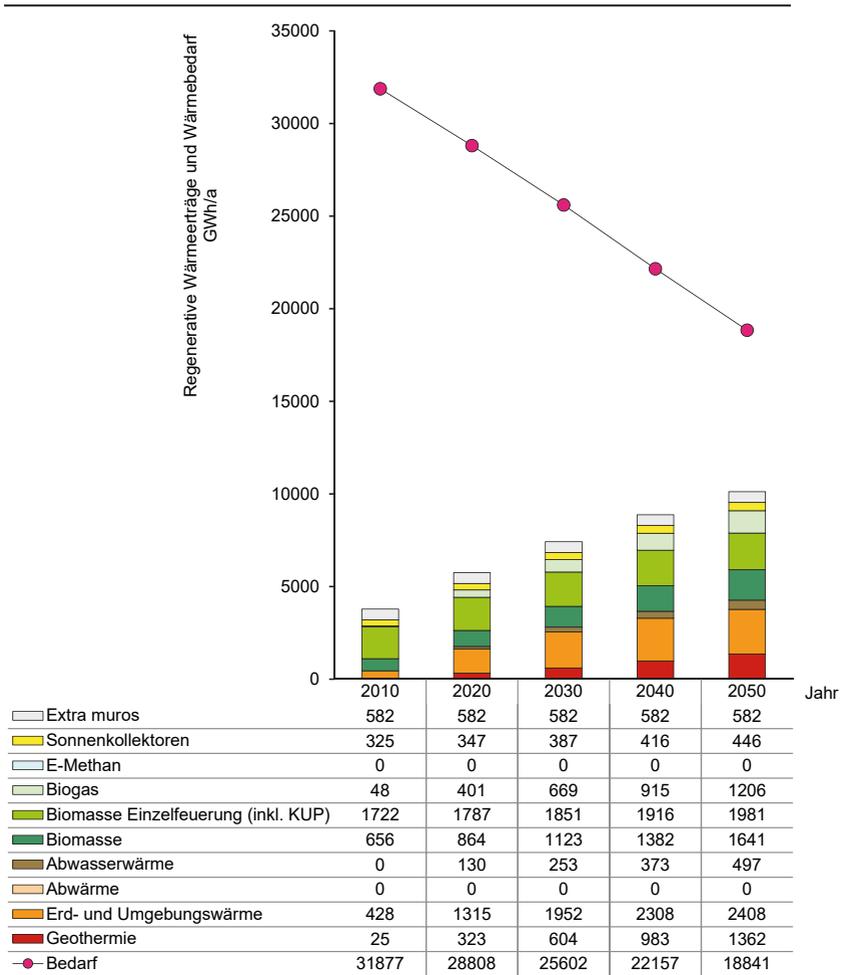
Abbildung 60: Regenerative Treibstoffträge und Treibstoffbedarf im Trendszenario



Quelle: Eigene Berechnung mit STEM.

Der Wärmebedarf reduziert sich um mehr als ein Drittel, vor allem aufgrund steigender Energieeffizienz im Gebäudebereich. Im Jahr 2050 kann etwa die Hälfte des regionalen Wärmebedarfs aufgrund verschiedener aus regionalen erneuerbaren Quellen gedeckt werden (Abbildung 61).

Abbildung 61: Regenerative Wärmeerträge und Wärmebedarf im Trendszenario



Quelle: Eigene Berechnung mit STEM.

8.2 Alternativszenario

Im Alternativszenario verbreiten sich sowohl alternative Mobilitätsformen als auch erneuerbare Energietechnologie aufgrund günstiger Rahmenbedingungen rascher als im Trendszenario.

8.2.1 Verkehrsnachfrage

Der Ausbau des öffentlichen Nahverkehrs sowie Maßnahmen zur Förderung des Fuß- und Radverkehrs führen im Alternativszenario zu einem veränderten Verkehrsverhalten (Modal Shift), wobei die Anteile der MIV-Verkehrsmittel (PKW, Kraftrad) abnehmen und die Anteile der Verkehrsmittel des Umweltverbunds (Bus, Bahn, Rad, Fußgängerverkehr) zunehmen (siehe Abbildung 62). Die durchschnittliche Zeit, die ein Bewohner der Bodenseeregion am Tag im PKW verbringt, reduziert sich im Alternativszenario von 35,41 Minuten im Jahr 2010 auf 23,91 Minuten im Jahr 2050. Ähnlich entwickelt sich die durchschnittliche Reisezeit mit dem Kraftrad, die von 0,69 Minuten auf 0,50 Minuten zurückgeht.

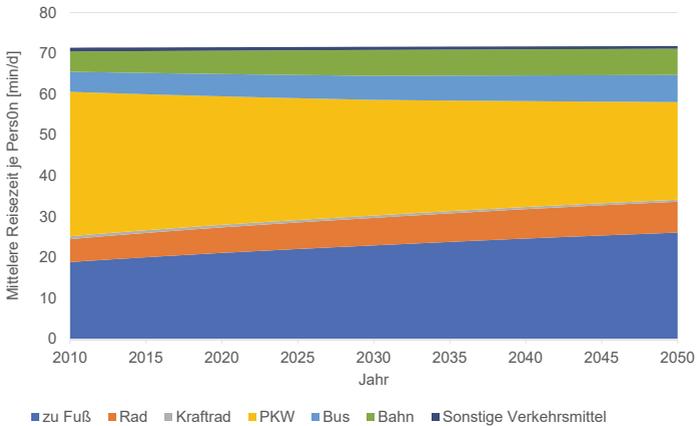
Die durchschnittliche Zeit, die mit Zufußgehen verbracht wird, nimmt im Betrachtungszeitraum von 18,84 Minuten auf 26,08 Minuten zu. Ebenso wächst die durchschnittliche Reisezeit mit dem Fahrrad von 5,63 Minuten auf 7,59 Minuten pro Tag. Ein ähnliches Bild bietet sich bei den Öffentlichen Verkehrsmitteln: Die Reisezeit mit dem Bus steigert sich von 4,92 Minuten auf 6,65 Minuten und die mit der Bahn von 4,93 Minuten auf 6,43 Minuten am Tag. Die durchschnittliche Reisezeit je Person bleibt entsprechend der Time-Budget-Theorie unverändert.

Die Auswirkungen auf die Gesamtreisezeit ergeben sich aus der Kombination des eben beschriebenen Modal Shifts und den unterschiedlichen regionalen Bevölkerungsentwicklungen.

Wie in Abbildung 63 dargestellt, reduziert sich demnach die Gesamtreisezeit mit dem PKW von 84,2 Mio. Stunden im Jahr 2010 auf 63,5 Mio. Stunden im Jahr 2050. Bei den Krafträdern geht die Gesamtreisezeit von 1,7 Mio. Stunden auf 1,3 Mio. Stunden zurück. Die Gesamtreisezeit des Fußgängerverkehrs nimmt von 44,8 Mio. Stunden auf 69,3 Mio. Stunden zu, die des Radverkehrs von 13,4 Mio. Stunden auf 20,2 Mio. Stunden. Bei der Bahn wächst die Gesamtreisezeit von 11,7 Mio. Stunden auf 17,1 Mio. Stunden, im Busverkehr von 11,7 Mio. Stunden auf 17,7 Mio. Stunden. Die Gesamtreisezeit aller Verkehrsmittel unterscheidet

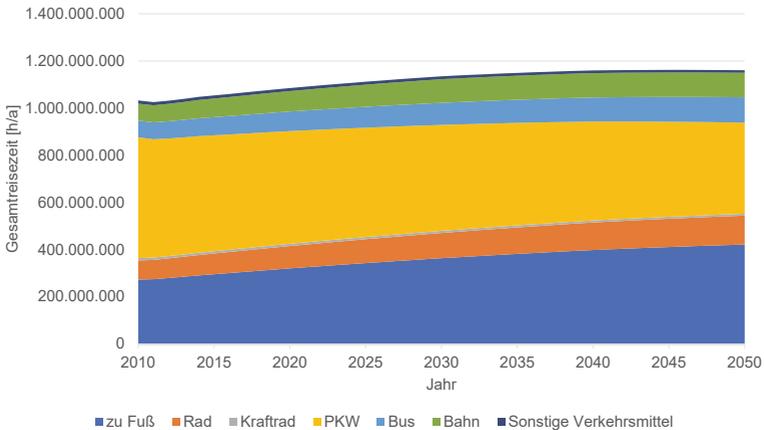
sich im Alternativszenario nicht von der des Trendszenarios. Dies ergibt sich aus der Time-Budget-Theorie.

Abbildung 62: Entwicklung der mittleren Reisezeit je Person im Alternativszenario



Quelle: Eigene Berechnung.

Abbildung 63: Entwicklung der Gesamtreisezeit im Alternativszenario



Quelle: Eigene Berechnung.

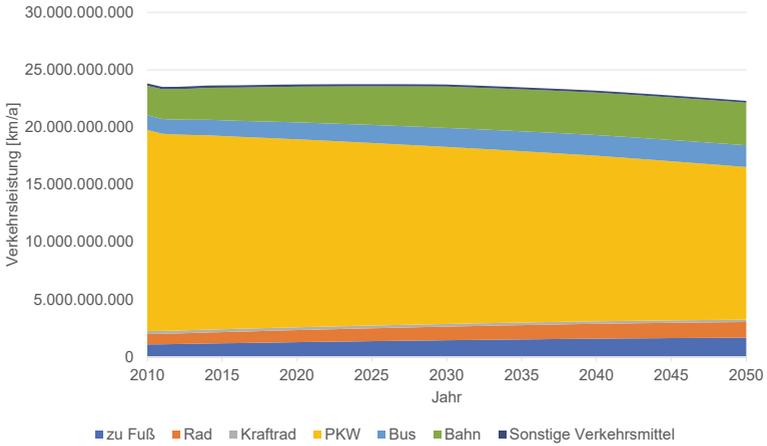
Während im Alternativszenario die Gesamtreisezeit aufgrund des Bevölkerungswachstums bis zum Jahr 2050 zunimmt, kommt es zu einer leichten Verminderung der Straßen-Personenverkehrsleistung, also der von allen Bewohnerinnen und Bewohnern der Bodenseeregion innerhalb eines Jahres zurückgelegten Kilometeranzahl (siehe Abbildung 64). Dies ist eine Folge der Verkehrsverlagerung von den schnelleren Verkehrsmitteln PKW und Kraftrad auf die im Durchschnitt langsameren Öffentlichen Verkehrsmittel sowie auf den Fußgänger- und Radverkehr.

Insgesamt reduziert sich die Verkehrsleistung von 23,8 Mrd. km im Jahr 2010 auf 22,3 Mrd. km, wobei die mit PKW erbrachte Verkehrsleistung von 17,5 Mrd. km auf 13,3 Mrd. km und die mit Krafträdern erbrachte Verkehrsleistung von 0,26 Mrd. km auf 0,20 Mrd. km zurückgeht. Die Verkehrsleistung der sonstigen Verkehrsmittel verringert sich von 0,21 Mrd. km auf 0,16 Mrd. km.

Kräftige Zuwächse weist der Fußgängerverkehr auf, dessen Verkehrsleistung von 1,09 Mrd. km auf 1,68 Mrd. km zunimmt, und der Radverkehr, bei dem sich die Verkehrsleistung von 0,9 Mrd. km auf 1,37 Mrd. steigert. Ähnliches gilt für die Öffentlichen Verkehrsmittel mit einem Zuwachs von 2,56 Mrd. km auf 3,71 Mrd. km bei der Bahn und von 1,27 Mrd. km auf 1,89 Mrd. km beim Busverkehr.

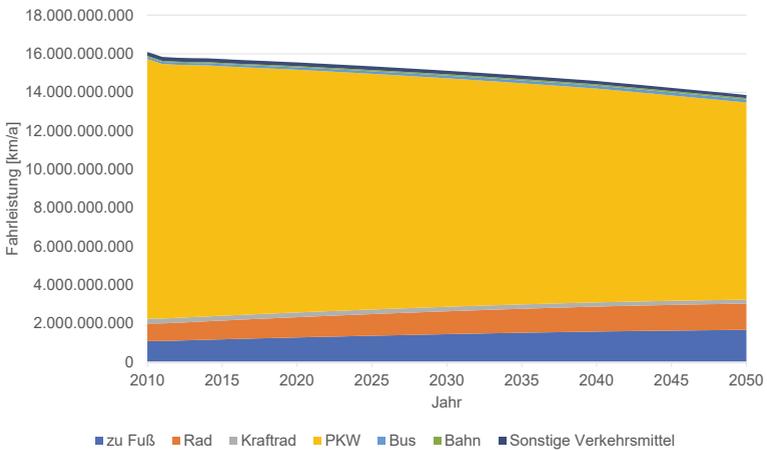
Die Fahrleistung der Personenverkehrsmittel ist ein Spiegelbild der Entwicklung der Verkehrsleistung: Leichte Rückgänge können bei den PKW, den Krafträdern und bei den sonstigen Verkehrsmitteln beobachtet werden, während die Fahrleistungen des Rad- und Fußgängerverkehrs und der Öffentlichen Verkehrsmittel zunehmen (siehe Abbildung 65). Die Fahrleistung der PKW reduziert sich von 13,48 Mrd. km im Jahr 2010 auf 10,22 Mrd. km im Jahr 2050, die Fahrleistung der Krafträder von 0,26 Mrd. km auf 0,20 Mrd. km und die der sonstigen Verkehrsmittel vom 0,21 Mrd. km auf 0,16 Mrd. km. Im Gegenzug steigert sich die Fahrleistung der Omnibusse von 0,11 Mrd. km auf 0,16 Mrd. km und des Personeneisenbahnverkehrs von 0,05 Mrd. km auf 0,07 Mrd. km. Die Veränderungen bei der Fußgänger- und Radverkehrsleistung, die ebenfalls unter die Fahrleistung der Personenverkehrsmittel subsumiert sind, entsprechen denen der jeweiligen Verkehrsleistungen. Insgesamt geht die Fahrleistung leicht zurück, und zwar von 16,10 Mrd. km im Jahr 2010 auf 13,86 Mrd. km im Jahr 2050.

Abbildung 64: Entwicklung der Verkehrsleistung des Straßenpersonenverkehrs im Alternativszenario

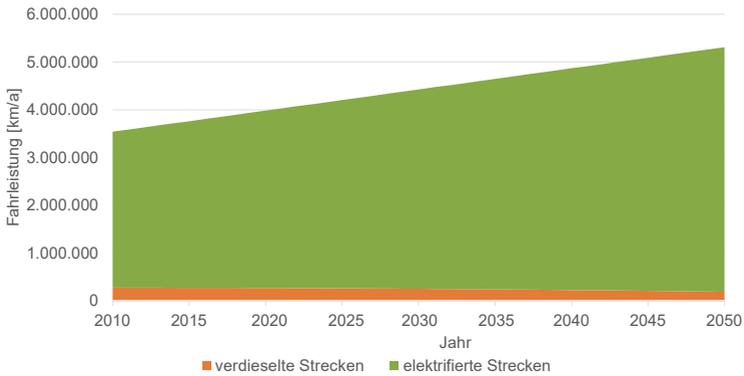


Quelle: Eigene Berechnung.

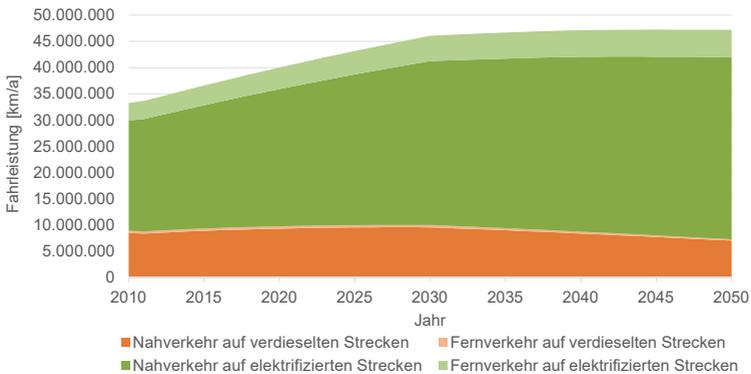
Abbildung 65: Entwicklung der Fahrleistung des Straßenpersonenverkehrs im Alternativszenario



Quelle: Eigene Berechnung.

Abbildung 66: Entwicklung der Fahrleistung des Schienengüterverkehrs im Alternativszenario

Quelle: Eigene Berechnung.

Abbildung 67: Entwicklung der Fahrleistung des Schienenpersonenverkehrs im Alternativszenario

Quelle: Eigene Berechnung.

Die Fahrleistung des Schienengüterverkehrs nimmt im Alternativszenario genauso wie in den anderen Szenarien um 50 % zu, und zwar von 3,540 Mio. km auf 5,31 Mio. km (siehe Abbildung 66). Im Gegensatz zum Trendszenario sinkt die mit Diesellokomotiven erbrachte

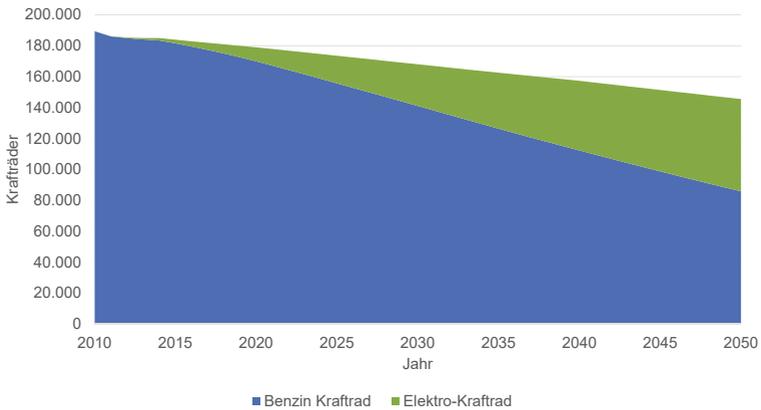
Fahrleistung auch in absoluten Zahlen, was auf die verstärkte Elektrifizierung von Strecken in der deutschen Teilregion zurückzuführen ist. So steigt die Fahrleistung des Schienengüterverkehrs, die auf elektrifizierten Strecken erbracht wird, von 3,26 Mio. km auf 5,12 Mio. km, während die Fahrleistung auf den verdieselten Strecken von 0,27 Mio. km auf 0,19 Mio. km zurückgeht. Die Fahrleistung des Schienenpersonenverkehrs auf den elektrifizierten Strecken nimmt aufgrund der in diesem Zeitraum erfolgenden Elektrifizierung bis zum Jahr 2030 wesentlich schneller zu als die auf den verdieselten Strecken (siehe Abbildung 67).

8.2.2 Fahrzeugbestandsentwicklung

Der Krafrad-Bestand geht im Alternativszenario aufgrund der Verkehrsverlagerung zum Fuß- und Radverkehr sowie zu Öffentlichen Verkehrsmitteln zurück: Während im Jahr 2010 189.409 Krafräder auf den Straßen der Bodenseeregion fahren, sind es im Jahr 2050 145.522 Krafräder (siehe Abbildung 68). Im Basisjahr werden alle Krafräder von einem Benzinmotor angetrieben, am Ende des Betrachtungszeitraums verfügen 85.818 Krafräder (59,0 %) über einen Benzinantrieb und 59.700 Krafräder (41,0 %) über einen Elektroantrieb.

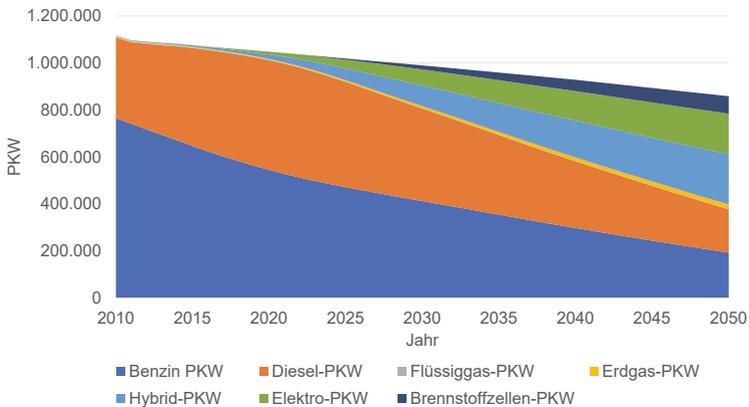
Die Anzahl der PKW sinkt im Alternativszenario von 1.116.797 im Basisjahr 2010 auf 858.522 im Jahr 2050 (siehe Abbildung 69). Dies entspricht einem Rückgang um 23,1 %. Diese Schrumpfung des PKW-Bestands ist eine Folge der Verkehrsverlagerung vom MIV auf den Rad- und Fußgängerverkehr sowie auf öffentliche Verkehrsmittel. Ebenso können deutliche Veränderungen bei den Anteilen der verschiedenen Antriebsarten beobachtet werden. Während der Fahrzeugbestand im Basisjahr fast ausschließlich Fahrzeuge mit Benzin- oder Dieselfahrzeug umfasst, ist er im Jahr 2050 durch eine große Vielfalt an Antriebsarten gekennzeichnet.

Abbildung 68: Entwicklung des Kraftrad-Bestands im Alternativszenario



Quelle: Eigene Berechnung.

Abbildung 69: Entwicklung des PKW-Bestands im Alternativszenario



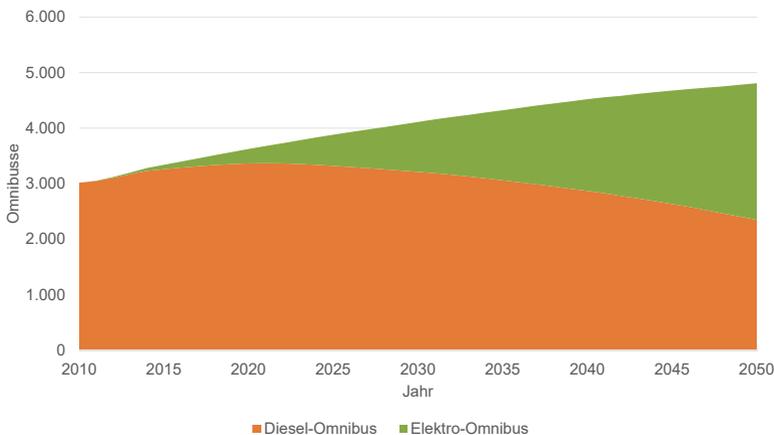
Quelle: Eigene Berechnung.

Den größten Bestandsanteil nehmen Fahrzeuge mit einem Hybridmotor ein. Auf diese Fahrzeugkategorie entfallen 212.812 PKW bzw. 24,8 % des Bestandes. An zweiter und dritter Stelle folgen PKW mit Benzinmotor (193.132 PKW bzw. 22,5 %) und PKW mit Dieselmotor (184.300 PKW

bzw. 21,5 %). Den vierten Rang nehmen Fahrzeuge mit Elektromotor ein (172.945 PKW bzw. 20,1 %), gefolgt von Fahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb (74.332 PKW bzw. 8,7 %). Auf Fahrzeuge mit Erdgasantrieb (20.141 PKW bzw. 2,3 %) und mit Flüssiggasantrieb (861 PKW bzw. 0,1 %) entfallen nur geringe Anteile des Fahrzeugbestandes.

Die Anzahl der Omnibusse wächst aufgrund der Verkehrsverlagerung vom MIV zu den Öffentlichen Verkehrsmitteln von 3.013 im Jahr 2010 auf 4.785 Omnibusse im Jahr 2050 (+ 58,8 %; siehe Abbildung 70). Während die Omnibusse im Basisjahr ausschließlich von Dieselmotoren angetrieben werden, sinkt der Anteil von Bussen mit dieser Antriebsart bis zum Ende des Betrachtungszeitraums auf 2.347 Fahrzeuge (49,0 %). Omnibusse mit Elektroantrieb erreichen einen etwas höheren Anteil (2.461 Omnibusse bzw. 51,0 %).

Abbildung 70: Entwicklung des Omnibus-Bestands im Alternativszenario



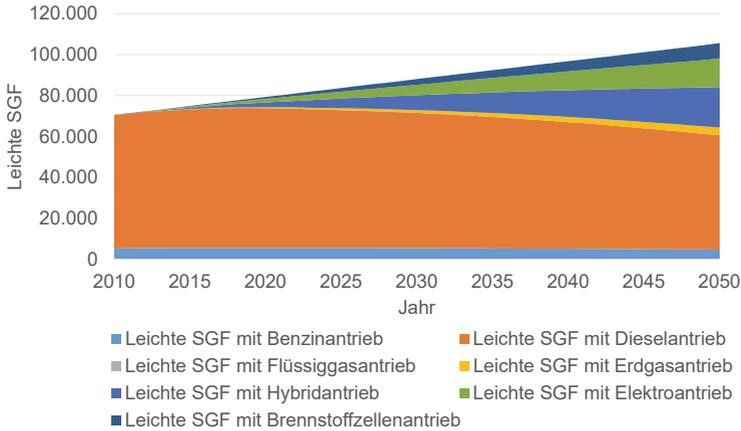
Quelle: Eigene Berechnung.

Die Anzahl der LSGF erhöht sich entsprechend der Zunahme der Verkehrsleistung um 50 % bis zum Jahr 2050 von 70.454 Fahrzeugen auf dann 105.682 Fahrzeuge. Diese Zunahme ist in allen Szenarien gleich, wobei sich die Szenarien aber hinsichtlich der Anteile der verschiedenen Antriebsarten von LSGF unterscheiden.

Im Alternativszenario machen LSGF mit Dieselmotor sowohl im Basisjahr als auch am Ende des Betrachtungszeitraums den größten Teil der Fahrzeuge aus (siehe Abbildung 71). So fahren im Jahr 2050 55.935 LSGF mit Dieselmotor auf den Straßen der Bodenseeregion, was einem Anteil von 53,0 % des Fahrzeugbestandes entspricht. An zweiter Stelle befinden sich mit 19.830 Fahrzeugen oder 18,8 % des Bestandes im Jahr 2050 LSGF mit Hybridantrieb, gefolgt von LSGF mit Elektroantrieb (immerhin 13.978 Fahrzeuge bzw. 13,2 % des Bestands), LSGF mit Brennstoffzellenantrieb (7.563 Fahrzeuge bzw. 7,2 %). Auf LSGF mit Benzinantrieb entfällt bereits im Basisjahr ein verhältnismäßig geringer Anteil am Fahrzeugbestand und er verharrt bis zum Ende des Betrachtungszeitraums auf niedrigem Niveau bei einem leichten Rückgang in absoluten Zahlen im Vergleich zum Basisjahr. Im Jahr 2050 werden 4.621 LSGF von einem Benzinmotor angetrieben. Dies entspricht einem Bestandsanteil von 4,4 %. Die geringste Bedeutung haben im Jahr 2050 LSGF, die mit Erdgas (CNG) betrieben werden. Ihr Bestand umfasst 3.775 Fahrzeuge. Dies entspricht 3,6 % des gesamten LSGF-Bestandes.

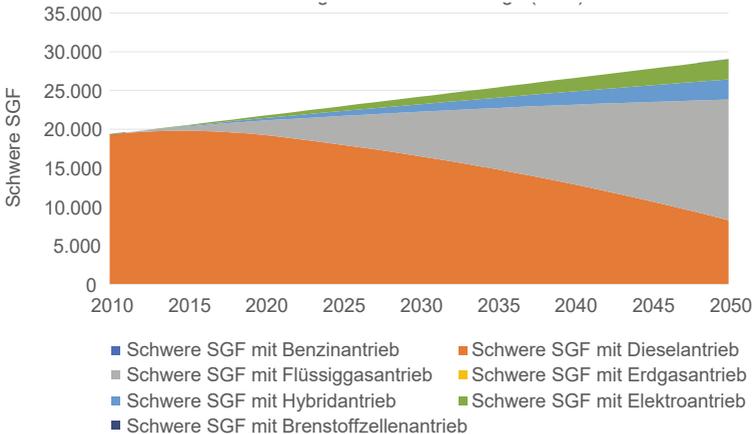
Die Anzahl der SSGF nimmt ebenfalls um 50 % zu (siehe Abbildung 72). Den größten Anteil am SSGF-Bestand haben im Jahr 2050 des Alternativszenarios Fahrzeuge mit Flüssiggas-Antrieb mit 53,6 % (15.549 Fahrzeuge). An zweiter Stelle kommen Diesel-SSGF mit einem Anteil von 28,4 % (8.238 Fahrzeuge), gefolgt von Hybrid- und Elektro-SSGF (jeweils 9,0 % bzw. 2.596 Fahrzeuge).

Abbildung 71: Entwicklung des Bestands Leichter Straßengüterverkehrsfahrzeuge (SGF) im Alternativszenario



Quelle: Eigene Berechnung.

Abbildung 72: Entwicklung des Bestands Schwerer Straßengüterverkehrsfahrzeuge (SGF) im Alternativszenario

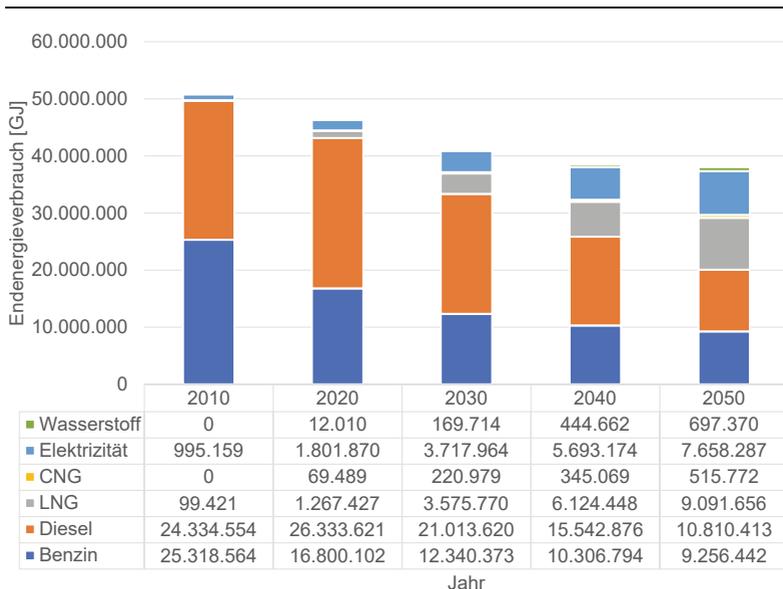


Quelle: Eigene Berechnung.

8.2.3 Endenergieverbrauch

Der Endenergieverbrauch des Verkehrs sinkt von 50.747.699 GJ im Jahr 2010 um etwa ein Viertel auf 38.029.940 GJ (siehe Abbildung 73). Die Anteile der verschiedenen Treibstoffarten verändern sich in diesem Zeitraum deutlich: Im Basisjahr entfallen mehr als 95 % des Endenergieverbrauchs auf die Treibstoffarten Benzin und Diesel. Elektrizität (zu diesem Zeitpunkt nahezu ausschließlich Bahnstrom) nimmt einen Anteil von 2,0 % ein, alle anderen Treibstoffe spielen eine sehr geringe Rolle. Im Jahr 2050 nehmen Benzin, Diesel, Erdgas (CNG) und Elektrizität in etwa gleiche Anteile am Endenergieverbrauch ein. Auch Wasserstoff für den Betrieb in Brennstoffzellen und Flüssiggas (LPG) spielen nun eine Rolle, wenn diese auch gering ist.

Abbildung 73: Entwicklung des Endenergieverbrauchs des Verkehrs im Alternativszenario



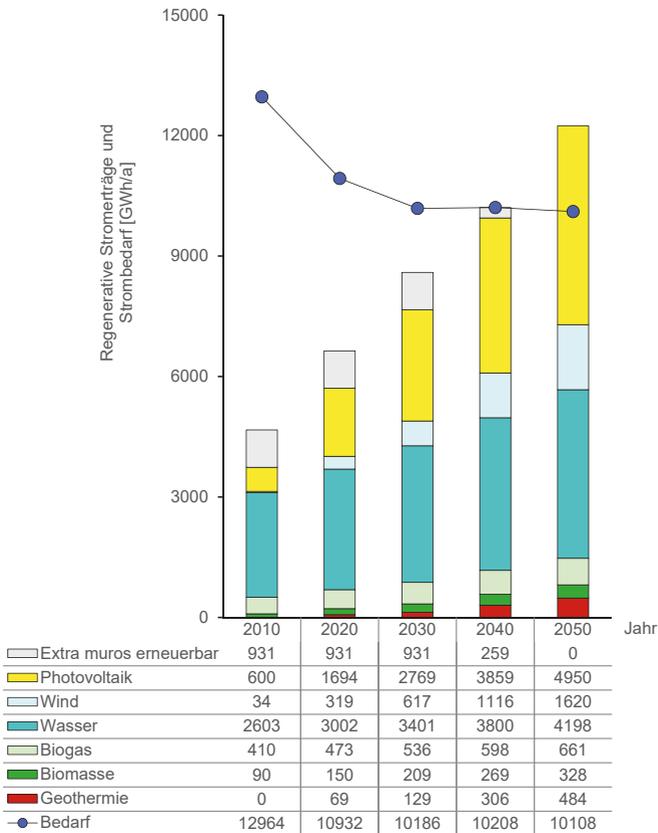
Quelle: Eigene Berechnung.

8.2.4 Regenerative Erträge

Im Alternativszenario kann die Bodenseeregion ihren Strombedarf ab etwa dem Jahr 2040 selbst mit regenerativen Stromerträgen decken, wie aus Abbildung 74 ersichtlich ist.

Im Jahr 2050 wird sogar ein Stromüberschuss erzielt, der exportiert werden kann. Dies ist vor allem auf den starken Ausbau der Photovoltaik, aber auch auf Zuwächse bei der Wasserkraft zurückzuführen.

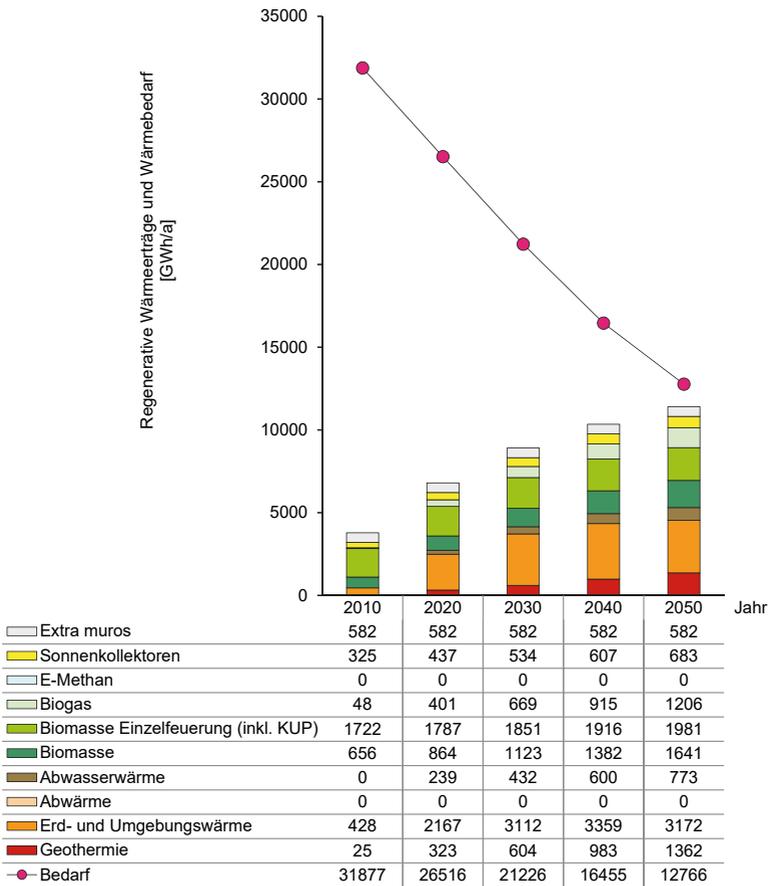
Abbildung 74: Regenerative Stromerträge und Strombedarf im Alternativszenario



Quelle: Eigene Berechnung mit STEM.

Auch im Wärmebereich kommt die Region bis zum Jahr 2050 nahe an eine vollständige regionale Selbstversorgung mit erneuerbaren Energien heran. Hier macht sich die im Vergleich zum Trendszenario höhere Sanierungsrate bemerkbar.

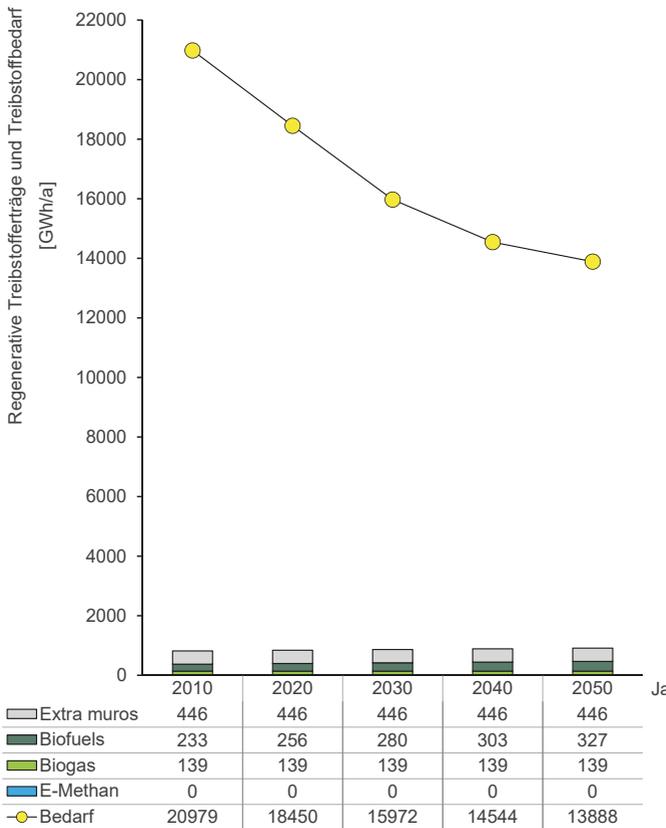
Abbildung 75: Regenerative Wärmeerträge und Wärmebedarf im Alternativszenario



Quelle: Eigene Berechnung mit STEM.

Dennoch wird im Trendszenario keine regionale Energieautonomie erreicht (siehe Abbildung 76). Das liegt vor allem darin begründet, dass der Verkehrssektor trotz einer starken Zunahme alternativer Antriebsarten im Jahr 2050 nach wie vor in erheblichem Umfang von den fossilen Treibstoffen Benzin, Diesel, Erdgas (CNG) und Flüssiggas (LPG) abhängig ist.

Abbildung 76: Regenerative Treibstofffrträge und Treibstoffbedarf im Alternativszenario



Quelle: Eigene Berechnung mit STEM.

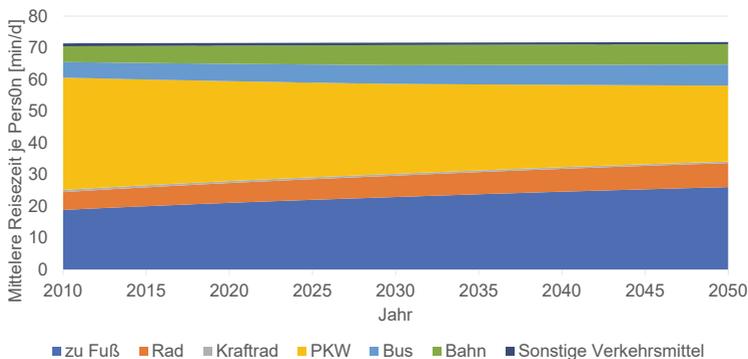
8.3 Zielszenario

Im Zielszenario verständigen sich die Entscheidungsträger darauf, den Fahrzeugbestand bis zum Jahr 2050 vollständig auf alternative Antriebe umzustellen und den Endenergiebedarf der Region vollständig mit regional erzeugter erneuerbarer Energie zu decken.

8.3.1 Verkehrsnachfrage

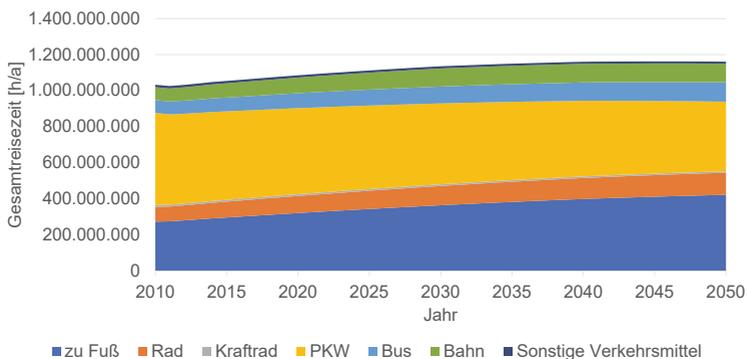
Im Zielszenario verändern sich die Verkehrsnachfrage im Personenverkehr und das Verkehrsverhalten in gleicher Weise wie im Exzellenzszenario. In beiden Szenarien findet eine Verlagerung vom MIV (Kraftrad, PKW, sonstige Verkehrsmittel) auf Öffentliche Verkehrsmittel und den Fuß- und Radverkehr statt. Dies zeigt sich sowohl bei der mittleren Reisezeit je Person (siehe Abbildung 77) als auch bei der Gesamtreisezeit (siehe Abbildung 78), der Personenverkehrsleistung (siehe Abbildung 79) und der Fahrleistung nach Verkehrsmitteln (siehe Abbildung 80).

Abbildung 77: Entwicklung der mittleren Reisezeit je Person im Zielszenario



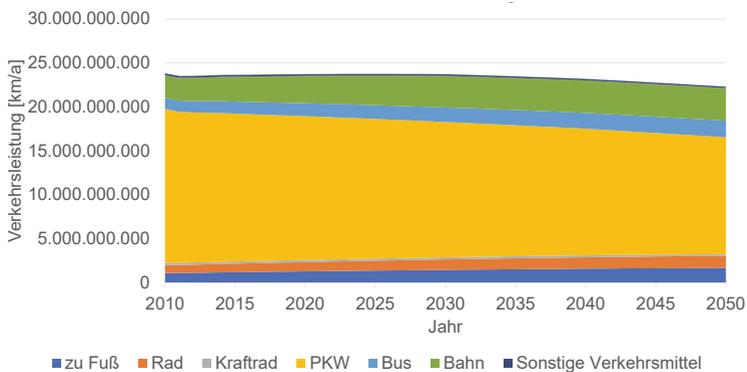
Quelle: Eigene Berechnung.

Abbildung 78: Entwicklung der Gesamtreisezeit im Zielszenario

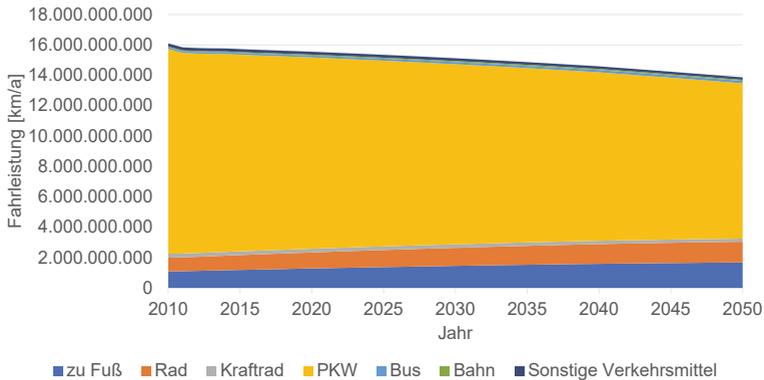


Quelle: Eigene Berechnung.

Abbildung 79: Entwicklung der Verkehrsleistung des Straßenpersonenverkehrs im Zielszenario



Quelle: Eigene Berechnung.

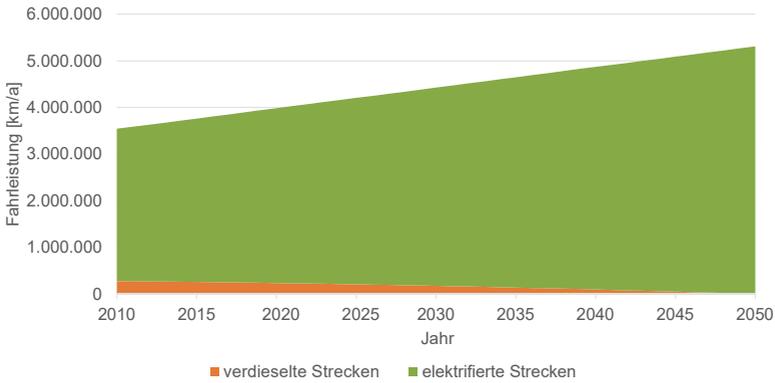
Abbildung 80: Entwicklung der Fahrleistung des Straßenpersonenverkehrs im Zielszenario

Quelle: Eigene Berechnung.

Die Fahrleistung des Schienengüterverkehrs wächst wie in den anderen beiden Szenarien um 50 % bis zum Jahr 2050 (siehe Abbildung 81). Güterzüge mit Diesellokomotive verschwinden im Zielszenario schrittweise von den Gleisen der Bodenseeregion. Demensprechend wird der Schienengüterverkehr im Jahr 2050 vollständig auf elektrifizierten Strecken abgewickelt.

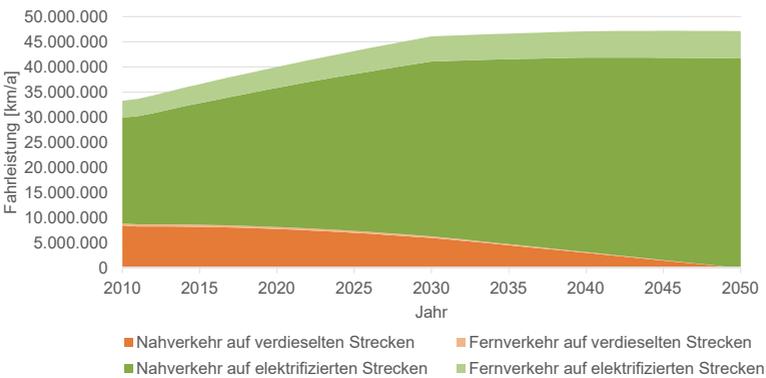
Die Zunahme des Schienenpersonenverkehrs entspricht der im Alternativszenario. Auch der Schienenpersonenverkehr wird im Jahr 2050 vollständig auf elektrifizierten Bahnstrecken abgewickelt (siehe Abbildung 82).

Abbildung 81: Entwicklung der Fahrleistung des Schienengüterverkehrs im Zielszenario



Quelle: Eigene Berechnung.

Abbildung 82: Entwicklung der Fahrleistung des Schienenpersonenverkehrs im Zielszenario

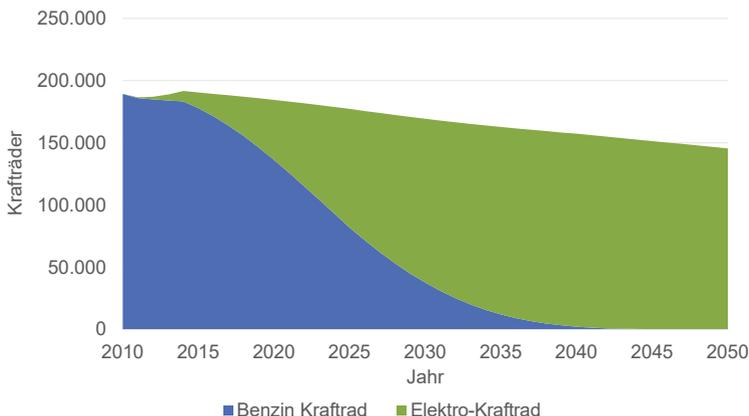


Quelle: Eigene Berechnung.

8.3.2 Fahrzeugbestandsentwicklung

Die Zahl der Krafträder sinkt bis zum Jahr 2050 von 189.409 auf 145.522 (siehe Abbildung 83). Da der Anteil elektrisch angetriebener Krafträder rasch steigt und ab dem Jahr 2025 ein Zulassungsverbot für Krafträder mit Benzinantrieb besteht, sinkt der Anteil Letzterer sehr rasch. Ab dem Jahr 2040 ist der Kraftrad-Bestand vollständig elektrifiziert.

Abbildung 83: Entwicklung des Kraftrad-Bestands im Zielszenario

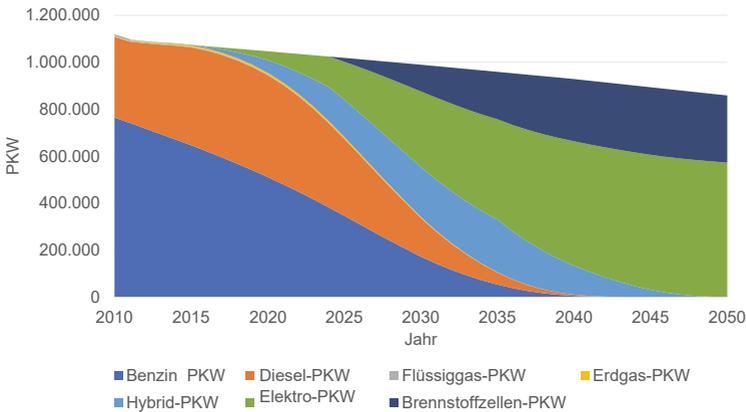


Quelle: Eigene Berechnung.

Die Zahl der PKW sinkt von 1.116.797 auf 858.522 Fahrzeuge (siehe Abbildung 84). Ab 2030 gilt ein Zulassungsverbot für PKW mit Benzin- und Dieselantrieb sowie mit Antrieben mit Flüssiggas (LPG) und Erdgas (CNG). Fahrzeuge mit Hybridantrieb können als technologische Übergangslösung bis zum Jahr 2034 zugelassen werden. Ab dem Jahr 2035 sind nur noch Neuzulassungen mit Elektro- oder Brennstoffzellenantrieb zulässig.

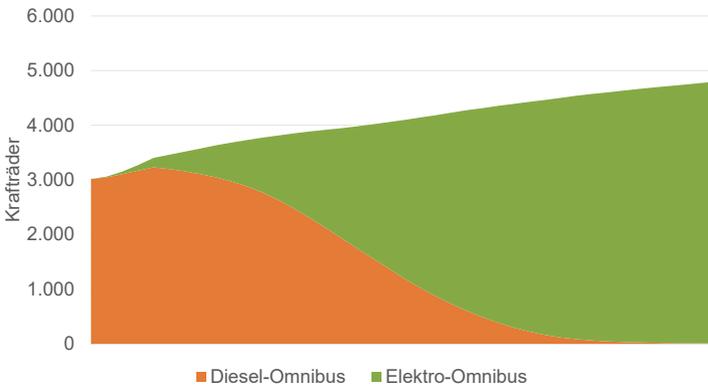
Aufgrund der Zulassungsbeschränkungen (ggf. ergänzt um Anreize zur Stilllegung der Fahrzeuge) scheiden alle Fahrzeuge mit Antrieben, die fossile Treibstoffe benötigen, bis zum Jahr 2050 aus dem Bestand aus. In diesem Jahr befinden sich nur noch PKW mit Elektro- oder Brennstoffzellenantrieb im Bestand. Zwei Drittel davon (571.805 PKW) sind Elektrofahrzeuge, ein Drittel (289.914 PKW) haben einen Brennstoffzellenantrieb.

Abbildung 84: Entwicklung des PKW-Bestands im Zielszenario



Quelle: Eigene Berechnung.

Abbildung 85: Entwicklung des Omnibus-Bestands im Zielszenario



Quelle: Eigene Berechnung.

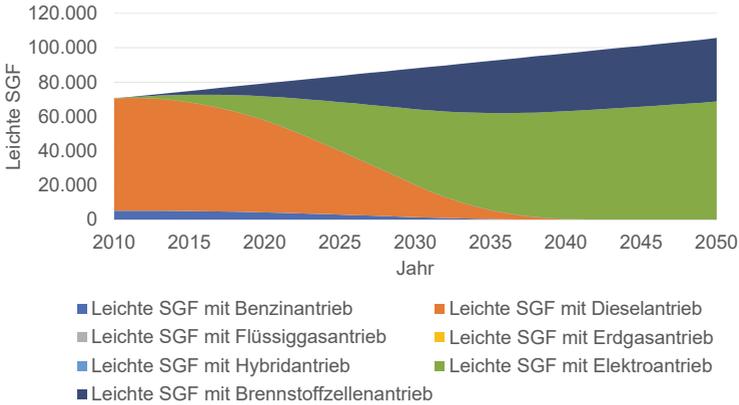
Die Öffentlichen Verkehrsmittel werden im Trendszenario verstärkt nachgefragt, was u. a. einen zusätzlichen Bedarf an Omnibussen verursacht (siehe Abbildung 85). Die Zahl der Omnibusse wächst im Zielszenario von 3.013 Fahrzeuge auf 4.785 Fahrzeuge. Ab dem Jahr 2030 dürfen nur noch Omnibusse mit Elektroantrieb zugelassen werden. Dadurch

wird erreicht, dass auf den Straßen der Bodenseeregion ab im Jahr 2050 nur noch Omnibusse mit Elektroantrieb unterwegs sind.

Der Bestand der LSGF wächst um 50 % von 70.545 auf 105.682 Fahrzeuge (siehe Abbildung 86). Im Zielszenario gilt ab dem Jahr 2030 ein Neuzulassungsverbot für Fahrzeuge, die für ihren Betrieb fossile Brennstoffe benötigen. Deshalb scheidet Dieselfahrzeuge, die im Basisjahr den höchsten Anteil an Fahrzeugen ausmachen, und Fahrzeuge mit Benzinmotor bis zum Jahr 2050 aus dem Fahrzeugbestand aus. Am Ende des Betrachtungszeitraums umfasst der Bestand der LSGF 68.687 Fahrzeuge mit Elektroantrieb (65,0 %) und 36.995 Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb (35,0 %).

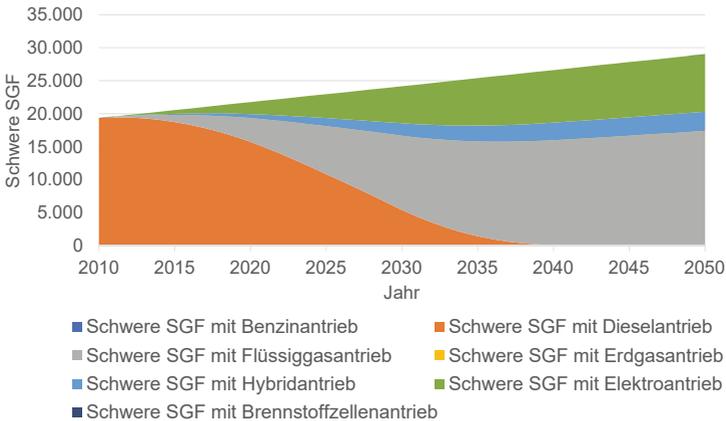
Der Bestand der SSGF wächst entsprechend der gesteigerten Verkehrsnachfrage ebenfalls um 50 % von 19.333 Fahrzeuge auf 29.001 Fahrzeuge (siehe Abbildung 87). Bei den SSGF lassen sich Diesel- und Benzinmotoren allenfalls auf Kurzstrecken und für mittelschwere Fahrzeuge durch Elektromotoren ersetzen. Für Mittel- und Langstrecken sowie für schwere LKW und Sattelschlepper ist der Batterieantrieb aufgrund der begrenzten Speicherkapazität der Batterien nicht geeignet. Im Zielszenario wird daher davon ausgegangen, dass neben dem batterieelektrischen Antrieb auch synthetisches Flüssiggas, das aus regional erzeugtem erneuerbarem Strom und regionaler Biomasse gewonnen werden kann, eine wichtige Rolle spielen wird. Eine weitere im Exzellenzszenario berücksichtigte Antriebsart sind Dieselhybridmotoren. Fahrzeuge, die mit diesem Antrieb ausgestattet sind, fahren auf Kurzstrecken sowie bei Leerfahrten elektrisch, können im Bedarfsfall aber einen Dieselmotor zuschalten. Um das Ziel regionaler Energieautonomie zu erreichen, muss der Dieselbedarf dieser Fahrzeuge durch regional erzeugten Biodiesel gedeckt werden. Im Zielszenario wird auch für die SSGF unterstellt, dass ab dem Jahr 2030 keine Fahrzeuge mit reinem Diesel- und Benzinmotor mehr zugelassen werden. Sie werden sukzessive durch Fahrzeuge ersetzt, die elektrisch angetrieben werden, über einen Hybridantrieb verfügen oder Flüssiggas (LPG) aus regional erzeugten Rohstoffen verwenden. Im Jahr 2050 des Zielszenarios verfügen 17.404 SSGF (60,0 %) über einen Flüssiggasantrieb, 2.904 Fahrzeuge oder 10,0 % des Bestandes über einen Biodiesel-Hybridantrieb und 8.702 Fahrzeuge oder 30,0 % über einen Elektroantrieb.

Abbildung 86: Entwicklung des Bestands Leichter Straßengüterverkehrsfahrzeuge im Zielszenario 2010-2050



Quelle: Eigene Berechnung.

Abbildung 87: Entwicklung des Bestands Schwerer Straßengüterverkehrsfahrzeuge im Zielszenario 2010-2050

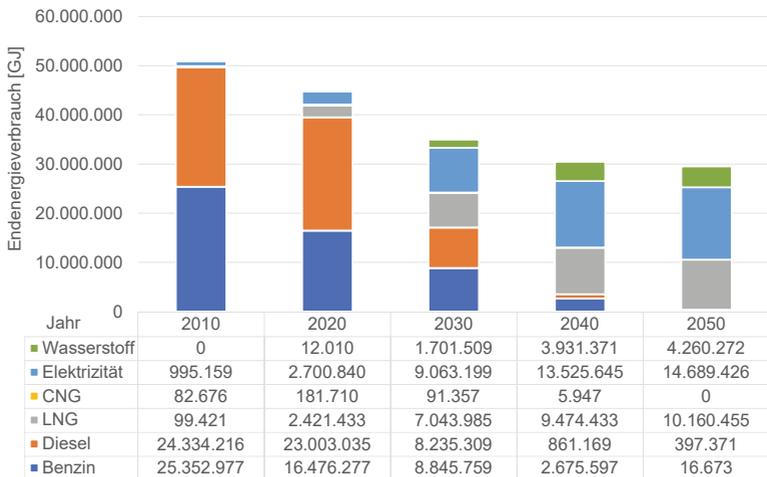


Quelle: Eigene Berechnung.

8.3.3 Endenergieverbrauch

Der Endenergieverbrauch des Verkehrs sinkt im Zielszenario von 50.864.450 GJ im Basisjahr auf 29.524.198 GJ am Ende des Betrachtungszeitraums (siehe Abbildung 88). Dies entspricht einem Rückgang um 42 %. Somit ist der Rückgang in etwa doppelt so groß wie im Alternativszenario. Dieser Unterschied ist darauf zurückzuführen, dass Elektrofahrzeuge, die im Zielszenario eine deutlich größere Rolle spielen als im Alternativszenario, energieeffizienter sind als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor.

Abbildung 88: Entwicklung des Endenergieverbrauchs des Verkehrs im Zielszenario



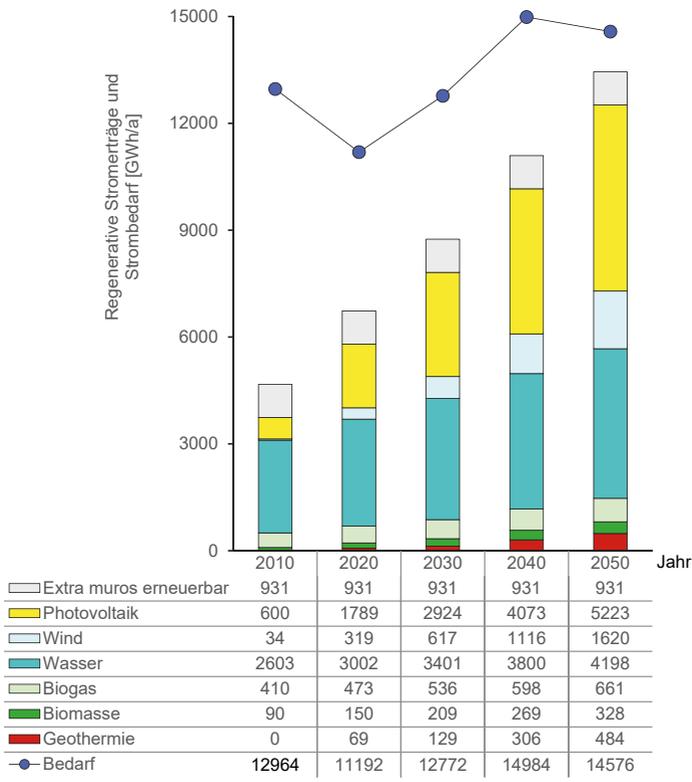
Quelle: Eigene Berechnung.

Die Anteile der verschiedenen Treibstoffarten verändern sich im Zielszenario deutlich: Im Basisjahr entfallen 49,8 % des Endenergieverbrauchs auf Benzin, 47,8 % auf Dieselmotorkraftstoff, 2,0 % auf Elektrizität und 0,4 % auf sonstige Kraftstoffe. Im Jahr 2050 hingegen macht die Elektrizität 49,8 % des Endenergieverbrauchs aus, 34,4 % entfallen auf synthetisch erzeugtes Flüssiggas, 14,4 % auf Wasserstoff und 1,4 % auf (Bio)Diesel.

8.3.4 Regenerative Erträge

Die regenerative Energieerzeugung entwickelt sich im Zielszenario analog zum Alternativszenario. Allerdings kann die Region im Zielszenario zu keiner Zeit ihren Strombedarf vollständig decken, weil vom Jahr 2020 bis zum Jahr 2040 der Strombedarf der Region mit etwa der gleichen Geschwindigkeit wächst wie der erneuerbare Stromertrag (siehe Abbildung 89). Ab dem Jahr 2040 kommt es zu einem leichten Rückgang des Strombedarfs, was vermutlich in erster Linie auf demographische Faktoren

Abbildung 89: Regenerative Stromerträge und Strombedarf im Zielszenario



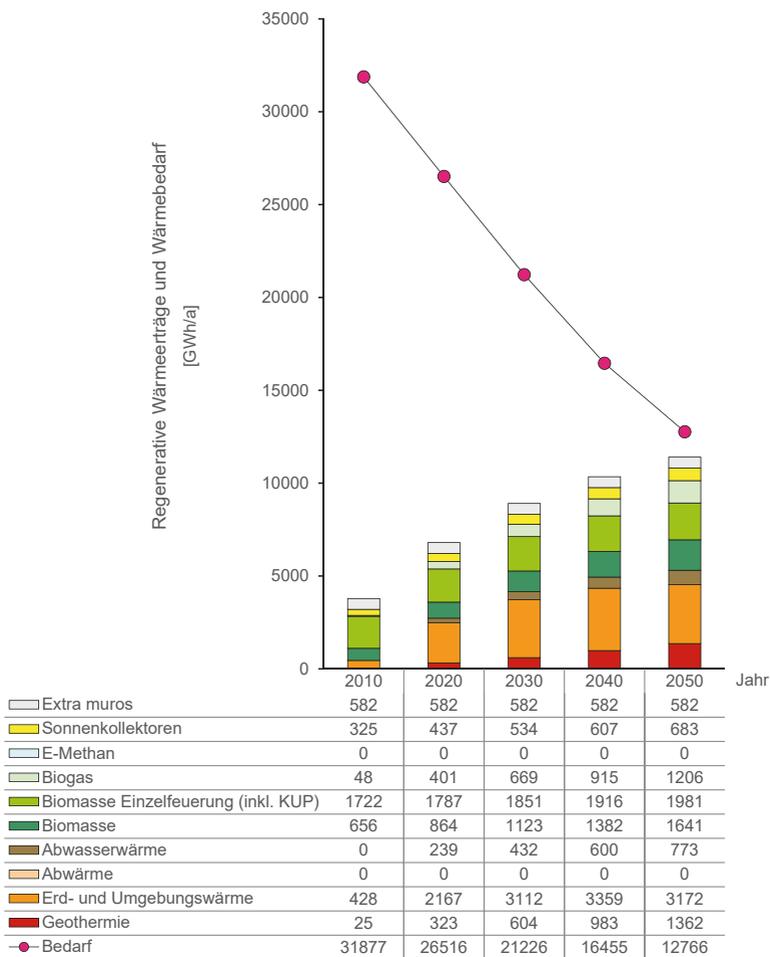
Quelle: Eigene Berechnung mit STEM.

zurückzuführen ist. Die Bodenseeregion dürfte zu diesem Zeitpunkt den Höhenpunkt ihrer Einwohnerentwicklung überschritten haben. Um im Zielszenario eine vollständige Deckung des regionalen Strombedarfs zu erreichen, sind insbesondere im Verkehrssektor Effizienzmaßnahmen erforderlich, die zu einer Senkung des Strombedarfs um 10-15 % führen. Hierbei kommen sowohl fahrzeugseitige Maßnahmen (Richt- bzw. Grenzwerte für den Energieverbrauch, Gewichtsbegrenzungen etc.) als auch Maßnahmen auf der Ebene des Verkehrssystems (z. B. zusätzliche Förderung des Fuß- und Radverkehrs, Ausbau der Öffentlichen Verkehrsmittel über das im Exzellenzszenario hinausreichende Maß, Förderung von Car-, Bike- und Ridesharing). Weitere Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung könnten sich durch die intensive Nutzung von Chancen der Digitalisierung (Mischformen zwischen privatem und öffentlichem Verkehr, autonomes Fahren) ergeben.

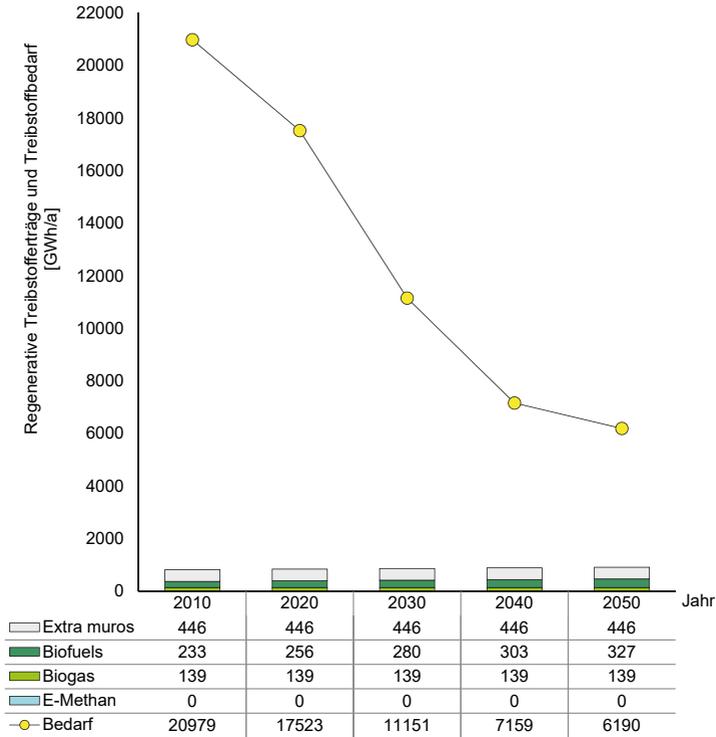
Der Wärmebedarf und der regenerative Wärmeertrag entwickeln sich wie im Alternativszenario. Im Jahr 2050 kann der regionale Bedarf annähernd regenerativ gedeckt werden (siehe Abbildung 90). Eine vollständige Bedarfsdeckung wäre mit verhältnismäßig geringfügigen Effizienzsteigerungen zu erreichen, beispielsweise in Form etwas strengerer Standards für die Energieeffizienz von Gebäuden und die Förderung von Plusenergiequartieren.

Die größte Deckungslücke besteht auch im Zielszenario zwischen dem Treibstoffbedarf und dem regionalen Potenzial für die Erzeugung von Biotreibstoffen (siehe Abbildung 91). Zwar sinkt der Treibstoffbedarf von 20.979 GWh/a im Basisjahr auf 6.190 GWh/a im Jahr 2050, was einer Abnahme um 70,5 % entspricht (siehe Abbildung 91). Das regionale Potenzial für die Erzeugung von Biofuels und Biodiesel liegt bei 466 GWh/a. Im Zielszenario findet keine Herstellung von Biomethan statt, da hierfür ein Überschuss von regional erzeugtem regenerativem Strom erforderlich ist. Wie oben beschrieben, deckt der regenerative Stromertrag im Jahr 2050 aber nicht einmal den Strombedarf, sodass kein Biomethan erzeugt werden kann. Somit können auch im letzten Jahre des Betrachtungszeitraums lediglich 7,5 % des Treibstoffbedarfs mit regenerativen Treibstoffen aus der Region gedeckt werden.

Abbildung 90: Regenerative Wärmeerträge und Wärmebedarf im Zielszenario



Quelle: Eigene Berechnung mit STEM.

Abbildung 91: Regenerative Treibstoffträge und Treibstoffbedarf im Zielszenario

Quelle: Eigene Berechnung mit STEM.

Der Treibstoffbedarf im Jahr 2050 des Zielszenarios ist auf zwei Ursachen zurückzuführen:

- ▶ zum einen auf PKW mit Wasserstoffantrieb und
- ▶ zum anderen auf den Straßengüterverkehr, der sich nur zum Teil elektrifizieren lässt.

Um den Treibstoffbedarf so zu reduzieren, dass er den regionalen Ertrag nicht übersteigt, sind folgende Maßnahmen in Betracht zu ziehen:

- ▶ Verzicht auf Hybrid- und Brennstoffzellenantriebe für PKW und LSGV; vollständige Umstellung dieser Fahrzeugtypen auf batterieelektrische Antriebe
- ▶ Größtmögliche Verlagerung des Güterverkehrs auf die Schiene (und zwar insbesondere jenes Teils, der mit SSGV erbracht wird)
- ▶ Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz des Güterverkehrs, sowohl fahrzeugseitig (Verbrauchsobergrenzen) als auch auf der Ebene des Verkehrssystems (z. B. durch Routenoptimierung und durch Anreize für das Vermeiden von Leerfahrten.
- ▶ Bau von Oberleitungen für Straßengüterverkehrsfahrzeuge entlang der Autobahn und ggf. auch ausgewählter Bundes-, National- und Schnellstraßen in der Bodenseeregion; Die entsprechende Technologie wird derzeit u.a. auf der A5 in Hessen getestet (Hessen Mobil, 2020).
- ▶ Maßnahmen zu Reduzierung des Stromverbrauchs in der Bodenseeregion, sodass aus Überschussstrom Methan erzeugt werden kann

Die Ergebnisse der drei Szenarioberechnungen werden in Tabelle 24 für die Mobilität und in Tabelle 25 für das Energiesystem zusammengefasst.

Tabelle 24: Ergebnisse der Szenario-Berechnungen für die Mobilität

Merkmal	Trendszenario 2050	Alternativszenario „Sanfte Transformation“ 2050	Zielszenario „Energieautonomie“ 2050
Durchschnittliche Unterwegszeit eines Bewohners der Bodenseeregion	71,82 Minuten, davon ▶ 19,21 Minuten zu Fuß ▶ 5,59 Minuten Fahrrad ▶ 0,74 Minuten Kraftrad ▶ 35,14 Minuten PKW ▶ 4,90 Minuten Bus ▶ 5,25 Minuten Bahn ▶ 0,99 Minuten sonstige Verkehrsmittel	71,82 Minuten, davon ▶ 26,08 Minuten zu Fuß ▶ 7,59 Minuten Fahrrad ▶ 0,50 Minuten Kraftrad ▶ 23,91 Minuten PKW ▶ 6,65 Minuten Bus ▶ 6,43 Minuten Bahn ▶ 0,67 Minuten sonstige Verkehrsmittel	71,82 Minuten, davon ▶ 26,08 Minuten zu Fuß ▶ 7,59 Minuten Fahrrad ▶ 0,50 Minuten Kraftrad ▶ 23,91 Minuten PKW ▶ 6,65 Minuten Bus ▶ 6,43 Minuten Bahn ▶ 0,67 Minuten sonstige Verkehrsmittel
Jährliche Fahrleistung des Personenverkehrs	17,99 Mrd. km, davon ▶ 1,23 Mrd. km zu Fuß ▶ 1,01 Mrd. km Fahrrad ▶ 0,30 Mrd. km Kraftrad ▶ 15,04 Mrd. km PKW ▶ 0,12 Mrd. km Bus ▶ 0,06 Mrd. km Bahn ▶ 0,23 Mrd. km sonstige Verkehrsmittel	13,86 Mrd. km, davon ▶ 1,68 Mrd. km zu Fuß ▶ 1,37 Mrd. km Fahrrad ▶ 0,20 Mrd. km Kraftrad ▶ 10,22 Mrd. km PKW ▶ 0,16 Mrd. km Bus ▶ 0,07 Mrd. km Bahn ▶ 0,16 Mrd. km sonstige Verkehrsmittel	13,86 Mrd. km, davon ▶ 1,68 Mrd. km zu Fuß ▶ 1,37 Mrd. km Fahrrad ▶ 0,20 Mrd. km Kraftrad ▶ 10,22 Mrd. km PKW ▶ 0,16 Mrd. km Bus ▶ 0,07 Mrd. km Bahn ▶ 0,16 Mrd. km sonstige Verkehrsmittel
Jährliche Fahrleistung des Schienenpersonenverkehrs	34,06 Mio. km, davon ▶ 7,41 Mio. km auf verdieselten Strecken ▶ 26,65 Mio. km auf elektrifizierten Strecken	41,70 Mio. km, davon ▶ 7,04 Mio. km auf verdieselten Strecken ▶ 34,66 Mio. km auf elektrifizierten Strecken	41,70 Mio. km, davon ▶ 0 km auf verdieselten Strecken ▶ 41,70 Mio. km auf elektrifizierten Strecken
Jährliche Fahrleistung des Schienenpersonenfernverkehrs	4,70 Mio. km, davon ▶ 0,36 Mio. km auf verdieselten Strecken ▶ 4,34 Mio. km auf elektrifizierten Strecken	5,46 Mio. km, davon ▶ 0,26 Mio. km auf verdieselten Strecken ▶ 5,20 Mio. km auf elektrifizierten Strecken	5,46 Mio. km, davon ▶ 0 km auf verdieselten Strecken ▶ 5,46 Mio. km auf elektrifizierten Strecken
Jährliche Fahrleistung des Schienengüterverkehrs	5,31 Mio. km, davon ▶ 0,34 Mio. km auf verdieselten Strecken ▶ 4,97 Mio. m auf elektrifizierten Strecken	5,31 Mio. km, davon ▶ 0,19 Mio. km auf verdieselten Strecken ▶ 5,12 Mio. km auf elektrifizierten Strecken	5,31 Mio. km, davon ▶ 0 km auf verdieselten Strecken ▶ 5,31 Mio. .km auf elektrifizierten Strecken

Merkmal	Trendszenario 2050	Alternativszenario „Sanfte Transformation“ 2050	Zielszenario „Energieautonomie“ 2050
PKW-Bestand	1.265.700 PKW, davon ▶ 592.700 Benzin-PKW ▶ 565.500 PKW Diesel-PKW ▶ 92.200 Elektro-PKW ▶ 2.400 Erdgas PKW ▶ 1.150 Flüssiggas-PKW	858.522 PKW, davon ▶ 212.812 Hybrid-PKW ▶ 193.132 Benzin-PKW ▶ 184.300 Diesel-PKW ▶ 172.945 Elektro-PKW ▶ 74.332 Brennstoffzellen-PKW ▶ 20.141 PKW Erdgas-PKW ▶ 861 PKW mit Flüssiggas-Antrieb	858.522 PKW, davon ▶ 571.805 Elektro-PKW ▶ 289.914 Brennstoffzellen-PKW
Kraftrad-Bestand	212.000 Krafträder, davon ▶ 194.500 mit Benzinantrieb ▶ 17.500 mit Elektroantrieb	145.522 Krafträder, davon ▶ 85.818 Krafträder mit Benzinantrieb ▶ 59.700 Krafträder mit Elektroantrieb	145.522 Krafträder mit Elektroantrieb
Omnibus-Bestand	3.545 Omnibusse, davon ▶ 3.245 Diesel-Omnibusse ▶ 320 Elektro-Omnibusse	4.785 Omnibusse, davon ▶ 2.347 Diesel-Omnibusse ▶ 2.461 Elektro-Omnibusse	4.785 Omnibusse mit Elektroantrieb.
Bestand der Leichten Straßen-güter-verkehrs-fahrzeuge	105.682 LSGF, davon ▶ 6.683 Benzin-LSGF ▶ 77.372 Diesel-LSGF ▶ 4.728 Erdgas-LSGF ▶ 14.161 Hybrid-LSGF ▶ 3.775 Elektro-LSGF	105.682 LSGF, davon ▶ 4.621 Benzin-LSGF ▶ 55.935 Diesel-LSGF ▶ 3.775 Erdgas-LSGF ▶ 19.830 Hybrid-LSGF ▶ 13.978 Elektro-LSGF ▶ 7.563 Brennstoffzellen-LSGF	105.682 LSGF, davon: ▶ 68.687 Elektro-LSGF ▶ 36.995 Brennstoffzellen-LSGF
Bestand der Schweren Straßengüterverkehrs-fahrzeuge	29.001 SSGF, davon ▶ 27.707 Diesel-SSGF ▶ 1.302 Elektro-SSGF	29.001 SSGF, davon ▶ 8.238 Diesel-SSGF ▶ 15.549 Flüssiggas-SSGF ▶ 2.596 Hybrid-SSGF ▶ 2.596 Elektro-SSGF	29.001 SSGF, davon ▶ 17.704 Flüssiggas-SSGF ▶ 2.904 Hybrid-SSGF ▶ 8.702 Elektro-SSGF
Endenergieverbrauch der Mobilität	38.509.833 GJ/a, davon ▶ 0 GJ/a Wasserstoff ▶ 995.159 GJ/a Elektrizität ▶ 82.676 GJ/a CNG ▶ 99.421 GJ/a LPG ▶ 24.324.633 GJ/a Diesel ▶ 25.255.135 GJ/a Benzin	38.509.923 GJ/a, davon ▶ 697.370 GJ Wasserstoff ▶ 7.658.697 GJ/a Elektrizität ▶ 515.772 GJ/a CNG ▶ 9.091.656 GJ/a LNG ▶ 10.810.413 GJ/a Diesel ▶ 9.256.442 GJ/a Benzin	29.524.197 GJ/a, davon ▶ 4.260.272 GJ Wasserstoff ▶ 14.689.426 GJ/a Elektrizität ▶ 10.160.455 GJ/a LNG ▶ 397.371 GJ/a Diesel ▶ 16.673 GJ/a Benzin

Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung.

Tabelle 25: Ergebnisse der Szenario-Berechnungen für das Energiesystem

Merkmal	Trendszenario 2050	Alternativszenario „Sanfte Transformation“ 2050	Zielszenario „Energieautonomie“ 2050
Strombedarf und regenerative Erträge	Strombedarf: 13.965 GWh/a	Strombedarf: 10.108 GWh/a	Strombedarf: 10.108 GWh/a
	Stromerträge: 10.079 GWh, davon <ul style="list-style-type: none"> ▶ Photovoltaik 2.277 GWh/a ▶ Wind 1.200 GWh/a ▶ Wasser 4.198 GWh/a ▶ Biogas 661 GWh/a ▶ Biomasse 328 GWh/a ▶ Geothermie 484 GWh/a ▶ Extra Muros Erneuerbar 931 GWh/a 	Stromerträge: 12.241 GWh/a, davon: <ul style="list-style-type: none"> ▶ Photovoltaik: 4.950 GWh/a ▶ Wind: 1.620 GWh/a ▶ Wasser: 4.198 GWh/a ▶ Biogas: 661 GWh/a ▶ Biomasse: 328 GWh/a ▶ Geothermie: 484 GWh/a ▶ Extra Muros Erneuerbar: 0 GWh/a 	Stromerträge: 12.241 GWh/a, davon: <ul style="list-style-type: none"> ▶ Photovoltaik: 4.950 GWh/a ▶ Wind: 1.620 GWh/a ▶ Wasser: 4.198 GWh/a ▶ Biogas: 661 GWh/a ▶ Biomasse: 328 GWh/a ▶ Geothermie: 484 GWh/a ▶ Extra Muros Erneuerbar: 0 GWh/a
	Selbstversorgungsgrad: 72,1 %	Selbstversorgungsgrad: 121,1 %	Selbstversorgungsgrad: 92,2 %
Wärme- bedarf und regenerative Erträge	Wärmebedarf: 18.841 GWh/a	Wärmebedarf: 12.766 GWh/a	Wärmebedarf: 12.766 GWh/a
	Wärmeerträge: 6.708 GWh/a, davon <ul style="list-style-type: none"> ▶ Extra Muros: 582 GWh/a ▶ Sonnenkollektoren: 446 GWh/a ▶ E-Methan: 0 GWh ▶ Biogas: 1.206 GWh/a ▶ Biomasse: 1.641 GWh/a ▶ Abwasserwärme: 497 GWh/a ▶ Abwärme: 0 GWh/a ▶ Erd- und Umgebungswärme: 2.408 GWh/a 	Wärmeerträge: 11.400 GWh/a, davon <ul style="list-style-type: none"> ▶ Extra Muros: 582 GWh/a ▶ Sonnenkollektoren: 683 GWh/a ▶ E-Methan: 0 GWh ▶ Biogas: 1.206 GWh/a ▶ Biomasse Einzelfeuerung: 1.981 GWh/a ▶ Biomasse: 1.641 GWh/a ▶ Abwasserwärme: 773 GWh/a ▶ Abwärme: 0 GWh/a ▶ Erd- und Umgebungswärme: 3.172 GWh/a ▶ Geothermie: 1.362 GWh/a 	Wärmeerträge: 11.400 GWh/a, davon <ul style="list-style-type: none"> ▶ Extra Muros: 582 GWh/a ▶ Sonnenkollektoren: 683 GWh/a ▶ E-Methan: 0 GWh ▶ Biogas: 1.206 GWh/a ▶ Biomasse Einzelfeuerung: 1.981 GWh/a ▶ Biomasse: 1.641 GWh/a ▶ Abwasserwärme: 773 GWh/a ▶ Abwärme: 0 GWh/a ▶ Erd- und Umgebungswärme: 3.172 GWh/a ▶ Geothermie: 1.362 GWh/a
	Selbstversorgungsgrad: 51,5 %	Selbstversorgungsgrad: 89,3 %	Selbstversorgungsgrad: 89,3 %

Merkmal	Trendszenario 2050	Alternativszenario „Sanfte Transformation“ 2050	Zielszenario „Energieautonomie“ 2050
Treibstoff- bedarf und regenerative Erträge	Treibstoffbedarf: 16.998 GWh/a Regenerativer Ertrag 912 GWh/a, davon: ▶ Biofuels: 327 GWh/a ▶ Biogas: 139 GWh/a ▶ E-Methan: 0 GWh ▶ Extra Muros (=Biodie- sel-Beimischungen): 446 GWh/a Selbstversorgungsgrad: 5,3 %	Treibstoffbedarf: 13.888 GWh/a Regenerativer Ertrag 912 GWh/a, davon: ▶ Biofuels: 327 GWh/a ▶ Biogas: 139 GWh/a ▶ E-Methan: 0 GWh ▶ Extra Muros (=Biodie- sel-Beimischungen): 446 GWh/a Selbstversorgungsgrad: 6,5 %	Treibstoffbedarf: 6.190 GWh/a Regenerativer Ertrag 912 GWh/a, davon: ▶ Biofuels: 327 GWh/a ▶ Biogas: 139 GWh/a ▶ E-Methan: 0 GWh ▶ Extra Muros (=Biodie- sel-Beimischungen): 446 GWh/a Selbstversorgungsgrad: 14,7 %

Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung.

9 Szenario-Transfer

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie die Erkenntnisse aus der Szenariountersuchung in die Praxis der grenzüberschreitenden Regionalentwicklung in der Bodenseeregion übertragen werden könnte. Hierzu wird zunächst eine Akteursanalyse durchgeführt, anschließend werden Handlungsempfehlungen für die Etablierung einer grenzüberschreitenden Modellregion für Energieautonomie und klimafreundliche Mobilität formuliert.

9.1 Akteursanalyse

An der Gestaltung der zukünftigen Mobilität in der Bodenseeregion wirken unterschiedliche Akteure mit. Einige der Akteure sind in der Region angesiedelt, andere wirken durch ihr Handeln von außen auf die Region ein. In diesem Kapitel werden die wichtigsten Akteursgruppen und ihr mögliches Handeln in der Bodenseeregion beschrieben.

Bewohnerinnen und Bewohner:

Die Bewohnerinnen und Bewohner der Bodenseeregion beeinflussen die Mobilitätszukunft der Region auf verschiedene Weise. Entscheidungen zum Standort von Wohnung, Arbeit und Ausbildungsplatz beeinflussen die räumliche Entwicklung der Region sowie die regionalen Verkehrsverflechtungen. Ebenso treffen die Bewohnerinnen und Bewohner Entscheidungen darüber, ob und welche Verkehrsmittel (PKW, Motorrad, Fahrrad etc.) sie anschaffen oder leihen (»sharen«) und welchen Antrieb (Benzin, Diesel, Gas, Hybrid, Elektro etc.) dieses Fahrzeug hat. Dies hat einen unmittelbaren Einfluss auf den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen. Zum Teil verwenden die Bewohnerinnen und Bewohner auch weitere Mobilitätsinstrumente (z. B. Halbtaxabo, Vorteilscard, Bahncard). All dies beeinflusst die Verkehrsmittelwahl (Modalsplit), die wiederum in engem Zusammenhang mit dem individuellen Energieverbrauch und CO₂-Fußabdruck steht.

Ferner sind die Bewohnerinnen und Bewohner Verbraucher von stationärer Energie (Strom, Wärme und ggf. Kälte) und beeinflussen

somit die Energienachfrage. Durch die Wahl des Stromanbieters nehmen sie Einfluss auf den Stromproduktionsmix. Immobilienbesitzer treffen außerdem Entscheidungen über Heizsysteme in ihren Gebäuden.

Die Bewohnerinnen und Bewohner der Bodenseeregion agieren zunehmend auch als Erzeuger von erneuerbarer Energie. Im Rahmen des BAER-Projektes wurde in der Bodenseeregion eine Online-Umfrage zur Einstellung der Bewohnerinnen bezüglich Erneuerbarer Energien durchgeführt. Die Umfrage ergab ein großes Marktpotenzial für die individuelle Nutzung erneuerbarer Energietechnologie. Die Befragten waren vor allem gegenüber photovoltaischen und solarthermischen Systemen positiv eingestellt (Chassot & Wüstenhagen, 2014). Diese sind in der Region bereits weit verbreitet.

Schließlich agieren die Bewohnerinnen und Bewohner auch im politischen Entscheidungsprozess. Sie beteiligen sich an Wahlen und Abstimmungen und nehmen als Betroffene in Planungsverfahren zu Raumentwicklungs-, Verkehrs- und Energieprojekten Stellung.

Regionale Unternehmen:

Die Standortentscheidungen der regionalen Unternehmen setzen den Rahmen für die Entscheidungen der Bewohnerinnen und Bewohner bezüglich ihres Arbeitsplatzes. Dementsprechend haben die Standortentscheidungen einen Einfluss auf die Verkehrsverflechtungen in der Region und damit auch auf den verkehrsbezogenen Energieverbrauch und die verkehrsbezogenen Treibhausgasemissionen.

Einige der regionalen Unternehmen nehmen aktiv Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl ihrer Mitarbeiter, indem sie betriebliches Mobilitätsmanagement betreiben. Insbesondere im Fürstentum Liechtenstein gibt es einige positive Beispiele, etwa das betriebliche Mobilitätsmanagement der Liechtensteinischen Landesbank und der Liechtensteinischen Landesverwaltung. Ziel des betrieblichen Mobilitätsmanagements ist es, unnötige PKW-Fahrten zur Arbeit zu vermeiden, indem Anreize zur Bildung von Fahrgemeinschaften und zur Nutzung des Langsamverkehrs und der Öffentlichen Verkehrsmittel gesetzt werden.

Die Unternehmen in der Region sind Betreiber großer PKW-Flotten. Welche Fahrzeuge die Unternehmen künftig anschaffen werden, hat dementsprechend einen erheblichen Einfluss auf die Zusammensetzung

des PKW-Bestands und damit auf den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen.

Unternehmen sind außerdem große Verbraucher und zum Teil auch regionale Energieerzeuger. Daher können sie Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz in eigener Regie umsetzen und so den regionalen Energieverbrauch senken. Ferner können Unternehmen neue Produkte und Dienstleistungen für die Mobilitäts- und Energiewende entwickeln und dadurch die regionale Wertschöpfung erhöhen.

Gebietskörperschaften:

Die Bundesländer, Kantone, Landkreise, Städte und Gemeinden gestalten in unterschiedlichem Maße Siedlungsentwicklung, Mobilität, Energieerzeugung und Nutzung in der Bodenseeregion.

Den größten Gestaltungsspielraum hat das Fürstentum Liechtenstein. Es gehört vollständig zur Bodenseeregion, ist aber gleichzeitig ein souveräner Staat, der Gesetze erlassen und Steuern erheben kann. Allerdings ist Liechtenstein aufgrund seiner geringen Größe eng mit den übrigen Bodensee-Teilregionen verknüpft; so bestehen etwa starke Pendlerverflechtungen. Auch bei der Energieversorgung ist Liechtenstein nicht autonom, sondern auf Energieimporte angewiesen (Droege et al., 2013).

Die Landes- und Kantonalbehörden in der Bodenseeregion beeinflussen auf mehreren Ebenen die zukünftige Energieversorgung und Mobilität in der Bodenseeregion. Zuständig sind sie u. a. für die Planung, den Bau und den Betrieb von Landes- und Kantonalstraßen sowie in national unterschiedlichem Umfang für den regionalen Nahverkehr, für das Bau- und Raumplanungsrecht sowie für regionale Energie- und Klimaschutzpolitik. Einen großen Gestaltungsspielraum haben die schweizerischen Kantone, da sie über weitreichende Gesetzgebungskompetenz verfügen und eigenständig Steuern festsetzen können. Dies ermöglicht es den Kantonen beispielsweise, steuerliche Anreize für die Anschaffung von Elektrofahrzeugen anzubieten, was deutschen und österreichischen Bundesländern verwehrt ist. Die deutschen Bundesländer Baden-Württemberg und Bayern verfügen ebenfalls über einen relativ großen Entscheidungsspielraum. Der größte Teil ihrer Landesgebiete liegt jedoch außerhalb der Bodenseeregion, sodass sie zwar wichtige regionale Akteure sind, in ihrem Handeln jedoch sowohl die Bedürfnisse und

Problemlagen der Bodenseeregion als auch die der anderen Landesteile berücksichtigen müssen. Das österreichische Bundesland Vorarlberg gehört vollständig zur Bodenseeregion. Seine Kompetenzen und Zuständigkeiten unterscheiden sich aufgrund anderer verfassungsrechtlicher Rahmenbedingungen von denen der schweizerischen Kantone und der deutschen Bundesländer. Tabelle 26 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Zuständigkeiten der Landes- und Kantonalbehörden in der Bodenseeregion.

Bei den Landkreisen handelt es sich um eine Ebene der kommunalen Selbstverwaltung, die es in dieser Form nur in Deutschland gibt. Sie sind für den nicht schienengebundenen Öffentlichen Nahverkehr sowie den Bau- und Unterhalt von Kreisstraßen zuständig und fungieren als Baugenehmigungs- und Straßenverkehrsbehörde. Darüber hinaus sind Landkreise an verschiedenen regionalen Institutionen wie Energieagenturen, Verkehrsverbänden und regionalen Planungsverbänden beteiligt. Kreisfreie Städte sind Städte, die keinem Landkreis angehören und die die Kompetenzen einer Stadt bzw. Gemeinde mit denen eines Landkreises verbinden. Die Zuständigkeiten von Landkreisen und kreisfreien Städten werden in Tabelle 27 umrissen.

Tabelle 26: Zuständigkeiten der Landes- und Kantonalbehörden in der Bodenseeregion

	Deutschland	Österreich	Schweiz
Steuerrecht	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Keine für diese Arbeit relevante Zuständigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Keine für diese Arbeit relevante Zuständigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Gesetzgebung im Bereich der Besteuerung von Motorfahrzeugen
Straßenverkehr	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Anmeldung von Vorhaben für die Bundesverkehrswegeplanung ▶ Planung, Bau und Unterhalt von Landes- und Staatsstraßen ▶ Gesetzgebung im Bereich des Straßen- und Wegenetzes 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Planung, Bau und Unterhalt von Landesstraßen (alle übergeordneten Straßen mit Ausnahme von Autobahnen und Schnellstraßen) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Gesetzgebung im Bereich des Straßen- und Wegerechts ▶ Planung, Bau und Unterhalt der Kantonsstraßen
Öffentlicher Nahverkehr	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Anmeldung von Vorhaben für die Bundesverkehrswegeplanung ▶ Aufgabenträger für den schienengebundenen öffentlichen Nahverkehr; Bestellung und Kontrolle von Leistungen des schienengebundenen öffentlichen Nahverkehrs ▶ Beitrag zu Finanzierung von Projekten gemäß Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz (GVFG) ▶ Teilweise ergänzende Finanzierung für Maßnahmen des Schienenpersonenverkehrs, wenn Finanzmittel des Bundes nicht ausreichen ▶ Anmeldung von Aus- und Neubauprojekten für den Schienenpersonennahverkehr gemäß Anlage 8.7 der Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung zwischen dem Bund und der Deutschen Bahn AG (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2014) ▶ Bereitstellung von Fördermitteln für Bahnhofsurnfeldgestaltungen 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Planung und Finanzierung des öffentlichen Nahverkehrs (Finanzierung durch Verkehrsdienstverträge) ▶ Die Verkehrsverbünde sind in der Regel auf Bundesländerebene organisiert. 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Angebotskonzepte für den öffentlichen Nahverkehr (Kanton Thurgau, 2020). ▶ Bestellung des S-Bahn- und Busverkehrs (Kanton Thurgau, 2020). ▶ Bei besonderem kantonalem Interesse: Bestellung von Leistungen im Personennahverkehr (IC- und IR-Züge), im Schienengüterverkehr und im touristischen Verkehr (Kurschiffahrt) (Kanton Thurgau, 2020) ▶ Finanzierung des Ausbaus der Bahn- und Businfrastruktur, soweit die Kosten nicht vom Bund oder von den Gemeinden getragen werden (Kanton Thurgau, 2020) ▶ Bei besonderem kantonalem Interesse: Gewährung von Zuschüssen für den Schienengüterverkehr und den touristischen Verkehr (z.B. Schiffsanlegestellen) (Kanton Thurgau, 2020). ▶ Gewährung von Zuschüssen für Ortsverkehre (Kanton Thurgau, 2020)

	Deutschland	Österreich	Schweiz
Elektromobilität	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Förderprogramme für Ladeinfrastruktur von Elektrofahrzeugen (Bayern Innovativ GmbH, 2020) ▶ Förderung von Forschungsaktivitäten im Bereich Elektromobilität 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Kaufpreiszuschüsse in einigen Bundesländern (www.electroautor.com, 2015) ▶ Förderung von Ladeinfrastruktur (Land Vorarlberg, 2020) ▶ Förderung von E-Car-Sharing ▶ Initiierung von Modellregionen 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Im Rahmen der kantonalen Motorfahrzeugsteuer können steuerliche Vergünstigungen eingeführt werden (Ernst Basler und Partner AG, 2015). ▶ Möglichkeit der direkten Subventionierung (Zuschuss zum Kaufpreis), Beispiel: Tessin (Ernst Basler und Partner AG, 2015) ▶ Einsatz von Elektrofahrzeugen in der Verwaltung (Ernst Basler und Partner AG, 2015) ▶ Unterstützung der Planung der Ladeinfrastruktur (Ernst Basler und Partner AG, 2015) ▶ Normen, Vorschriften und Empfehlungen im Baubereich (Ernst Basler und Partner AG, 2015) ▶ Förderung E-Carsharing (Ernst Basler und Partner AG, 2015) ▶ Information und Beratung (Ernst Basler und Partner AG, 2015) ▶ Möglichkeit der Durchführung von Demonstrationsvorhaben (Ernst Basler und Partner AG, 2015)
Energie	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Bereitstellung von verschiedenen energierelevanten Förderrichtlinien ▶ Entwicklung von strategischen Leitlinien ▶ Mitwirkung an der „Task Force Netzausbau“ der Bundesregierung ▶ Beteiligungen an Energieversorgern 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Erarbeitung und Beschluss von energiepolitischen Programmen ▶ Ergänzende Förderprogramme für Energieinfrastruktur ▶ Beteiligung an Energieversorgern und Netzbetreibern 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Gesetzgebungskompetenz im Bereich Energienutzung ▶ Förderungen von Maßnahmen im Bereich Energieinfrastruktur und Gebäudesanierung ▶ Finanzierung von Energieaggregatoren ▶ Beteiligungen an Energieversorgern

	Deutschland	Österreich	Schweiz
Raumplanung	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Gesetzgebungskompetenz im Bauordnungsrecht und im Bereich Landesplanung ▶ Erarbeitung und Beschluss des Landesentwicklungsprogramms ▶ Genehmigung der Regionalpläne ▶ Bereitstellung von Fördermitteln im Bereich der Städtebauförderung 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Gesetzgebungskompetenz im Bereich Raumplanung und Bauordnung ▶ Erarbeitung und Beschluss von Landesraumplänen ▶ Erarbeitung von raumplanerischen Konzepten auf Landesebene ▶ Zuständigkeit für die Vergabe von Strukturfondsmitteln ▶ Zuständigkeiten im Bereich der Wohnbauförderung ▶ Gewährung von Zuschüssen für Konzepte zur Gemeindeentwicklung 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Gesetzgebungskompetenz im Bereich Planungs- und Baurecht ▶ Erarbeitung und Beschluss kantonaler Richtpläne ▶ Teilnahme an Agglomerationsprogrammen ▶ Entwicklung von Umsetzungsprogrammen im Rahmen der neuen Regionalpolitik ▶ Teilweise Förderung von Umsetzungsprojekten im Rahmen von Umsetzungsprojekten

Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 27: Zuständigkeiten der Landkreise und kreisfreien Städte in der Bodenseeregion

Deutschland	
Straßenverkehr	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Planung, Bau und Unterhalt von Kreisstraßen ▶ Planung, Bau und Unterhalt von übergeordneten Radwegen ▶ Zulassungsbehörde für Straßenfahrzeuge ▶ Straßenverkehrsbehörde (Genehmigungsbehörde für straßenverkehrsrechtliche Genehmigungen und Anordnungen)
Öffentlicher Nahverkehr	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Aufgabenträger für den sonstigen, nicht schienengebundenen Öffentlichen Personennahverkehr ▶ Erarbeitung von Nahverkehrsplänen ▶ Beteiligung an Verkehrsverbänden
Elektromobilität	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Zulassungsbehörde für Straßenverkehrsfahrzeuge ▶ Elektrofahrzeuge können für den eigenen Fuhrpark angeschafft werden.
Energie	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Erarbeitung von Energie- und Klimaschutzkonzepten (z. B. im Bodenseekreis) ▶ Finanzierung von Energieagenturen ▶ Teilweise Beteiligung an Energieversorgern und Netzbetreibern
Raumplanung	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Baugenehmigungsbehörde ▶ Mitwirkung an der Regionalplanung im Rahmen kommunaler Planungsgemeinschaften ▶ Untere Denkmalschutzbehörde

Quelle: Eigene Darstellung.

Die Städte und Gemeinden spielen in allen Ländern der Bodenseeregion eine wichtige Rolle bei der Umsetzung der Energie- und Mobilitätswende. Sie sind u. a. Trägerinnen der Planungshoheit, errichten Ladestationen für Elektrofahrzeuge und können durch Vorgaben in Planungs- und in Vergabeverfahren den Einsatz von erneuerbarer Energietechnologie und von Fahrzeugen mit alternativen Antriebsarten fördern. Ihre für diese Arbeit relevanten Zuständigkeiten werden in Tabelle 28 aufgelistet.

Tabelle 28: Zuständigkeiten der Städte und Gemeinden in der Bodenseeregion

	Deutschland	Österreich	Schweiz	Liechtenstein
Straßenverkehr	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Erarbeitung und Beschluss von Verkehrskonzepten ▶ Planung, Bau und Unterhalt von Gemeindestraßen ▶ Örtliche Verkehrsregelung ▶ Ggf. Erlass von Stellplatzsatzungen 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Erarbeitung und Beschluss von Verkehrskonzepten ▶ Planung, Bau und Unterhalt von Gemeindestraßen ▶ Örtliche Verkehrsregelung ▶ Ggf. Erlass von Stellplatzsatzungen 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Erarbeitung und Beschluss von Verkehrskonzepten ▶ Planung, Bau und Unterhalt von Gemeindestraßen ▶ Örtliche Verkehrsregelung ▶ Örtliche Stellplatzvorschriften 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Erarbeitung und Beschluss von Verkehrskonzepten ▶ Planung, Bau und Unterhalt von Gemeindestraßen ▶ Örtliche Verkehrsregelung ▶ Ggf. Erlass von Stellplatzverordnungen
Öffentlicher Nahverkehr	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Gestaltung von Bahnhofsumfeldern (z. B. P+R, B+R, Taxistände, Busbahnhöfe) ▶ Zum Teil Betrieb von Buslinien, wenn Landkreise und kreisfreie Städte ihre Kompetenzen abtreten (Beispiel Stadibus Lindau) ▶ Teilweise befinden sich die Betreiber im kommunalen Besitz. 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Zum Teil Beteiligung an den Kosten des Öffentlichen Verkehrs ▶ Teilweise befinden sich die Betreiber im kommunalen Besitz 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Finanzierung und Bestellung des Ortsverkehrs ▶ Die Kommunen sind teilweise an den Betreibern beteiligt (Beispiel Bus Ostschweiz AG) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Keine unmittelbare Zuständigkeit

	Deutschland	Österreich	Schweiz	Liechtenstein
Elektromobilität	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Integration in übergeordnete Konzepte (Deutsches Institut für Urbanistik [DIFU], 2015) ▶ Entwicklung spezieller Konzepte zur Förderung von Elektromobilität (Deutsches Institut für Urbanistik [DIFU], 2015) ▶ Umsetzung im Ortsrecht (Deutsches Institut für Urbanistik [DIFU], 2015) ▶ Kooperationen und Verträge (Deutsches Institut für Urbanistik [DIFU], 2015) ▶ Beschaffung von Fahrzeugen (Deutsches Institut für Urbanistik [DIFU], 2015) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Integration in übergeordnete Konzepte (Austriatech GmbH, 2013) ▶ Entwicklung spezieller Konzepte zur Förderung von Elektromobilität (Austriatech GmbH, 2013) ▶ Umsetzung im Ortsrecht (Austriatech GmbH, 2013) ▶ Kooperationen und Verträge (Austriatech GmbH, 2013) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Möglichkeit direkter Kaufsubventionen (Ernst Basler und Partner AG, 2015) ▶ Möglichkeit differenzierter Parkgebühren (Ernst Basler und Partner AG, 2015) ▶ Einsatz von Elektrofahzeugen in der öffentlichen Verwaltung (Ernst Basler und Partner AG, 2015) ▶ Standortplanung für Ladeinfrastrukturen (Ernst Basler und Partner AG, 2015) ▶ Finanzierung von Schnellladestationen (Ernst Basler und Partner AG, 2015) ▶ Information und Beratung (Ernst Basler und Partner AG, 2015) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Derzeit keine Aktivitäten bekannt
Raumplanung	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Die Gemeinden sind Träger der Planungshoheit. Sie führen formelle wie informelle städtebauliche Planungen durch. ▶ Formelle Planung: Aufstellung von Flächennutzungs- und Bebauungsplänen ▶ Informelle Planungen: Durchführung von städtebaulichen Wettbewerben, Vergabe von Rahmenplanungen, Bebauungsstudien etc. 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Erarbeitung und Beschluss von Energiekonzepten ▶ Möglichkeit der Umsetzung im Rahmen städtebaulicher Verträge ▶ Berücksichtigung von Energie- und Klimaschutzkonzepten im Rahmen der öffentlichen Beschaffung ▶ Bau, Betrieb und Unterhalt kommunaler Gebäude 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Träger der örtlichen Raumplanung. ▶ Erlass von Bauordnungen und Gestaltungsrichtlinien ▶ Teilweise Beteiligung an Agglomerationsprogrammen 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Erarbeitung und Beschluss von Enerierichtplänen ▶ Möglichkeit der Umsetzung im Rahmen städtebaulicher Verträge ▶ Berücksichtigung von Energie- und Klimaschutzkonzepten im Rahmen der öffentlichen Beschaffung ▶ Bau, Betrieb und Unterhalt kommunaler Gebäude ▶ Beteiligung am Programm „Energiesstadt“

Quelle: Eigene Darstellung.

Verkehrsverbände:

In der Bodenseeregion gibt es mehrere Verkehrsverbände. Auf der deutschen Seite handelt es sich um die Bodensee-Oberschwaben Verkehrsverbund GmbH (bodo), welcher der Bodenseekreis sowie die Kreise Ravensburg und Lindau angehören, den Verkehrsverbund Hegau-Bodensee mit dem Landkreis Konstanz, den Verkehrsverbund Neckar-Alb-Donau (Naldo), zu dem der Landkreis Sigmaringen gehört, sowie die Mobilitätsgesellschaft für den Nahverkehr im Allgäu (mona), zu der die Stadt Kempten sowie der Landkreis Oberallgäu gehören. Alle schweizerischen Kantone, die Gegenstand dieser Untersuchung sind, wie auch das Fürstentum Liechtenstein gehören dem Tarifverbund Ostwind an. In Österreich sind die Verkehrsverbände auf Länderebene organisiert. Die österreichischen Verkehrsunternehmen in der Bodenseeregion gehören daher alle dem Verkehrsverbund Vorarlberg an.

Die Verkehrsverbände haben eine wichtige Rolle bei der Koordination des Öffentlichen Nahverkehrs in der Region. Sie stellen sicher, dass die Planung und der Betrieb von Nahverkehrslinien kreis- bzw. kantonsübergreifend erfolgt und dass einheitliche Tarife in den Verbundgebieten zur Anwendung kommen. Bislang gibt es allerdings keinen grenzüberschreitenden Verkehrsverbund in der Bodenseeregion. Die Abstimmung der Angebotsplanung erfolgt daher nicht systematisch, sondern anlassbezogen zwischen den Verkehrsverbänden. Ebenso wenig besteht ein einheitliches Tarifgebiet. Es existiert lediglich eine grenzüberschreitende Tageskarte für die Bodenseeregion, das BODENSEE TICKET.

Eisenbahnunternehmen:

Hier ist zwischen Eisenbahninfrastruktur- und Eisenbahnbetriebsunternehmen zu unterscheiden.

Eisenbahninfrastrukturunternehmen³ sind als Betreiber der Schienenwege für den Bau, Betrieb, den Unterhalt, die Instandsetzung und die Erneuerung der Eisenbahnanlagen einschließlich Verkehrsmanagement, Zugsteuerung, Zugsicherung und Signalgebung zuständig. Außerdem

3 Der Begriff wird in Deutschland und in Österreich verwendet. In der Schweiz werden diese Organisationen Infrastrukturbetreiber genannt.

fallen Bahnstromleitungen und alle sonstigen Betriebsanlagen in ihre Zuständigkeit (AEG, 2019). Eisenbahninfrastrukturunternehmen spielen eine wichtige Rolle im Aus- und Neubau sowie in der Elektrifizierung oder der Schaffung anderer Infrastrukturen für den Betrieb mit alternativen Antrieben (z. B. Wasserstofftankstellen oder Ladestationen für Akku-Betrieb). Die wichtigsten Eisenbahninfrastrukturunternehmen in der deutschen Teilregion sind zum einen die Deutsche-Bahn-Töchter DB Netz AG, DB Station & Service AG und DB Energie GmbH und zum anderen die SWEG Schienenwege GmbH, die das Netz der ehemaligen Hohenzollerischen Landesbahn betreibt. In der österreichischen Teilregion zählen dazu die ÖBB-Infrastruktur AG und die Montafonerbahn AG und in der schweizerischen Teilregion die SBB Infrastruktur AG sowie die Appenzeller Bahnen AG.

Eisenbahnverkehrsunternehmen sind alle Eisenbahnen, deren Tätigkeit im Erbringen von Eisenbahnverkehrsdiensten zur Beförderung von Gütern oder Personen besteht (AEG, 08.07.2019). Sie sind entweder eigenwirtschaftlich (vor allem im Personenfern- und im Güterverkehr) oder im Auftrag tätig. Letzteres trifft insbesondere auf den Schienenpersonennahverkehr zu, der im Auftrag der Länder und Kantone erbracht wird. Eisenbahnverkehrsunternehmen sind wichtige Partner für die Anschaffung energieeffizienter und fahrgastfreundlicher Schienenfahrzeuge. Hierzu können die Länder und Kantone bei der Vergabe von Nahverkehrsleistungen Vorgaben machen. Die wichtigsten Eisenbahnverkehrsunternehmen in der schweizerischen Teilregion sind die SBB Personenverkehr AG und die SBB Cargo AG, die Thurbo AG, die Schweizerische Südostbahn AG sowie die Appenzeller Bahnen AG. In der österreichischen Teilregion zählen dazu die Montafonerbahn AG, die ÖBB Personenverkehrs AG und die Rail Cargo Austria AG, wobei die beiden letztgenannten Unternehmen auch in Liechtenstein tätig sind. In der deutschen Teilregion aktiv sind u. a. die DB-Töchter DB Fernverkehr AG, DB Regio AG und DB Cargo Deutschland AG sowie die Länderbahn GmbH und die Hohenzollerische Landesbahn AG. Aufgrund des europarechtlich geregelten freien Netzzugangs zum Schienennetz sind gelegentlich auch andere Eisenbahnverkehrsunternehmen in der Bodenseeregion tätig. Dies gilt insbesondere für den Güterverkehr.

Car-Sharing-Anbieter:

Car-Sharing hat das Potenzial, den Gesamtfahrzeugbestand in einer Region zu verringern und das Verkehrsverhalten der Bewohnerinnen und Bewohner zu verändern. Car-Sharing kann den regionalen ÖPNV sinnvoll ergänzen und so den Umweltverbund stärken (Parzinger et al., 2016, S. 9)

Im deutschen Teil der Bodenseeregion gibt es mehrere kleinere Anbieter und vier Unternehmen, die im Bereich Car-Sharing tätig sind. Die Anbieter sind teilweise dem Car-Sharing-Netzwerk Flinkster der Deutschen Bahn angeschlossen. Im schweizerischen und liechtensteinischen Teil ist das Car-Sharing-Netzwerk Mobility.ch der schweizerischen Bundesbahnen vertreten (Bodenseemobil e.V., 2017). In Vorarlberg ist der genossenschaftlich organisierte Anbieter Caruso Carsharing aktiv und bietet auch eine Versorgung in diversen Gemeinden im ländlichen Raum. Caruso-Fahrzeuge können in ganz Vorarlberg gebucht und gefahren werden. Caruso bietet neben öffentlichem stationsgebundenem Carsharing auch Systeme für geschlossene Nutzergruppen wie Unternehmen oder Mietergemeinschaften an (Caruso Carsharing eGen, 2017).

Car-Sharing-Fahrzeuge haben in der Regel eine höhere Jahresfahrleistung als private PKW. Daher sind elektrische Antriebe im Bereich des Car-Sharings tendenziell wirtschaftlicher als im privaten Bereich (Parzinger et al., 2016 S. 12). Viele Kommunen unterstützen daher die Einführung von E-Car-Sharing. Dadurch sollen Erfahrungen mit Elektromobilität gesammelt und Vorbehalte gegenüber der neuen Technologie abgebaut werden. Regional erzeugte erneuerbare Energien sollen verstärkt genutzt und lokale Emissionen reduziert werden (Parzinger et al., 2016, S. 9).

Von 2012 bis 2016 wurde im Bodenseekreis das Demonstrationsprojekt »E-Mobilität mit Anschluss« (EMMA) durchgeführt. Ziel war es, die Verkehrsverhältnisse im Landkreis durch innovative und elektrisch betriebene Mobilitätsformen zu verbessern. Im Rahmen des Projekts wurde u. a. ein E-Car-Sharing-System für den Landkreis etabliert. Das E-Car-Sharing wird auch nach dem Ende des Projekts weitergeführt (Netzwerk Oberschwaben GmbH, 2017). Auch die Anbieter Mobility.ch und CARUSO setzen in der Bodenseeregion einzelne Elektrofahrzeuge ein (Mobility Genossenschaft, 2017; Caruso Carsharing eGen, 2017). Der

größte Teil der Fahrzeugflotte verfügt nach wie vor über konventionelle Antriebe.

Energieversorger und Energienetzbetreiber:

Energieversorger sind ein wichtiger Partner beim Aufbau der Landeinfrastruktur für Elektromobilität (Austriatech GmbH, 2013, S. 19).

Die Vorarlberger Kraftwerke VKW engagieren sich bereits seit dem Jahr 2008 für Elektromobilität. In diesem Jahr wurde in Vorarlberg die erste österreichische Modellregion für Elektromobilität gestartet. Seitdem betreiben die VKW unter der Bezeichnung VKW Vlotte die Ladeinfrastruktur im westlichsten österreichischen Bundesland. Die Fahrzeuge werden mit CO₂-neutralem Ökostrom aus regionalen Quellen geladen. Für Kunden, die ihr Fahrzeug an einer Ladestation der VKW laden wollen, werden mehrere Tarifmodelle angeboten. Die VKW betreiben außerdem Gastankstellen für CNG-Fahrzeuge. Abgegeben wird Erdgas, dem bis zu 20 % regional erzeugtes Biogas beigemischt ist (VKW Mobilität, 2017).

Die Liechtensteinischen Kraftwerke (LKW) betreiben derzeit (2020) elf öffentliche Ladestationen im Fürstentum (Liechtensteinische Kraftwerke, 2020).

Im deutschen Teil der Bodenseeregion werden die meisten öffentlichen Ladestationen von regionalen Energieversorgern errichtet und unterhalten. Hierzu zählen das Stadtwerk am See, die Stadtwerke Konstanz, die Technischen Werke Schussental, das Allgäuer Überlandwerk und die Stadtwerke Lindau. Außerdem sind überregionale Anbieter wie die EnBW, die RWE-Tochter Innogy, Tesla Destination sowie die österreichische Firma has.to.be vertreten. Auch die Vorarlberger Kraftwerke betreiben einige Ladestationen im grenznahen Allgäu (Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie & Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst, 2020)

Auch im schweizerischen Teil der Bodenseeregion gehören die Ladestationen unterschiedlichen Anbietern. Unter den größten Anbietern sind Swisscharge.ch und evpass (Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie & Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst, 2020).

Internationale Bodenseekonferenz (IBK):

Die Internationale Bodenseekonferenz (IBK) ist eine Kooperationsplattform, der die in der Bodenseeregion gelegenen Länder und Kantone Baden-Württemberg, Bayern, Schaffhausen, Zürich, Thurgau, St. Gallen, Appenzell-Ausserrhoden, Appenzell-Innerrhoden und Vorarlberg sowie das Fürstentum Liechtenstein angehören. Ziel der Kooperation ist es, »[...] die Bodenseeregion als attraktiven Lebens-, Natur-, Kultur- und Wirtschaftsraum zu fördern und die regionale Zusammengehörigkeit zu stärken« (Internationale Bodenseekonferenz [IBK], 2010). Die strategischen Schwerpunkte der Zusammenarbeit sind im Leitbild der IBK beschrieben, das im Dezember 2017 von den Regierungschefs der beteiligten Länder und Kantonen beschlossen wurde (Internationale Bodenseekonferenz [IBK], 2017). Die strategischen Schwerpunkte wie auch die Leitsätze der IBK sind in Abbildung 92 dargestellt.

Die folgenden Zitate aus dem Leitbild der IBK (Internationale Bodenseekonferenz [IBK], 2017) beschreiben das Selbstverständnis und die Aufgaben der IBK wieder und geben Hinweise darauf, dass die IBK in einer energieautonomen Bodenseeregion eine wichtige Rolle spielen könnte.

»Die IBK leistet einen Beitrag zur optimierten Vernetzung der regionalen Wissenschafts- und Innovationssysteme sowie Cluster, um so die Innovationskraft der Bodenseeregion zu stärken und die Potenziale der Digitalisierung zu nutzen« (Internationale Bodenseekonferenz [IBK], 2017, S. 7).

Bei der genannten Vernetzung handelt es sich um einen Zusammenschluss von Fachhochschulen und Universitäten in der Region. Die IBK unterstützt den fachlichen Austausch zwischen den Mitgliedshochschulen und finanziert außerdem gemeinsame Projekte. Dementsprechend agiert die IBK auch als Fördermittelgeber für regionale Forschungsprojekte.

»Die IBK entwickelt gemeinsame Zielvorstellungen für Raum und Verkehr, welche die unterschiedlichen Perspektiven von Raum- und Siedlungsentwicklung, Natur-, Landschafts- und Gewässerschutz sowie Wirtschaft integrativ vernetzen« (Internationale Bodenseekonferenz [IBK], 2017, S. 8).

Somit bekennt sich die IBK zum Ziel einer grenzüberschreitend abgestimmten Raumentwicklung und arbeitet eng mit der Internationalen Raumordnungskommission Bodensee zusammen.

Abbildung 92: Leitsätze und strategische Schwerpunkte der Internationalen Bodenseekonferenz (IBK)



Quelle: Internationale Bodenseekonferenz [IBK], 2017.

Der Internationalen Raumordnungskommission gehören die Leiter der Regionalen Raumplanungsbehörden an (Regionale Planungsverbände bzw. Regionalverbände [D], kantonale Ämter für Raumentwicklung [CH], Amt der Vorarlberger Landesregierung, Abteilung für Raumplanung und Bauerecht [A] bzw. Amt für Bau und Infrastruktur [FL]) (Internationale Raumordnungskommission Bodensee, [ROK Bodensee], 2000). Durch die grenzüberschreitende Zusammenarbeit sollen eine gemeinsame Raumbesichtigung aufgebaut und ein gemeinsamer Datenpool angelegt werden, insbesondere sollen

- ▶ Standards in der Raumordnung angeglichen werden,
- ▶ die Entwicklung der Kulturlandschaft am Bodensee auf gemeinsame Ziele ausgerichtet werden,
- ▶ regional raumbedeutsame Vorhaben besser aufeinander abgestimmt werden,
- ▶ die Nutzung regional bedeutsamer Rohstoffe besser koordiniert werden,
- ▶ geplante bzw. auszubauende Verkehrsinfrastrukturen besser in die Raumordnung eingebunden werden und

- Themen für Interreg-Projekt entwickelt und die von Interreg-Projekten bearbeiteten räumlichen Fragestellungen nach dem jeweiligen Projektabschluss weiterverfolgt werden.

Die IBK und die Internationale Raumordnungskommission Bodensee unterstützen u. a. das Interreg-IV-Projekt DACH+ zur Raumbearbeitung und Raumentwicklung im Grenzraum zwischen Österreich, der Schweiz, Deutschland und Liechtenstein. Wichtigster Bestandteil des Projekts war der Aufbau eines Geodatenportals für die grenzüberschreitende Raumbearbeitung. Außerdem wurden Herausforderungen für die Raumentwicklung beschrieben und Best-Practice-Beispiele für eine nachhaltige Raumentwicklung in der Bodenseeregion gesammelt und analysiert (Regionalverband Hochrhein-Bodensee, 2017)

»Die IBK arbeitet an Verbesserungen der Rahmenbedingungen für die Entwicklung der Bodenseeregion, insbesondere bei der überregionalen und innerregionalen Verkehrsanbindung (Schiene, Straße, Wasser, Luft), indem Planungen und Initiativen grenzüberschreitend abgestimmt werden« (Internationale Bodenseekonferenz [IBK], 2017, S. 8).

Die IBK unterhält eine Kommission Verkehr, die sich regelmäßig trifft und der grenzüberschreitenden Abstimmung der Verkehrsplanung dient. Ferner ist der Koordinierungsausschuss für das grenzüberschreitende BODENSEE TICKET bei der IBK angesiedelt. Er dient der gemeinsamen Planung und Entscheidungsfindung. Dem Ausschuss gehören Vertreter der Länder und Kantone sowie der beteiligten Transportunternehmen an (Internationale Bodenseekonferenz [IBK], 2020b)

»Die IBK entwickelt ihre Strategie Klimaschutz und Energie im Sinne des 2015 beschlossenen Pariser Klimaabkommens mit den zentralen Zielen der Treibhausgasreduzierung und Klimaanpassung weiter« (Internationale Bodenseekonferenz [IBK], 2017, S. 9).

Alle Mitgliedsländer und Kantone der IBK haben sich zum Ziel gesetzt, ihre Treibhausgasemissionen zu reduzieren, die Anpassung an den Klimawandel zu gestalten, die Energieeffizienz zu erhöhen, den Ausbau der erneuerbaren Energien zu fördern, eine sichere, bezahlbare und umweltverträgliche Energieversorgung zu gewährleisten sowie Forschung, technologische Entwicklung und Innovation zu stärken. Diese gemeinsamen Ziele bilden die Grundlage für die »Strategie Klimaschutz

und Energie«, die von den Regierungschefs der Länder und Kantone im Jahr 2014 beschlossen wurde ((Internationale Bodenseekonferenz [IBK], 2020a).

Diese Strategie wird von der Plattform Klimaschutz und Energie der IBK umgesetzt, in welche die zuständigen Landes-, Kantonal- und Kommunalbehörden Vertreter entsenden. Die Plattform fördert den Informations- und Erfahrungsaustausch und unterstützt gemeinsame Forschungs- und Pilotprojekte. Hierzu zählen das Interreg-Pilotprojekt »Low-Tech Gebäude«, die Erstellung von Statusberichten, die Organisation von Workshops zur Energiewende mit wechselnden Schwerpunkten (Expertenaustausch Energie 2013, Ladeinfrastruktur E-Mobil 2013, Bürgerbeteiligung 2013, Sanierung 2015, Netze und Speicher 2015), die Organisation von regionalen Klimaschutzkongressen sowie die Auslobung von Förderpreisen in den Bereichen Energie und Nachhaltigkeit (Internationale Bodenseekonferenz [IBK], 2020a).

Zivilgesellschaftliche Akteure:

Neben den staatlichen, kommunalen und privatwirtschaftlichen Akteuren gibt es in der Bodenseeregion auch eine lebendige Zivilgesellschaft. Eine ganze Reihe von Organisationen arbeitet an der Gestaltung des grenzüberschreitenden Lebensraums, an der Energiewende und an nachhaltigeren Verkehrssystemen. Stellvertretend seien an dieser Stelle die Bodenseestiftung, der Internationale Städtebund Bodensee sowie die Verkehrsclubs Liechtensteins, der Schweiz, Österreichs und Deutschlands mit ihren jeweiligen nationalen Unterorganisationen genannt.

9.2 Handlungsempfehlungen

Wie die vorliegende Arbeit zeigt, hat die Bodenseeregion gute Voraussetzungen, sich zu einer grenzüberschreitenden Modellregion für Energieautonomie und klimafreundliche Mobilität zu entwickeln. Um diese Vision Realität werden zu lassen, ist ein Bündel von Maßnahmen erforderlich, die im Folgenden dargestellt werden. Neben der inhaltlichen Beschreibung der Maßnahme werden auch Vorschläge für den Zeitraum gemacht, in dem eine Umsetzung erfolgen sollte, sowie die jeweiligen Zuständigkeiten benannt, wobei folgende Informationen gegeben werden:

- ▶ Durchführungsverantwortung für die Maßnahme

- ▶ Zu beschließen durch (d.h. die politische Verantwortung)
- ▶ Einzubindende Akteure
- ▶ Zu informierende Akteure

Darüber hinaus werden für jede Maßnahme die Zeitschiene sowie der Handlungsspielraum der regionalen Akteure entsprechend folgender Ordinalskala beschrieben.

- 1 – geringer Handlungsspielraum
- 2 – mittelgroßer Handlungsspielraum
- 3 – großer Handlungsspielraum

In der Zusammenschau lassen sich daraus Erkenntnisse zur Entscheidungsautonomie der regionalen Akteure bei der Ausgestaltung und Umsetzung des Energieautonomieziels ableiten.

Handlungsempfehlung 1:

Zielsetzung »Energieautonome Bodenseeregion«

Ausgangspunkt für die Entwicklung einer Modellregion für Energieautonomie muss ein Beschluss sein, mit dem das Ziel der regionalen Energieautonomie verbindlich festgelegt wird. Entsprechende Beschlüsse gibt es auch in anderen Regionen, die das Ziel der Energieautonomie verfolgen. Beispielsweise wurde in Vorarlberg ein entsprechender Landtagsbeschluss gefasst.

Es gibt allerdings keine Gebietskörperschaft »Bodenseeregion« mit Gesetzgebungskompetenz, Satzungs- oder Verordnungsrecht, sondern nur einige grenzüberschreitende Institutionen. Die wichtigste davon ist die in Kapitel 9.1 beschriebene IBK. Dabei handelt es sich um eine Kooperation der Landes- und Kantonalregierungen mit einem gemeinsamen Sekretariat und verschiedenen Arbeitskreisen, u. a. zu den Themen Klimaschutz und Mobilität.

Die Vision einer energieautonomen Bodenseeregion hat nur dann eine Chance auf Realisierung, wenn sie von einer starken und bereits etablierten grenzüberschreitenden Institution getragen wird. Der Beschluss sollte daher naheliegenderweise von der Geschäftsstelle der IBK fachlich

vorbereitet und in die entsprechenden Gremien der IBK zur Beratung eingebracht werden.

Es sollte außerdem rechtlich geprüft werden, ob das Ziel einer energieautonomen grenzüberschreitenden Region in einem Staatsvertrag zwischen den Ländern und Kantonen der Bodenseeregion verbindlich vereinbart werden kann.

Um die Zielsetzung in die Umsetzung zu bringen, müssen von Anfang an alle wichtigen Stakeholder der Region eingebunden werden. Hierzu gehören insbesondere die Städte und Gemeinden der Region, die regionale Wirtschaft, die Hochschulen und Forschungseinrichtungen sowie zivilgesellschaftliche Organisationen. Ferner ist eine umfassende Öffentlichkeitsarbeit erforderlich, um die Bewohnerinnen und Bewohner über die Vision einer energieautonomen Bodenseeregion zu informieren.

Durchführungsverantwortung: Sekretariat der IBK

Zu beschließen durch: Landes- und Kantonalregierungen

Einzubinden: Alle wesentlichen regionalen Akteure
(siehe Akteursanalyse)

Zu informieren: Bewohnerinnen und Bewohner der Bodenseeregion, Fachöffentlichkeit inner- und außerhalb der Region

Zeitraum der Umsetzung: Ab dem Jahr 2021

Entscheidungsspielraum der Region: 3 – großer Entscheidungsspielraum

Handlungsempfehlung 2:

Aufbau einer Organisationsstruktur und Initiierung von Umsetzungsprojekten

Um die Vision einer energieautonomen Bodenseeregion Wirklichkeit werden zu lassen, bedarf es einer effektiven Organisationsstruktur, die gemeinsam mit den regionalen Akteuren Umsetzungsprojekte entwickelt und koordiniert, Fördermittel akquiriert und verwaltet, Beteiligungsprozesse organisiert, kontinuierlich die Zielerreichung beobachtet und die Öffentlichkeit sowie die politischen Entscheidungsträger regelmäßig über die Ergebnisse informiert. Für diese anspruchsvolle Aufgabe sollte eine »Energieautonome Bodenseeregion GmbH« als eigenständige

Gesellschaft nach dem Vorbild der Internationalen Bauausstellungen (z. B. IBA Hamburg GmbH) gegründet werden. Diese Gesellschaft muss von den Ländern und Kantonen sowie ggf. von den Kommunen der Region getragen und mit ausreichenden finanziellen Mitteln ausgestattet werden.

Durchführungsverantwortung: Energieautonome Bodenseeregion GmbH

Zu beschließen durch: Landes- und Kantonalregierungen, größere Kommunen

Einzubinden: Fördermittelgeber (z. B. nationale Forschungsförderungsagenturen, Interreg Alpenrhein-Bodensee-Hochrhein, Internationale Bodenseehochschule, Städtebauförderung, Stiftungen)

Zu informieren: Alle regionalen Akteure, die Umsetzungsprojekte initiieren und durchführen können

Zeitraum der Umsetzung: 2022-2023

Entscheidungsspielraum der Region: 3 – großer Entscheidungsspielraum

Handlungsempfehlung 3:

Aufbau eines grenzüberschreitenden Verkehrsverbundes und Einführung eines grenzüberschreitenden Integrierten Taktfahrplans (ITF)

Eine Schlüsselmaßnahme für einen attraktiveren öffentlichen Nahverkehr in der Region und damit auch für die Reduzierung des Verkehrsenergieverbrauchs ist die Einführung eines grenzüberschreitenden Verkehrsverbunds und eines ITF für Bahn, Bus und andere öffentliche Verkehrsmittel.

Verkehrsverbände werden in Deutschland in der Regel von den Landkreisen und kreisfreien Städten getragen, in Österreich von den Bundesländern und in der Schweiz von den Kantonen. Die Einführung eines grenzüberschreitenden Verkehrsverbundes muss von diesen Trägern beschlossen werden. Die bestehenden Verkehrsverbände würden in dem neuen grenzüberschreitenden Verkehrsverbund aufgehen.

Für die Einführung des ITF sind außerdem umfangreiche Abstimmungen mit den Aufgabenträgern des öffentlichen Personenverkehrs sowie den Betreibern der Schieneninfrastruktur erforderlich.

Bevor der Verkehrsverbund eingerichtet und der ITF realisiert werden kann, sind einige Vorarbeiten erforderlich. Diese umfassen die Entwicklung eines organisatorischen und Finanzierungskonzepts für den Verkehrsverbund sowie eines Fahrplankonzepts für den ITF. Die Initiative für die Entwicklung sollte von der Verkehrskommission der IBK ausgehen.

Durchführungsverantwortung: Verkehrskommission der IBK

Zu beschließen durch: Kantone und Landkreise der Bodensee-region, Land Vorarlberg, Fürstentum Liechtenstein

Einzubinden: Betreiber der Schieneninfrastruktur, Aufgabenträger des Schienenpersonennahverkehrs, Aufgabenträger des sonstigen ÖPNV, Fahrgastverbände

Zu informieren: Bewohnerinnen und Bewohner der Region, Touristen

Zeitraum der Umsetzung: Umsetzung des ITF 2021-2030 und des TEN-Ergänzungskonzepts 2031-2050

Entscheidungsspielraum der Region: 3 – großer Entscheidungsspielraum

Handlungsempfehlung 4:

Ausbau und Elektrifizierung von Bahnstrecken

Um die im Alternativ- und im Zielszenario unterstellte Verkehrsverlagerung zu erreichen, müssen viele Bahnstrecken in der Region ausgebaut werden. Außerdem ist es im Sinne der Energieautonomie erforderlich, die bislang mit Diesel betriebenen Strecken in der deutschen Teilregion bis zum Ende des Betrachtungszeitraums zu elektrifizieren. Bei wenig frequentierten Strecken kommt ggf. auch eine Befahrung mit Akku- oder Wasserstoff-Fahrzeugen in Frage.

Die Verantwortung für den Ausbau der Schieneninfrastruktur liegt in allen DACH+-Staaten bei den nationalen Regierungen und damit (mit Ausnahme des Fürstentums Liechtenstein) nicht bei regionalen

Stakeholdern. Allerdings können die Bundesländer und Kantone beeinflussen, welche Ausbaumaßnahmen auf ihrem Territorium prioritär umgesetzt werden sollen. In Deutschland beteiligen sich die Bundesländer gelegentlich auch an den Kosten der Ausbaumaßnahmen, beispielsweise bei der Elektrifizierung der Württembergischen Südbahn Ulm – Lindau. Zudem haben sie die Möglichkeit, Elektrifizierungsprojekte für eine Umsetzung aus Mitteln der Anlage 8.7 der Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung zwischen dem Bund und der Deutschen Bahn AG anzumelden (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2014). Über die Verwendung dieser Mittel entscheiden die Bundesländer und die Deutsche Bahn AG gemeinsam.

Ein Staatsvertrag, mit dem sich die Bundesländer und Kantone sowie das Fürstentum Liechtenstein auf das gemeinsame Ziel einer energieautonomen Bodenseeregion einigen, wäre ein gewichtiges Argument dafür, die Eisenbahninfrastruktur in der Bodenseeregion prioritär auszubauen. Gleichwohl müssen von der nationalen Ebene ausreichend Mittel bereitgestellt werden, was insbesondere in Deutschland in der Vergangenheit ein Problem darstellte, da dort deutlich weniger in die Eisenbahninfrastruktur investiert wurde als in der Schweiz und in Österreich. Es ist daher zu begrüßen, dass die deutsche Bundesregierung Ende 2019 beschloss, die Investitionen in den Schienenverkehr deutlich zu erhöhen. Ein Teil dieser zusätzlichen Mittel sollte im Rahmen eines Modellprojekts für die Ertüchtigung der Bahninfrastruktur und für die Einführung eines grenzüberschreitenden ITF in der Bodenseeregion eingesetzt werden.

Durchführungsverantwortung: Eisenbahninfrastrukturbetreiber

Zu beschließen durch: Nationale Regierungen

Einzubinden: Bundesländer und Kantone

Zu informieren: Bürgerinnen und Bürger der Region

Zeitschiene: Ab 2023

Entscheidungsspielraum der Region: 1 – geringer Entscheidungsspielraum

Handlungsempfehlung 5:**Begrenzung der Flächeninanspruchnahme, Innenentwicklung, Abstimmung der Entwicklung von Siedlung und Verkehr**

Weite Teile der Region, insbesondere das Alpenrheintal und das Bodenseeufer, sind stark zersiedelt. Eine kompakte,utzungsgemischte und auf die Achsen leistungsfähiger öffentlicher Verkehrsmittel ausgerichtete Siedlungsentwicklung ist erforderlich, um die im Alternativ- und im Zielszenario unterstellte Verkehrsverlagerung auf den Öffentlichen Nahverkehr sowie auf den Rad- und Fußverkehr zu erreichen.

Hierfür kommt ein Bündel unterschiedlicher Maßnahmen in Frage, beispielsweise:

- ▶ Die gezielte Mobilisierung und Widmung von Bauland in fußläufiger Erreichbarkeit von Bahnhöfen und Haltepunkten
- ▶ Anreize für die Innenentwicklung schaffen, Beispiel: Agglomerationsprogramme in der Schweiz, Städtebauförderung in Deutschland
- ▶ Wohnbauförderung auf Standorte mit guter ÖV-Anbindung und guter fußläufiger Infrastruktur begrenzen
- ▶ Reform der Grundsteuer, um Hortung von gewidmetem Bauland zu vermeiden
- ▶ Ggf. Einführung von Flächennutzungszertifikaten, um gewidmetes Bauland handelbar zu machen

Im Bereich der Raumplanung, des Baurechts, der Wohnbauförderung und der Flächennutzung haben die regionalen Akteure einen erheblichen Handlungsspielraum. Die Kantone und Bundesländer der Bodenseeregion verfügen in diesem Bereich über national unterschiedlich definierte, aber in allen Fällen weitreichende gesetzgeberische Kompetenzen. Außerdem können die Länder und Kantone über Fördermittel Anreize für eine kompaktere Siedlungsentwicklung schaffen. Jede Gemeinde in der Bodenseeregion verfügt über Planungshoheit, sodass die Entscheidungen über die Flächennutzung in der Region fallen, allerdings oft unkoordiniert und im Widerspruch zu den Erfordernissen einer energieautonomen Entwicklung. Die Herausforderung liegt also weniger im zu geringen Entscheidungsspielraum der Region als darin, die regionalen Akteure zu einem gemeinsamen, abgestimmten Handeln zu bewegen. Eine bessere grenz- und gemeindeübergreifende Abstimmung

der Siedlungsentwicklung, etwa durch eine gestärkte Raumordnungs-kommission Bodensee, ist daher anzustreben.

Zu beschließen durch: Länder und Kantone im Rahmen ihrer Gesetzgebungskompetenz für Bauwesen und Raumordnung, Kommunen im Rahmen der Flächenwidmungs-, Flächen-nutzungs-, Zonen- und Bebauungsplanung

Einzubinden: Bewohnerinnen und Bewohner der Bodenseeregion, relevante regionale Stakeholder (Träger öffentlicher Belange)

Zeitraum der Umsetzung: Ab sofort (2020)

Entscheidungsspielraum der Region: 2 – mittelgroßer Entscheidungsspielraum

Handlungsempfehlung 6:

Stopp von Straßenbauprojekten, die dem Ziel einer energieautonomen Regionalentwicklung entgegenstehen

Einige Straßenbauprojekte in der Region beruhen auf Verkehrsprognosen, die von einer weiteren Zunahme des Verkehrsaufkommens ausgehen. Wie diese Arbeit zeigt, ist eine Verkehrsverlagerung vom MIV auf Öffentliche Verkehrsmittel und den Fuß- und Radverkehr eine wichtige Voraussetzung für eine energieautonome Regionalentwicklung. Wenn die Bodenseeregion beschließt, eine grenzüberschreitende Modellregion für energieautonome Regionalentwicklung zu werden, dann muss auch die Entwicklung der Verkehrsinfrastruktur in Übereinstimmung mit dieser Zielsetzung erfolgen; d. h., Infrastrukturinvestitionen müssen auf öffentliche Verkehrsmittel, insbesondere auf den Ausbau des Schienennetzes, konzentriert werden. Eine Kapazitätserweiterung des Straßennetzes ist aufgrund der zu erwartenden (und angestrebten) Abnahme der Verkehrsmenge nicht mehr zu rechtfertigen.

Die Kompetenzen für den Ausbau des Straßennetzes sind auf unterschiedlichen Ebenen angesiedelt. Die Zuständigkeit für den Autobahnbau liegt in der Schweiz und in Österreich beim Bund und in Deutschland bei Bund und Ländern. Für überörtliche Straßen liegt die Zuständigkeit in Deutschland entweder bei Bund und Land, ausschließlich beim Land oder beim Landkreis, in Liechtenstein und im österreichischen Vorarlberg bei der Landesregierung und in der Schweiz bei den

Kantonen. Außerdem gibt es in allen Teilregionen Gemeindestraßen. Bei der Planung übergeordneter Straßen werden auch die betroffenen regionalen Gebietskörperschaften eingebunden, und es ist in der heutigen Zeit schwierig oder sogar unmöglich, ein Straßenprojekt gegen den Widerstand der betroffenen Teilregionen und Kommunen durchzusetzen. Dementsprechend ist der regionale Gestaltungsspielraum beim Straßenbau als groß einzuschätzen.

Durchführungsverantwortung: Kantone, Bundesländer, Landkreise und Kommunen, jeweils entsprechend ihren Kompetenzen.

Zu beschließen durch: Siehe oben

Einzubinden: Zivilgesellschaftliche Akteure, die sich für eine Verkehrswende einsetzen

Zu informieren: Bewohnerinnen und Bewohner der Bodenseeregion

Umsetzungszeitraum: Ab 2020

Handlungsspielraum der Region: 3 – großer Entscheidungsspielraum

Handlungsempfehlung 7:

Umstellung des KfZ-Bestands auf alternative Antriebe

Um den Verkehrsenergiebedarf vollständig aus regionalen erneuerbaren Quellen decken zu können, muss der Fahrzeugbestand vollständig auf Antriebe umgestellt werden, die regional erzeugte erneuerbare Energie einsetzen. Im Zielszenario handelt es sich dabei größtenteils um Elektroantriebe. In geringerem Umfang kommen auch Antriebe zum Einsatz, die Wasserstoff, synthetisches Erd- und Flüssiggas sowie Biodiesel einsetzen. Es stellt sich die Frage, wie diese Umstellung der Fahrzeugbestände auf alternative Antriebe erzielt werden kann.

Das Zielszenario zeigt, dass spätestens für das Jahr 2030 ein Zulassungsstopp für Fahrzeuge mit konventionellen Antrieben erlassen werden muss, damit die Fahrzeugbestände bis 2050 vollständig auf erneuerbare Antriebe umgestellt sind.

Die Kompetenz, Richtlinien für die Zulassung von Kraftfahrzeugen zu erlassen, liegt in den Dach+-Staaten bei den nationalen Regierungen und nicht auf der regionalen Ebene. Dementsprechend kann lediglich

Liechtenstein autonom entscheiden, ab welchem Jahr keine Fahrzeuge mit fossilen Antrieben mehr zugelassen werden. Die übrigen Teilregionen sind diesbezüglich von Entscheidungen der nationalen Ebene abhängig.

Es wäre daher wünschenswert, dass Liechtenstein bei der Dekarbonisierung des Fahrzeugbestands vorangeht und möglichst frühzeitig einen Zulassungsstopp für Fahrzeuge mit konventionellen Antrieben beschließt.

Neben dem Fürstentum Liechtenstein haben auch die schweizerischen Kantone Kompetenzen, die es ihnen erlauben, die Zusammensetzung des Fahrzeugbestands zu steuern. Zwar können die Kantone keinen Zulassungsstopp erlassen, aber sie sind weitgehend frei in der Ausgestaltung der Kfz-Besteuerung und können dadurch indirekt auf die Zusammensetzung der Fahrzeugflotte Einfluss nehmen.

Das österreichische Bundesland Vorarlberg und die deutschen Bundesländer Baden-Württemberg und Bayern sowie die deutschen Landkreise haben nur eingeschränkte Möglichkeiten, auf die Zusammensetzung des Fahrzeugbestands Einfluss zu nehmen. Die Landesregierungen können in gewissem Umfang Anreize für die Einführung alternativer Antriebe setzen, etwa durch Landesförderprogramme, Richtlinien für öffentliche Vergaben und baurechtliche Regelungen. Außerdem verfügen sowohl die Bundesländer als auch die Landkreise und Kommunen über eigene Fahrzeugflotten, die auch im Sinne einer Vorbildwirkung rasch auf alternative Antriebe umgestellt werden sollten.

Durchführungsverantwortung: Nationale Regierungen, Kantone, Bundesländer, Landkreise und Kommunen, jeweils entsprechend ihren Kompetenzen

Zu beschließen durch: Siehe oben

Einzubinden: Automobil- und Mobilitätsclubs, Betreiber von Energienetzen und Ladeinfrastrukturen

Zu informieren: Private und gewerbliche Halter von Kraftfahrzeugen, Betreiber von Fahrzeugflotten

Umsetzungszeitraum: Ab 2030

Handlungsspielraum der Region: 1-2 – geringer bis mittelgroßer Entscheidungsspielraum

Handlungsempfehlung 8:**Förderung der regionalen Erzeugung von Antriebsenergie**

Die Energieautonomie der Bodenseeregion ist nur möglich, wenn erneuerbare Antriebsenergie in ausreichender Menge regional erzeugt wird. Hierfür ist es erforderlich, die für die erneuerbare Energieerzeugung benötigten Flächen zu sichern und sie für die ausreichende Erzeugung von erneuerbarer Antriebsenergie bereitzustellen.

Zur Flächensicherung gehören insbesondere die Festlegung von Vorrangflächen für die Erzeugung erneuerbarer Energie und von Anschlussflächen, z. B. für Windkraftanlagen. Dies erfolgt im Rahmen der Landes-, Regional- und Kantonalplanung. Außerdem können ggf. auch auf der Ebene der Ortsplanung Festsetzungen getroffen werden, die die Errichtung von Anlagen für die Erzeugung erneuerbarer Energie ermöglichen oder vorschreiben. Die Flächensicherung liegt somit vollständig in der Entscheidungsgewalt der regionalen Akteure. Der Handlungsspielraum der Region ist somit groß.

Die Marktregulierung und die Ausgestaltung finanzieller Anreize liegen jedoch nur zum Teil im regionalen Gestaltungsspielraum. Die Landes- und Kantonalregierungen können die Errichtung neuer Anlagen bezuschussen. Die finanziellen Mittel, die in den letzten Jahren in den Ausbau der erneuerbaren Energien geflossen sind, wurden jedoch größtenteils von den nationalen Regierungen bereitgestellt, die auch für die Marktregulierung zuständig sind. Außerdem spielen auch europäische Regularien und Förderprogramme eine wichtige Rolle.

Durchführungsverantwortung: Landes- und Kantonalregierungen, Kommunen

Zu beschließen durch: Landes- und Kantonalregierungen, Kommunen

Einzubinden: Energieversorger, Abfallwirtschaftsunternehmen, Landwirtschaft, Netzbetreiber, Betreiber von Ladeinfrastrukturen

Zu informieren: Bewohnerinnen und Bewohner, regionale Unternehmen

Handlungsspielraum der Region: 2 – mittelgroßer Entscheidungsspielraum

Handlungsempfehlung 9:

Aufbau eines Innovations-Ökosystems

Eine grenzüberschreitende Modellregion für energieautonome Regionalentwicklung leistet nicht nur einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz, sondern eröffnet auch große Chancen für das regionale Innovationssystem und die regionale Wirtschaft, insbesondere auch im Bereich der nachhaltigen Mobilität. Ziel muss es sein, in der Modellregion innovative Mobilitätslösungen zu entwickeln, in einer Reallabor-Situation zu testen und sie anschließend zur Marktreife zu bringen. Hierfür ist eine enge Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Akteuren des regionalen Innovationssystems erforderlich. Zu diesen zählen neben den Universitäten und Hochschulen der Region auch die Forschungsabteilungen größerer Unternehmen sowie eine Vielzahl von Startups, die über die ganze Region verteilt sind. Die Koordination der verschiedenen Forschungsaktivitäten könnte über die Internationale Bodenseeuniversität (IBH) erfolgen, einen Verbund verschiedener Forschungseinrichtungen in der Region, der bereits jetzt regelmäßige Research Calls für seine Mitgliedshochschulen veröffentlicht. Im Rahmen der Modellregion könnte die Rolle der IBH deutlich zu der einer regionalen Innovations- und Förderagentur erweitert werden. Die Aufgaben dieser Innovations- und Förderagentur würden darin bestehen, die Aktivitäten der verschiedenen Innovationsakteure effizient zu vernetzen, z. B. durch Forschungs- und Startup-Förderung, Beratung und grenzüberschreitenden Erfahrungsaustausch.

Durchführungsverantwortung: Internationale Bodenseehochschule (IBH)

Zu beschließen durch: Träger der IBH (Internationale Bodenseekonferenz und die dort versammelten Landes- und Kantonalregierungen, Interreg Alpenrhein-Hochrhein-Bodensee)

Einzubinden: Mitgliedshochschulen der IBH, Ämter für Wirtschafts- und Innovationsförderung, Wirtschaftsverbände und Kammern, Fördermittelgeber

Zu informieren: Hochschulen- und Forschungseinrichtungen in der Region, Startups und andere kleine und mittlere Unternehmen, Forschungs- und Innovationsabteilungen größerer Unternehmen.

Zeitraum der Umsetzung: Im Rahmen der dreijährigen Leistungsvereinbarungen der IBH, frühestens ab der Leistungsvereinbarung 2021-2024.

Entscheidungsspielraum der Region: 3 – großer Entscheidungsspielraum

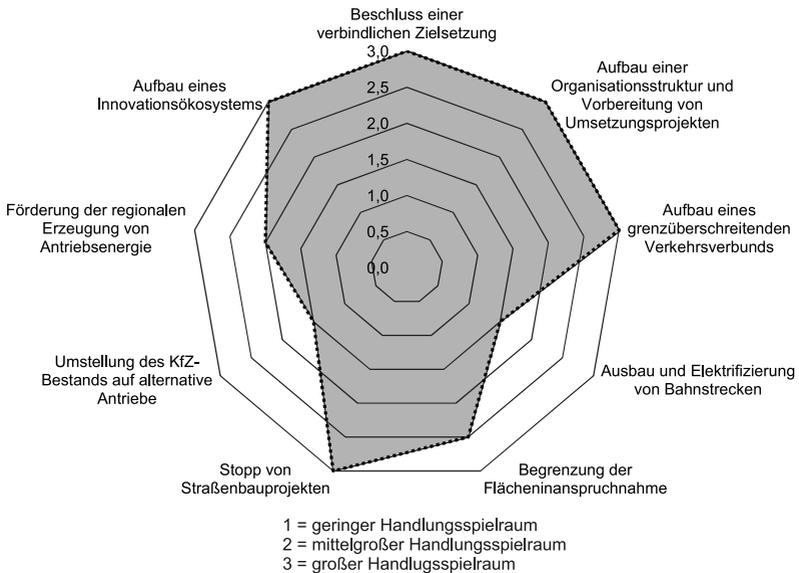
Weitere Handlungsempfehlungen:

Ausbau der erneuerbaren Energieerzeugung und Steigerung der Energieeffizienz

Zu diesen Handlungsfeldern wurde bereits im Rahmen des BAER-Projekts eine Reihe von Empfehlungen erarbeitet, die von Droege (2009) wiedergegeben werden.

Abbildung 93 zeigt den Einfluss der obigen Handlungsempfehlungen 1-9 auf die Erreichung des Autonomieziels der Region unter Berücksichtigung der Handlungsspielräume.

Abbildung 93: Handlungsspielräume der Bodenseeregion bei der Umsetzung der Handlungsempfehlungen



Quelle: Eigene Darstellung.

10 Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick

Die Szenarien haben gezeigt, dass eine vollständige Dekarbonisierung des Personenverkehrs möglich ist, wenn in den nächsten 5 bis spätestens 10 Jahren die dazu notwendigen Rahmenbedingungen in legislativer, fiskalisch-regulatorischer und institutioneller Hinsicht geschaffen werden. Hierzu zählen u. a. eine Erhöhung der Anreize für die Anschaffung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben, ein Zulassungsstopp für Fahrzeuge mit konventionellen Antrieben spätestens im Jahr 2030, die Einführung eines grenzüberschreitenden Integralen Taktverkehrs für den öffentlichen Nahverkehr sowie die vollständige Elektrifizierung aller Bahnstrecken in der Bodenseeregion. Beim Straßengüterverkehr lässt sich die Umstellung der Leichten Straßengüterverkehrsfahrzeuge auf erneuerbare Antriebe bei entsprechender Rahmensetzung verhältnismäßig schnell realisieren. Dagegen erfordert die Umstellung des Fuhrparks der Schwere Straßengüterverkehrsfahrzeuge Technologien, die derzeit nur in Form von Prototypen verfügbar ist. Für eine Umstellung dieses Fahrzeugsegments auf erneuerbare Antriebsarten wird neben entsprechenden gesetzlichen Rahmenbedingungen eine regionale Innovationspolitik benötigt, die zielgerichtet die Entwicklung, Erprobung und Markteinführung von Technologien für Schwere Straßengüterverkehrsfahrzeuge voranbringt. Dennoch ist festzuhalten, dass der Güterverkehr mit Schwere Straßengüterverkehrsfahrzeugen einen bedeutenden Engpass für die Verwirklichung einer energieautonomen Mobilitätsregion darstellt. Denn unter den gegebenen technischen Bedingungen lassen sich diese Fahrzeuge aufgrund ihres Gewichts nicht sinnvoll mit einem Elektroantrieb betreiben, und die regionalen Biomassepotenziale sind für die ausreichende Bereitstellung von Biodiesel nicht groß genug. Eine regionale Wasserstoffproduktion kommt aufgrund des daraus resultierenden sehr hohen Strombedarfs ebenfalls nicht in Frage. Regionale Energieautonomie im Güterverkehr ließe sich daher nur bei einer massiven Verlagerung des Güterverkehrs auf elektrifizierte Bahnstrecken erreichen.

Eine Deckung des Verkehrsenergiebedarfs mit erneuerbaren Energieträgern aus der Region erscheint unter sehr günstigen Rahmenbedingungen möglich. Sie erfordert allerdings sehr starke Effizienzsteigerungen im regionalen Verkehrssystem sowie den massiven Ausbau der erneuerbaren Energieerzeugung. Im Hinblick auf den Personenverkehr lassen sich deutliche Effizienzsteigerungen durch den Ausbau des Öffentlichen Nahverkehrs und die Förderung des Fuß- und Radverkehrs erreichen. Wichtige Maßnahmen in diesem Zusammenhang könnten die Einführung eines grenzüberschreitenden Verkehrsverbundes und eines flächendeckenden Integralen Taktfahrplans sowie eine regional abgestimmte Siedlungs- und Verkehrsplanung sein.

In diesem abschließenden Kapitel werden die Maßnahmen zur Dekarbonisierung des Verkehrssystems der Bodenseeregion bis 2050, die Voraussetzungen für die Erreichung einer energetischen Autonomie des Verkehrssystems dieser Region sowie der Handlungsspielraum der regionalen Akteure diskutiert und somit die Forschungsfragen beantwortet. Es folgen eine Diskussion der Übertragbarkeit der Ergebnisse und der Limitationen der Arbeit sowie Vorschläge für die weitere Forschung.

10.1 Maßnahmen zur Dekarbonisierung des Verkehrssystems bis 2050

Die **Forschungsfrage 1** der Arbeit lautet: *»Welche Maßnahmen sind erforderlich, um das Verkehrssystem einer Region bis zum Jahr 2050 vollständig zu dekarbonisieren?«*. Die Szenarioanalyse ergab, dass hierfür eine Vielzahl von Maßnahmen erforderlich sind, die in drei Kategorien zusammengefasst werden können:

- ▶ Maßnahmen zur Senkung des Verkehrsenergieverbrauchs
- ▶ Maßnahmen für die Förderung der regionalen Erzeugung und Bereitstellung von Antriebsenergie
- ▶ Maßnahmen zur Umstellung der Fahrzeugflotten auf alternative Antriebe

Im Folgenden werden diese Maßnahmen und ihre Wirkungen näher beschrieben.

Maßnahmen zur Senkung des Verkehrsenergieverbrauchs:

Die Menge erneuerbarer Energie, die in einer Region gewonnen werden kann, hängt von der Größe der Flächen ab, die für die Gewinnung zur Verfügung stehen, und ist daher nicht beliebig vergrößerbar. Da die Größe der Erzeugungsf lächen begrenzt ist, sind Maßnahmen zur Reduktion des Verkehrsenergieverbrauchs ein wichtiger Bestandteil des Transformationspfades zu energieautonomer Mobilität. Hierfür kommen verschiedene Maßnahmen in Frage, und zwar die Verkehrsvermeidung durch kompakte und nutzungsgemischte Siedlungsstrukturen, die Verlagerung des Verkehrs vom PKW auf Öffentliche Verkehrsmittel und vom LKW auf den Schienengüterverkehr, die Erhöhung der Auslastung der Fahrzeuge sowie der Einsatz effizienterer Antriebstechnologien.

Wie das Zielszenario zeigt, ist die Verlagerung von Wegen auf den Fuß- und Radverkehr (auch Verkehrsvermeidung genannt) ein sehr effektives Instrument, um den Verkehrsenergieverbrauch zu verringern. Sie erfordert eine Kombination von kurz-, mittel- und langfristig wirkenden Schritten. Kurz- bis mittelfristig kann das Zufußgehen durch die attraktivere Gestaltung öffentlicher Räume sowie die Umwidmung von Flächen für den fließenden Verkehr in Flächen für Fußgänger und in Mischverkehrsflächen gefördert werden. Ebenfalls kurz- bis mittelfristig können Radwegenetze ausgebaut und um neue Netzelemente wie Radschnellwege ergänzt werden. Langfristig trägt eine kompakte, nutzungsgemischte Siedlungsentwicklung zur Verkehrsvermeidung bei. In der Arbeit wird angenommen, dass durch eine Kombination verschiedener Schritte der Anteil des Fuß- und Radverkehrs am Modalsplit um 50 % erhöht werden kann. Wege, die nicht zu Fuß oder mit dem Fahrrad zurückgelegt werden können, sollten so weit wie möglich auf Öffentliche Verkehrsmittel verlagert werden, da diese wesentlich energieeffizienter sind als private PKW-Nutzung. In einer energieautonomen Region müssen die öffentlichen Verkehrsmittel selbstverständlich auch mit erneuerbarer Energie betrieben werden. Im Güterverkehr würde die Verlagerung von Fahrten von der Straße auf die Schiene ebenfalls zu erheblichen Effizienzsteigerungen führen.

Eine weitere, in den Szenarien nicht explizit berücksichtigte Möglichkeit zur Steigerung der Energieeffizienz ist die Erhöhung des Besetzungsgrades der Fahrzeuge. Im Falle von PKW lässt sich diese allenfalls

mittelbar über Anreizsysteme (z. B. eine Förderung des betrieblichen Mobilitätsmanagements, die in Liechtenstein erfolgreich praktiziert wird, High Occupancy Lanes auf Autobahnen) und digitale Angebote (z. B. Ridesharing-Apps wie Uber Pool und BlaBlaCar) erhöhen. Der Auslastungsgrad der Straßengüterverkehrsfahrzeuge birgt ebenfalls Potenziale für die Erhöhung der Energieeffizienz, beispielsweise durch die Vermeidung von Leerfahrten. Mangels Datengrundlage wurde diese Möglichkeit in den Szenarien nicht näher betrachtet. Effizientere Fahrzeugtechnik kann ebenfalls einen Beitrag zur Reduktion des Verkehrsenergieverbrauchs leisten. In der Arbeit wird davon ausgegangen, dass sich aufgrund des technologischen Fortschritts der Durchschnittsverbrauch der neuzugelassenen Fahrzeuge von 2010 bis 2050 um ein Drittel reduziert.

Die Energieträger, die für die Versorgung des Verbrauchssektors Mobilität einer Region erforderlich sind, werden auch von anderen Verbrauchssektoren des regionalen Energiesystems nachgefragt. Daher muss die Allokation der Energieträger auf die verschiedenen Verbrauchssektoren auf der Ebene des regionalen Energiesystems geregelt werden.

Das Zielszenario zeigt beispielhaft für die Bodenseeregion, dass der Endenergieverbrauch pro Kopf um etwa 65 % gesenkt werden muss, damit der Bedarf aus regionalen Quellen gedeckt werden kann. In der Arbeit wird vereinfachend angenommen, dass die regional erzeugte Energie, die nicht für die Verbrauchssektoren Privathaushalte, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen sowie Industrie benötigt wird, dem Verbrauchssektor Mobilität zur Verfügung steht. Somit hängt die für die Mobilität zur Verfügung stehende Energiemenge zum einen von der insgesamt in der Region gewonnenen Menge erneuerbarer Energie, zum anderen von der Energienachfrage der übrigen Verbrauchssektoren ab. Da die Energienachfrage der übrigen Verbrauchssektoren maßgeblich von deren Energieeffizienz beeinflusst wird, ist eine Steigerung der Energieeffizienz in allen Verbrauchssektoren erforderlich, um das regionale Verkehrssystem mit ausreichender erneuerbarer Energie zu versorgen.

Maßnahmen für die Förderung der regionalen Erzeugung und Bereitstellung von Antriebsenergie:

Die Umstellung des Verbrauchssektors Verkehr auf alternative Antriebe wird die Nachfrage nach den sekundären Energieträgern elektrischer Strom, Wasserstoff und Biotreibstoffe steigern. Gleichzeitig steht nur ein begrenztes regionales Flächenpotenzial für die Gewinnung regenerativer Energie zur Verfügung.

Elektrische Antriebe sind für die Bedarfsdeckung in einer energieautonomen Region am besten geeignet. Elektrische Energie lässt sich mit kosten- und flächeneffizienten Technologien gewinnen. Hierzu zählen die Wasserkraft, die Windkraft und die Solarenergie. Während die Wasserkraft aufgrund ökologischer Risiken und der geringen Akzeptanz neuer Kraftwerke nur noch bedingt ausgebaut werden kann, besteht für die Windkraft und insbesondere für die Erzeugung von Solarstrom ein bedeutendes Ausbaupotenzial. Beide Technologien weisen einen hohen Wirkungsgrad auf. Für die Solarenergie spricht außerdem, dass sich Solaranlagen nicht nur auf Freiflächen realisieren lassen, sondern auch gut in den Siedlungsraum integriert werden können. Somit lässt sich der Energiebedarf der Elektromobilität in einer energieautonomen Region am ehesten durch den Ausbau der Photovoltaik und der Windkraft decken. Im Zielszenario dieser Arbeit liegt die regionale Stromerzeugung um etwa 20 % höher als im Referenzszenario. Diese Strommenge wird zu 40,4 % photovoltaisch, zu 34,3 % aus Wasserkraft, zu 13,2 % aus Windkraft und zu 12,1% aus sonstigen Quellen gewonnen.

Im Zielszenario verfügen PKW, Krafträder, Busse und Leichte Straßengüterverkehrsfahrzeuge größtenteils über batterieelektrische Antriebe. Zwar haben sich die Kosten der Batteriespeicher in den letzten Jahren bereits deutlich verringert und weitere Kostensenkungen sind zu erwarten, jedoch lässt sich die Kapazität von Batterien nicht einfach vergrößern. Daher werden für den Güter- und den Langstreckenverkehr Technologien benötigt, die den Elektroantrieb mit Batteriespeichern ergänzen. Dazu gehören für KFZ aller Gewichtsklassen der Wasserstoffantrieb und der Antrieb mit künstlich erzeugtem Erdgas. Diese Technologien können dazu beitragen, das aufgrund der begrenzten Kapazität von Batteriespeichern im Güterverkehr und im Fernverkehr bestehende Problem geringer Reichweiten zu lösen, weisen aber auch

spezifische Nachteile auf. Hierzu gehören zum einen die gegenwärtig noch sehr hohen Kosten der Technologien und die aufwendige Speicherung von Wasserstoff, die derzeit den Markteintritt verhindern. Es kann jedoch angenommen werden, dass sich diese Schwierigkeiten in den nächsten Jahrzehnten überwinden lassen und die Wasserstofftechnologie und die synthetische Erzeugung von Erdgas mittels Methanisierung bis zum Jahr 2050 marktreife erreichen werden, sodass auch für Schwere Güterverkehrsfahrzeuge eine geeignete Antriebstechnologie zur Verfügung steht. Weitere Vorteile von Wasserstoff und mittels Methanisierung erzeugtem künstlichem Erdgas bestehen darin, dass sie mit Überschussstrom zu Spitzenzeiten erzeugt und als Speichermedien für regional erzeugte erneuerbare Energie verwendet werden können. Ihr Einsatz könnte die Abhängigkeit einer Region von Energieimporten reduzieren und somit den Grad der regionalen Energieautarkie und autonomie erhöhen. Eine Energieautonomie anstrebende Region sollte daher eine Infrastruktur für die Umwandlung von Überschussstrom in Wasserstoff und die synthetische Erzeugung von Erdgas mittels Methanisierung schaffen und den Einsatz von solchen sogenannten Power-to-X-Technologien fördern. Nachteilig ist jedoch, dass die Umwandlung von Elektrizität in Wasserstoff und auch die Methanisierung mit hohen Umwandlungsverlusten verbunden sind. Aufgrund dieser geringen Effizienz wäre es in der Bodenseeregion nicht möglich, den regionalen Energiebedarf des Verkehrs vollständig mit Wasserstoff zu decken, weil die dafür benötigte Menge an Elektrizität nicht aus regionalen erneuerbaren Quellen bereitgestellt werden kann. Dies gilt auch für synthetisch erzeugtes Erdgas, für dessen Gewinnung u. a. (regional erzeugter) Wasserstoff benötigt wird. Wasserstoff und synthetisch erzeugtes Erdgas können daher in einer energieautonomen Region nur subsidiär neben den wesentlich effizienteren elektrischen Antrieben eingesetzt werden.

Auch regional erzeugte Biotreibstoffe können in einer energieautonomen Region in Fahrzeugen eingesetzt werden. Bei der Erzeugung von Biotreibstoffen müssen allerdings auch die Belange der Biodiversität (Vermeidung von Monokulturen) und der regionalen Nahrungsmittelproduktion berücksichtigt werden. Wie die Szenarien zeigen, setzt dies dem Einsatzpotenzial von Biotreibstoffen enge Grenzen: Lediglich ein kleiner Anteil des regionalen Verkehrsenergiebedarfs kann im

Zielszenario mit Biotreibstoffen gedeckt werden. Biotreibstoffe eignen sich also in einer energieautonomen Region nur als Energieträger für Nischenanwendungen, aber nicht für den großmaßstäblichen Einsatz.

Maßnahmen zur Umstellung der Fahrzeugflotten auf alternative Antriebe:

Der Verkehrsenergiebedarf einer Region kann nur dann vollständig aus erneuerbaren Quellen gedeckt werden, wenn alle Fahrzeuge der Region auf Antriebsmittel aus erneuerbaren Quellen umgestellt sind. Diese betrifft sowohl Straßenkraftfahrzeuge als auch Schienenfahrzeuge.

Somit liegt eine der größten Herausforderungen auf dem Weg zu energieautonomer Mobilität in der vollständigen Umstellung des Straßenpersonenverkehrs auf alternative Antriebe. Da die Fahrzeuge durchschnittlich etwa zwei Jahrzehnte im Bestand verbleiben, wird für die Umstellung ein Zeitraum von erheblicher Länge benötigt und der Umstellungsprozess muss daher möglichst frühzeitig einsetzen. Spätestens ab dem Jahr 2030 ist ein Zulassungsverbot für konventionell angetriebene Fahrzeuge erforderlich, um den Straßenfahrzeugbestand bis zum Jahr 2050 im Rahmen des gewöhnlichen Erneuerungszyklus umzustellen. Sollte ein Zulassungsverbot nicht oder erst zu einem späteren Zeitpunkt möglich sein, müssen ergänzende Maßnahmen zur vorzeitigen Stilllegung von konventionell angetriebenen Fahrzeugen getroffen werden (z. B. Stilllegungs- oder Abwrackprämien), um eine vollständige Umstellung des Straßenfahrzeugbestands bis zum Jahr 2050 zu gewährleisten.

Die Situation im Schienenverkehr unterscheidet sich deutlich von der im Straßenverkehr, weil elektrische Antriebe dort seit langem eingesetzt werden und große Teile des Streckennetzes bereits elektrifiziert sind. Dies gilt insbesondere für die vollständig elektrifizierte Schweiz und für Österreich. In Deutschland sind zumindest die Hauptstrecken und einzelne Teilnetze elektrifiziert, wobei jedoch ein großer Anteil an nicht elektrifizierten Nebenstrecken existiert. Die naheliegende Option für die Umstellung des Eisenbahnverkehrs auf erneuerbare Energie wäre die vollständige Elektrifizierung der Schienennetze. Im Zielszenario dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass die Elektrifizierung aller Strecken bis zum Jahr 2050 erfolgt.

Außerdem muss der Bahnstrom zu 100 % aus erneuerbaren Quellen stammen. Die Österreichischen Bundesbahnen haben dieses Ziel bereits erreicht (Österreichische Bundesbahnen, 2018), die schweizerischen Bundesbahnen streben diese Umstellung bis 2025 an (Schweizerische Bundesbahnen, 2015) und die Deutsche Bahn AG bis 2038 (Deutsche Bahn AG, 2018).

Die Elektrifizierung mit Oberleitungen ist mit erheblichen Investitionskosten verbunden. Daher wird gegenwärtig diskutiert, auf nicht elektrifizierten Streckenabschnitten Akkutriebwagen oder mit Wasserstoff betriebene Schienenfahrzeuge einzusetzen. Diese Lösungen eignen sich ebenfalls für den Einsatz in einer energieautonomen Region. Welcher Technologie der Vorrang gewährt wird, muss auf der Grundlage der Kosteneffizienz und der regional bereitstellbaren erneuerbaren Energiemenge entschieden werden.

Zusammenfassung:

Für die vollständige Dekarbonisierung des Verkehrssystems eine Region sind eine Vielzahl von Maßnahmen erforderlich. Grundvoraussetzung ist die Umstellung der Fahrzeugbestände auf Antriebe, die mit erneuerbarer Energie betrieben werden können. Da die Erneuerung der Fahrzeugbestände etwa zwanzig Jahre in Anspruch nimmt, müssen in den nächsten fünf bis maximal zehn Jahren entsprechende Rahmenbedingungen geschaffen werden, um die vollständige Umstellung bis zum Jahr 2050 zu erreichen. Eine weitere wichtige Voraussetzung ist die Bereitstellung einer für den Fahrzeugbetrieb ausreichenden Menge erneuerbarer Energie. Hierfür erforderlich, die erneuerbaren Energien weiter auszubauen, und zwar insbesondere die Stromerzeugung durch Photovoltaik, Wind- und ggf. Wasserkraft, da die meisten Fahrzeuge über einen elektrischen Antrieb verfügen werden. Schließlich ist es notwendig, die Energieeffizienz des Verkehrs zu erhöhen, um die erneuerbar erzeugte Energie effizient einsetzen zu können. Effizienzsteigerungen können insbesondere durch Verkehrsvermeidung, Verlagerung des Verkehrs auf öffentliche Verkehrsmittel, aber auch durch eine bessere Auslastung der Fahrzeuge und effizientere Antriebstechnologien erreicht werden.

10.2 Voraussetzungen regional autonomer Endenergiebedarfsdeckung des Verkehrs

Die **Forschungsfrage 2** der Arbeit lautet: »*Unter welchen Voraussetzungen ist es möglich, den Endenergiebedarf des Verkehrs bis zum Jahr 2050 vollständig mit erneuerbaren Energieträgern aus regionaler Erzeugung zu decken?*« Im Rahmen der Szenarioanalyse konnten folgende politische, wirtschaftliche, soziokulturelle und technologische Voraussetzungen identifiziert werden:

Politische Voraussetzungen:

Die Transformation des Verkehrs- und Energiesystems einer Region ist nur dann möglich, wenn sie dem Willen der politischen Entscheidungsträger entspricht. Ausdruck dieses politischen Willens ist in der Regel ein Grundsatzbeschluss, der das Ziel definiert und verbindlich macht und den Zeithorizont für die Zielerreichung festlegt. In fast allen energieautonomen Regionen, die im Kapitel 2.5 beschrieben sind, liegt ein solcher Grundsatzbeschluss vor. Der Beschluss wird in der Regel von der Volksvertretung der Region gefasst, vorstellbar wäre aber auch ein Bürgerentscheid. Sofern die Region, wie die Bodenseeregion, aus mehreren Gebietskörperschaften besteht, muss jede Gebietskörperschaft separat entscheiden.

Für die Umsetzung regionaler Energieautonomie im Verkehrsbe-
reich bedarf es einer Organisationsstruktur, die die regionalen Akti-
vitäten koordiniert und Umsetzungsprojekte initiiert und leitet. Diese
Organisationsstruktur muss mit einem klar definierten Auftrag und aus-
reichenden finanziellen und personellen Ressourcen versehen werden. Es
kann sich dabei um eine Einrichtung mit eigener Rechtspersönlichkeit
handeln als auch um eine Abteilung eines regionalen Planungsverbandes,
einer regionalen Innovations- oder Wirtschaftsförderungsagentur
oder einer anderen überörtlichen Körperschaft. Für die Bodenseeregion
wird in der Arbeit vorgeschlagen, die Koordination der regionalen Ener-
gieautonomie bei der Internationalen Bodenseekonferenz anzusiedeln.
Hierfür spricht, dass es sich um eine etablierte Einrichtung handelt, in
der Bundesländer, Kantone und Landkreise grenzüberschreitend zu-
sammenarbeiten und die auch schon seit längerem in den Bereichen
Klimaschutz, Energie und Mobilität tätig ist.

Wie die Fallstudie zur Bodenseeregion zeigt, kann Energieautonomie im Verkehrsbereich nicht von einer regionalen Institution allein umgesetzt werden, vielmehr bedarf es einer Multilevel-Governance (Hooghe & Marks, 2001). Dazu gehört die vertikale Kooperation zwischen Politik und Verwaltung, der regionalen Wirtschaft, den regionalen Forschungs- und Bildungseinrichtungen und der Zivilgesellschaft und die vertikalen Kooperation mit den über- und untergeordneten Entscheidungsebenen (kommunale, Landes-, Bundes- und europäische Ebene). Beispielsweise entscheiden die deutschen Bundesländer als Aufgabenträger über das Angebot im Schienenpersonennahverkehr, die österreichischen Bundesländer auch über das überörtliche Angebot des nicht schienengebundenen Nahverkehrs. Auch bei der Planung und Finanzierung von Verkehrsinfrastrukturen, z. B. dem Aus- und Neubau und der Elektrifizierung von Bahnstrecken, liegt die Entscheidungsgewalt beim Bund. Schließlich spielen die übergeordneten Ebenen Land, Bund und Europäische Union eine wichtige Rolle bei der Finanzierung der Forschungs-, Entwicklungs-, Demonstrations- und Umsetzungsprojekte, die benötigt werden, um die Vision energieautonomer Mobilität Wirklichkeit werden zu lassen.

Die Notwendigkeit einer vertikalen Koordination der Aktivitäten zeigt sich insbesondere auch bei der Umstellung des Kraftfahrzeugbestandes auf alternative Antriebe, die eine Voraussetzung für regionale Energieautonomie im Verkehrsbereich ist. Zwar können die regionalen Akteure diese Umstellung auf verschiedenen Wegen fördern (z. B. durch die Umstellung ihrer eigenen Fahrzeugflotten, durch Vorgaben in Vergabeverfahren, durch bau-, verkehrs- und steuerrechtliche Regelungen sowie durch Zuschüsse für die Anschaffung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben). Einen Zulassungsstopp von Fahrzeugen mit konventionellen Antrieben können die regionalen Akteure aber nicht beschließen. Hierfür ist eine Kooperation mit der Bundesebene erforderlich, um zunächst eine Ausnahmeregelung für ein regionales Modellprojekt zu erwirken. Die Erfahrungen aus dem regionalen Modellprojekt können anschließend in die Ausgestaltung einer bundesweiten Regelung einfließen.

Die kommunale Ebene spielt bei der Umsetzung von Projekten eine wichtige Rolle. Außerdem verfügen die Kommunen als Träger der

Planungshoheit über weitreichende Gestaltungsmöglichkeiten im Bereich der örtlichen Raumplanung. Ihre Unterstützung ist daher für eine flächensparende und energieeffiziente Siedlungsentwicklung entscheidend. So können Kommunen im Rahmen der Ortsplanung Flächen für die Gewinnung, Verteilung und Speicherung erneuerbarer Energie sichern und – soweit rechtlich zulässig – Vorgaben zu Energieeffizienz und zur Energieversorgung von Bauvorhaben machen. Schließlich spielen die Gemeinden im Bereich der öffentlichen Vergaben eine große Rolle, und zwar sowohl bei der Vergabe von Grundstücken als auch bei der öffentlichen Beschaffung von Waren und Dienstleistungen. Diese Vergabeverfahren sind ein wichtiges Handlungsfeld für die Transformation einer Region in Richtung Energieautonomie, da beispielsweise Vorgaben zu den Antriebsarten der zu beschaffenden Fahrzeuge gemacht werden können.

Im Ganzen ist Multilevel-Governance im Falle einer grenzüberschreitenden Zielsetzung für die energieautonome Entwicklung, wie sie in der Arbeit angenommen wird, eine Notwendigkeit, da sich besondere Herausforderungen aufgrund unterschiedlicher rechtlicher, institutioneller, wirtschaftlicher und sozialer Rahmenbedingungen in den Teilregionen stellen. Zudem erhöht sich die Komplexität der vertikalen und insbesondere der horizontalen Kooperation aufgrund der größeren Anzahl beteiligter Akteure deutlich. In der Regel wird daher eine (stärkere) Institutionalisierung der Zusammenarbeit erforderlich sein, um eine sehr ambitionierte Vision wie Energieautonomie im Verkehrsbereich grenzüberschreitend umsetzen zu können, etwa durch die Gründung einer grenzüberschreitenden Agentur.

Wirtschaftliche Voraussetzungen:

Um die Energieversorgung des Verkehrs vollständig auf erneuerbare Energien umzustellen, sind erhebliche öffentliche und private Investitionen über einen Zeitraum von 30 Jahren erforderlich.

Die öffentliche Hand sollte dabei mit gutem Beispiel vorangehen und ihre eigenen Fahrzeugflotten möglichst frühzeitig auf erneuerbare Antriebe umstellen. Diese Umstellung muss aus den öffentlichen Haushalten finanziert werden. Im Zielszenario wird davon ausgegangen, dass die Fahrleistung des Schienenpersonenverkehrs um etwa 22 % und des

Busverkehrs um etwa 17 % gegenüber dem Trendszenario ausgeweitet wird. Diese Angebotsausweitung erfordert erhebliche Investitionen in den Ausbau und die Elektrifizierung des Schienennetzes und in neue Haltestellen und Fahrzeuge. Da der Öffentliche Nahverkehr nicht kostendeckend betrieben werden kann, ist außerdem mit steigenden Betriebskostenzuschüssen zu rechnen.

Für eine Übergangszeit werden auch Investitionszuschüsse und Steuernachlässe für private Unternehmen notwendig sein, beispielsweise für die Anschaffung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben, die Errichtung von Lade- und Tankinfrastrukturen sowie für Anlagen für die Erzeugung, Umwandlung, Speicherung und Verteilung von erneuerbarer Energie. Entsprechende Zuschüsse stehen bereits seit längerem zur Verfügung. Sie werden teils von den Kommunen, teils von den Bundesländern und Kantonen und teils von der Bundesebene bereitgestellt.

Die Umstellung der Verkehrsenergieversorgung auf regional erzeugte erneuerbare Energie wird nur dann erfolgreich sein, wenn es gelingt, in größerem Umfang privates Kapital zu mobilisieren. Private Investitionen sind von verschiedenen regionalen Stakeholdern zu tätigen, die in Kapitel 9.1 beispielhaft für die Bodenseeregion aufgeführt werden. Zu erwähnen sind insbesondere die Bewohnerinnen und Bewohner (also die privaten Haushalte), die Eisenbahninfrastruktur- und die Eisenbahnbetriebsunternehmen, Car-Sharing-Anbieter sowie Energieversorger und Energienetzbetreiber.

Soziokulturelle Voraussetzungen:

Die gesellschaftliche Akzeptanz und soziale Verträglichkeit der Energieautonomie sind Grundvoraussetzungen für ihre Umsetzung.

Grundsätzlich ist die Akzeptanz der Energiewende, also der vollständigen Dekarbonisierung des Energiesystems, in Deutschland, Österreich und in der Schweiz hoch. Jedoch stoßen einzelne Maßnahmen, die zur Dekarbonisierung erforderlich sind, auf Widerstand. Dazu zählen insbesondere der Ausbau des Hochspannungsnetzes in Deutschland sowie die Errichtung von Windparks.

Die Akzeptanz der Elektromobilität, einer Schlüsseltechnologie für energieautonome Mobilität, ist in den letzten Jahren gestiegen. Dennoch gibt es nach wie vor Vorbehalte, die auf die höheren Anschaffungskosten

dieser Technologie zurückzuführen sind. Dabei wird die Notwendigkeit, die Elektromobilität zu fördern, allgemein anerkannt. Auch der Ausbau des öffentlichen Nahverkehrs trifft in den DACH+-Ländern auf wachsende Zustimmung.

Für die Akzeptanz des in dieser Arbeit beschriebenen Maßnahmenbündels erscheint es notwendig, dass sich die Mobilität der verschiedenen Verkehrsteilnehmer nicht verschlechtert. Risiken bestehen vor allem für Bewohner des ländlichen und des suburbanen Raums mit niedrigem Einkommen, die in ihrer Alltagsmobilität auf das Auto angewiesen sind, sich einen Elektro-PKW aufgrund des (derzeit) deutlich höheren Anschaffungspreises jedoch nicht leisten können. Der Ausbau des Öffentlichen Nahverkehrs im ländlichen und im suburbanen Raum ist daher nicht nur aufgrund der höheren Energieeffizienz dieser Verkehrsmittel empfehlenswert, sondern als soziale Maßnahme sinnvoll. Die Schweiz und das österreichische Bundesland Vorarlberg zeigen schon heute, dass eine sehr gute Angebotsqualität des Öffentlichen Nahverkehrs auch im ländlichen Raum möglich ist. Eine weitere Möglichkeit ist der Ausbau von Car-Sharing-Systemen im ländlichen und suburbanen Raum, deren Fahrzeuge mit erneuerbaren Antrieben ausgestattet sind. Eine mittel- bis langfristige Option ist das Sharing autonomer Fahrzeuge, welches auch die individuelle Mobilität von Personengruppen, die selbst kein Fahrzeug steuern wollen oder dürfen, sicherstellen würde.

Auch für die Gütermobilität stellt sich die Frage nach der gesellschaftlichen Akzeptanz der vorgeschlagenen Maßnahmen. Wesentliche Voraussetzungen sind die Zuverlässigkeit und ein günstiges Kosten-Nutzen-Verhältnis der einzusetzenden Technologien. Nachteilig ist, dass alternative Antriebsarten für den Straßengüterverkehr noch nicht so weit entwickelt sind wie im Straßenpersonenverkehr. Die derzeit auf dem Markt verfügbaren Leichten Straßengüterverkehrsfahrzeuge mit alternativen Antrieben leiden noch unter den Problemen geringer technischer Reife. Für die Schweren Straßengüterverkehrsfahrzeuge befinden sich alternative Antriebsarten erst in der Erprobungsphase. Nachdem in den letzten 10 Jahren große Fortschritte bei den alternativen Antrieben für Straßenpersonenverkehrsfahrzeuge gemacht wurden, ist jedoch anzunehmen, dass bei den Straßengüterverkehrsfahrzeugen zeitverzögert ähnliche Fortschritte erreicht werden können. Eine wichtige Rolle für

die Weiterentwicklung der Technologien werden regionale Modellvorhaben und Demonstrationsprojekte spielen. Regionen, die energieautonome Mobilität anstreben, sollten sich proaktiv an Modellvorhaben und Demonstrationsprojekten zu alternativen Antriebsarten und Formen des Güterverkehrs beteiligen, um frühzeitig Erfahrungen zu sammeln und dadurch die Akzeptanz der neuen Technologien bei den regionalen Stakeholdern zu erhöhen.

Technologische Voraussetzungen:

Die meisten Technologien, die in den Szenarien untersucht worden, stehen bereits heute zur Verfügung. Dies gilt insbesondere für die Gewinnung erneuerbarer Energie. Hier wurde in den Szenarien der Einsatz von Technologien angenommen, die bereits Marktreife erreicht haben.

Im Hinblick auf die Energieeffizienz wurden moderate Effizienzsteigerungen bei den Fahrzeugantrieben unterstellt. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Effizienzsteigerungen im Rahmen der Weiterentwicklung bereits ausgereifter Technologien erreicht werden können. Wesentlich größere Effizienzsteigerungen als auf der Ebene der Fahrzeugtechnik können auf der Ebene des Gesamtverkehrssystems durch die Verkehrsverlagerung erreicht werden: im Personenverkehr durch die Verlagerung von PKW-Fahrten auf den Fuß- und Radverkehr sowie auf öffentliche Verkehrsmittel, im Güterverkehr durch die Verlagerung von der Straße auf die Schiene.

Für PKW, Omnibusse und Krafträder sind zumindest die Elektroantriebe so weit entwickelt, dass die Umstellung der Bestände auch mit der gegenwärtig verfügbaren Technologie grundsätzlich vorstellbar erscheint. Allerdings sind die Anschaffungskosten von Elektrofahrzeugen nach wie vor deutlich höher und die Reichweiten begrenzter als bei Fahrzeugen mit konventionellen Verbrennungsantrieben. Der Wasserstoffantrieb hat noch keine Marktreife erreicht. Auch wenn in den nächsten Jahren mit technologischen Fortschritten bei dieser Antriebsart gerechnet werden kann, ist sie für energieautonome Regionen aufgrund der hohen Umwandlungsverluste bei der Erzeugung von Wasserstoff bestenfalls als Nischenanwendung geeignet. Eine große Herausforderung stellt die Dekarbonisierung des Güterverkehrs dar, da der batterieelektrische Antrieb augenblicklich nur für Leichte Straßengüterverkehrsfahrzeuge

geeignet ist und für Schwere Straßengüterverkehrsfahrzeuge noch keine Antriebstechnologien zur Verfügung stehen, die sowohl marktreif als auch für den großmaßstäblichen Einsatz geeignet sind. Aussichtsreiche Technologieoptionen für die Dekarbonisierung des Güterverkehrs sind nach derzeitigem Wissenstand Gasantriebe auf der Basis von synthetischem Erd- oder Flüssiggas, das durch Methanisierung unter Verwendung regional erzeugten Stroms und regional gewonnenen Biogases erzeugt wurde, Hybridantriebe unter Verwendung von Biodiesel sowie der elektrische Antrieb, wenn Autobahnen mit Oberleitungen versehen werden und Batterien nur für Kurzstrecken zum Einsatz kommen.

Eine wichtige Voraussetzung für die Bereitstellung erneuerbarer Antriebsenergie ist der Aufbau einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge und einer diese ergänzenden Tank-Infrastruktur für Wasserstoff und künstlich erzeugtes Erdgas. Dies betrifft sowohl den Straßenverkehr als auch den Schienenverkehr. Um die Interoperabilität der verschiedenen Systeme sicherzustellen, müssen sowohl wirtschaftliche Anreize gesetzt als auch technische Standards definiert werden.

Eine weitere wichtige Voraussetzung ist die Integration der Ladeinfrastruktur in das elektrische Netz. Es gilt sicherzustellen, dass durch den Ausbau der Ladeinfrastruktur, insbesondere durch die Errichtung von Schnelladestationen, keine Überlastung der elektrischen Netze eintritt. Die Netze müssen also physikalisch ertüchtigt oder digital zu »Smart Grids« weiterentwickelt werden. Ferner ist das zeitliche Auseinanderfallen von Erzeugungs- und Verbrauchsspitzen zu berücksichtigen. Hierfür ist es erforderlich, ein intraregionales Lastmanagement einzurichten und diesem ausreichende Speicherkapazitäten zur Verfügung zu stellen. Auf der technischen Seite geht es zunächst darum, sicherzustellen, dass der Endenergieverbrauch des Verkehrs nicht größer ist als die Menge erneuerbarer Energie, die regional für den Verkehr bereitgestellt werden kann. Dies kann durch Suffizienz- (Verkehrsvermeidungs-) oder Effizienzmaßnahmen erreicht werden.

Zusammenfassung:

Aus technologischer Sicht erscheint es machbar, den Endenergiebedarf des Verkehrs in einer Region bis zum Jahr 2050 vollständig mit erneuerbaren Energieträgern zu decken. Um das Verkehrs- und Energiesystems

einer entsprechend umzubauen, bedarf es aber auch des politischen Willens der regionalen Entscheidungsträger, neue Wege zu gehen, und der Unterstützung der regionalen Bevölkerung. Außerdem müssen finanzielle und personelle Ressourcen bereitgestellt und verwaltet sowie die Aktivitäten unterschiedlicher regionaler Akteure koordiniert werden. Hierfür muss eine leistungsfähige Organisationsstruktur auf der regionalen Ebene geschaffen werden.

10.3 Möglichkeiten regionaler Gestaltung der Verkehrssystem-De karbonisierung

Die **Forschungsfrage 3** der Arbeit lautet: »*Welche Möglichkeiten haben Regionen, die Dekarbonisierung des Verkehrssystems zu gestalten?*« Diese Forschungsfrage wurde im Wesentlichen im Kapitel 9 am Beispiel der Bodenseeregion beantwortet. An dieser Stelle werden die Ergebnisse in zusammengefasster Form wiedergegeben und die wesentlichen Handlungsfelder für die regionale Gestaltung der Verkehrssystem-De karbonisierung benannt.

Handlungsfeld Politik:

Ein Grundsatzbeschluss, der messbare Ziele und einen Zeithorizont für die Umsetzung enthalten sollte, kann von der Volksvertretung der Region im Rahmen ihrer Zuständigkeiten beschlossen werden. Sofern rechtlich zulässig, kann der Beschluss auch durch in einem Bürgerentscheid gefällt werden. Solange der Beschluss nicht gegen die Verfassung verstößt oder geltenden Gesetzen widerspricht, kann die Region die Inhalte des Beschlusses frei bestimmen. Auch bei der Wahl der Organisationsstruktur hat die Region einen großen Spielraum. Ob die Energieautonomieaktivitäten von einem neu zu gründenden Verein oder einer GmbH koordiniert werden, ob die Koordination einer bestehenden Einrichtung wie einer regionalen Wirtschaftsförderungsgesellschaft übergeben wird oder ob sie von der Abteilung einer Behörde übernommen wird, kann die Region selbst entscheiden.

Multilevel-Governance ist, wie oben bereits erklärt, eine Grundvoraussetzung für eine energieautonome Mobilitätsregion, da viele Maßnahmen die Zusammenarbeit unterschiedlicher regionaler Akteure (horizontale Kooperation) bzw. die Zusammenarbeit der Region mit

über- bzw. untergeordneten Ebenen (vertikale Kooperation) erfordern. Diese Zusammenarbeit findet bereits statt, muss aber in einer energieautonomen Mobilitätsregion intensiviert werden. Der Region kommt dabei die Rolle des Initiators und Moderators zu, sie ist dabei aber auch von der Kooperationsbereitschaft der anderen Akteure abhängig. Der Handlungsspielraum der Region im Bereich Multilevel-Governance ist daher als mittel bis groß anzusehen.

Handlungsfeld Verkehrsvermeidung:

Verkehrsvermeidung ist ein effizientes Mittel, um den Verkehrsenergieverbrauch einer Region zu reduzieren. Wichtige Voraussetzungen sind eine kompakte und nutzungsgemischte Siedlungsentwicklung in der Region. Größere Neubauprojekte sollten vorzugsweise an Standorten mit guter ÖV-Anbindung und fußläufig erreichbarer Infrastruktur errichtet werden, um einen autoarmen Lebensstil zu ermöglichen. Brachflächenaktivierung und die Nachverdichtung im Siedlungszusammenhang sollten konsequent gegenüber der Ausweisung von neuen Bauflächen auf der »Grünen Wiese« priorisiert werden.

Im Rahmen der überörtlichen Raumplanung bzw. Regionalplanung können für eine flächensparende und interkommunale Siedlungsentwicklung Ziele und Vorgaben definiert werden, die von den Kommunen im Rahmen der örtlichen Raumplanung beachtet und konkretisiert werden müssen. Die Kommunen haben hierbei einen großen Spielraum, sodass die Region die Siedlungsentwicklung nur gemeinsam mit den Kommunen, also durch eine Multilevel-Governance steuern kann. Ein Beispiel aus der Bodenseeregion ist die »Vision Vorarlberg«. Dabei handelte es sich um einen Regionalplanungsprozess, der vom Land Vorarlberg und den Gemeinden des Rheintals gemeinsam getragen und umgesetzt wird.

Eine kompakte und nutzungsgemischte Siedlungsflächenentwicklung kann also von der Region initiiert werden, aber bei der Umsetzung ist sie auf die Mitwirkung der Kommunen mit ihren oft widerstreitenden Interessen angewiesen. Außerdem wird die Baulandnachfrage von verschiedenen Faktoren beeinflusst, die nicht von der Region gesteuert werden können, wie Migration und Demographie, Wirtschaftswachstum, Zinsniveau und Besteuerung. Die Vielzahl der Faktoren und Akteure in

diesem Handlungsfeld beschränkt den effektiven Einfluss der Region auf die Siedlungsentwicklung.

Eine weitere effektive Maßnahme für die Verringerung des Verkehrsenergieverbrauchs ist eine Förderung nichtmotorisierter Fortbewegungsarten wie des Fußgänger- und Fahrradverkehrs. Die Region hat in diesem Bereich einen gewissen Entscheidungsspielraum. Sie kann zum einen überörtliche Rad- und Fußwegeverbindungen planen, (aus)bauen und unterhalten. Zum anderen gewähren Kantone und Bundesländer Zuschüsse für die Planung und Gestaltung von Rad- und Fußwegen sowie Begegnungs- und Fußgängerzonen. Der Entscheidungsspielraum der Region kann daher als groß bezeichnet werden.

Handlungsfeld Verkehrsverlagerung:

Viele Entscheidungen zum Ausbau und zum Verkehrsangebot des öffentlichen Nahverkehrs fallen auf der regionalen Ebene. So wird das Verkehrsangebot des Regionalbusverkehrs in Deutschland von den Landkreisen und kreisfreien Städten, in der Schweiz von den Kantonen und in Österreich von den Bundesländern bestellt. Die Kantone und österreichischen Bundesländer sind außerdem Besteller von Leistungen des Schienenpersonennahverkehrs, in Deutschland ist dies eine Aufgabe der (im Vergleich zu Österreich deutlich größeren) Bundesländer. Limitierender Faktor für die Angebotsausweitung sind allerdings die damit verbundenen Kosten. Der Ausbau der Eisenbahninfrastruktur kann auf der regionalen Ebene nur vorbereitet werden, da die Finanzierung und die Planung dieser Maßnahmen durch den Bund erfolgen. Somit verfügt die Region über einen mittleren bis großen Spielraum beim Ausbau des Öffentlichen Nahverkehrs.

Wie die Arbeit gezeigt hat, sind die Verkehrsvermeidung sowie die Verkehrsverlagerung vom MIV zum Öffentlichen Nahverkehr wichtige Schritte auf dem Weg zur energieautonomen Mobilitätsregion. Das Volumen des MIV wird zurückgehen oder zumindest stagnieren. Daher können Straßenausbauplanungen, die auf der Annahme eines weiteren Wachstums des MIV beruhen, eingestellt und die für sie vorgesehenen Mittel für den Ausbau des Öffentlichen Nahverkehrs und des Schienenverkehrs eingesetzt werden. Regionen haben nur eingeschränkt einen Einfluss auf die Infrastrukturplanungen auf ihrem Gebiet. In der

Bodenseeregion könnten beispielsweise die schweizerischen Kantone und das österreichische Bundesland Vorarlberg die Planung für neue und auszubauende Kantonal- und Landesstraßen einstellen und über die Vergabe von Zuschüssen für den Straßenbau auch auf die Infrastrukturplanungen der Kommunen Einfluss nehmen. In Deutschland liegen nur die Kreisstraßen in regionaler Hand.

Auf die Planung der deutschen Bundes-, Landes- und Staatsstraßen, der schweizerischen Nationalstraßen sowie der Autobahnen (mit Ausnahme kurzer kantonaler Autobahnabschnitte in der Schweiz) haben die Regionen keinen unmittelbaren Einfluss. Sie sind aber in die Planungsverfahren für diese übergeordneten Straßenbaunetze eingebunden und können dort auf die Einstellung von Straßenplanungen drängen, die in einer energieautonomen Mobilitätsregion nicht mehr benötigt werden.

Handlungsfeld Energieeffizienz der Fahrzeuge:

Die Region kann den Besetzungsgrad der PKW nicht unmittelbar beeinflussen, aber sie kann verschiedenen Anreize setzen, die zu einem höheren Besetzungsgrad führen können. Hierzu zählen die Förderung des betrieblichen Mobilitätsmanagements, wie es in Vorarlberg und besonders im Fürstentum Liechtenstein mit Erfolg betrieben wird, sowie die Bereitstellung von plattformbasierten Lösungen für das Ride-Sharing im ländlichen Raum.

Auch im Güterverkehr gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Auslastung der Fahrzeuge zu erhöhen und Routen zu optimieren, um nicht nur Energie, sondern auch Kosten zu sparen. Sie werden oft unter dem Begriff Stadtlogistik zusammengefasst. Ähnliche Konzepte können auch auf der regionalen Ebene umgesetzt werden. Die Region hat verschiedene Möglichkeiten, diese zu fördern, beispielsweise durch die Ausweisung von Standorten von Logistikzentren oder indem sie die Entwicklung von plattformbasierten Softwarelösungen (z. B. im Sinne eines »Ubers für Güter«) fördert.

Handlungsfeld Umstellung der Fahrzeugbestände auf alternative Antriebe:

Die Umstellung der regionalen Fahrzeugbestände auf erneuerbare Antriebe ist eine der wichtigsten Komponenten einer energieautonomen

Mobilitätsregion. Die Region hat allerdings keine Möglichkeit, diese Umstellung den Kraftfahrzeughaltern vorzuschreiben, ein allgemeiner Zulassungsstopp könnte nur auf der Bundesebene erlassen werden. Allerdings kann die Region wichtige Impulse setzen, indem sie Modellvorhaben zum großmaßstäblichen Einsatz alternativer Antriebe initiiert und umsetzt. Außerdem kann sie mit gutem Beispiel vorangehen, indem sie die im öffentlichen Eigentum befindlichen Fahrzeugflotten rasch auf alternative Antriebe umstellt. Die schweizerischen Kantone und das Fürstentum Liechtenstein können außerdem steuerliche Anreize für die Anschaffung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben schaffen.

Die Elektrifizierung von Bahnstrecken kann die Region ebenfalls nicht in Eigenregie durchführen, aber sie kann ggf. den Elektrifizierungsbedarf von Strecken anmelden und sich an den Kosten der Maßnahmen beteiligen. Über die Finanzierung, Planfeststellung und Umsetzung der Elektrifizierung befinden übergeordnete Entscheidungsträger.

Handlungsfeld Energiebereitstellung:

Die Energieeffizienz kann von der Region nur sehr eingeschränkt beeinflusst werden. Möglich sind die Festlegung von Zielwerten, die Ausarbeitung von Umsetzungsplänen für Energieeffizienz sowie die Umsetzung von Maßnahmen im eigenen Wirkungsbereich von Kantonen, Bundesländern und Landkreisen. Außerdem kann die Region ggf. bei der Akquisition von Fördermitteln unterstützen. Verbindliche Vorgaben zur Energieeffizienz können auf der regionalen Ebene in der Regel nicht getroffen werden, da die entsprechende Regelungskompetenz auf der europäischen und der nationalen Ebene angesiedelt ist. Die Flächensicherung für Erzeugungsanlagen, z. B. für Wind- und Wasserkraftanlagen, Freiflächensolar-, Biogas- und geothermische Anlagen, ist eine wichtige Voraussetzung für eine Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energie im regionalen Strommix. Diese Flächensicherung kann im Rahmen der Regional-, Kantonal- bzw. Landesraumplanung durch die Ausweisung von Vorrangstandorten erfolgen und ist daher auf der regionalen Ebene gut steuerbar. Gesicherte Standorte und stabile rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen sind Voraussetzungen für Investitionen in regionale Erzeugungsanlagen. Diese können von regionalen Energieversorgern, aber auch von Bürgerinnen und Bürgern der Region in der Form von Bürgerkraftwerken getätigt werden.

Handlungsfeld Ökonomie:

Höhere Investitionen in den Öffentlichen Nahverkehr, in Elektromobilität und andere alternative Antriebstechnologie, in die Förderung des Fuß- und Radverkehrs sowie in erneuerbare Energietechnologie sind die Grundvoraussetzung für eine energieautonome Mobilitätsregion. Die regionale Ebene kann vorhandene Mittel neu verteilen und Anreize für Investitionen Dritter schaffen. Eine Möglichkeit der Umschichtung von Investitionen besteht im Bereich des Straßenbaus, da auf der regionalen Ebene über den Bau von Landes- (AT), Kreis- und Kantonalstraßen entschieden wird. Eine Region, die Energieautonomie anstrebt, sollte daher prüfen, inwieweit sie Mittel, die bislang für den Straßenbau vorgesehen sind, für den Ausbau des öffentlichen Nahverkehrs und des Fuß- und Radwegenetzes einsetzen kann. Die Verwendung investiver Mittel, die für Autobahnen und Schnellstraßen vorgesehen sind, können auf der regionalen Ebene nicht beeinflusst werden, ebenso wenig zweckgebundene Zuschüsse des Bundes oder Landes für regionalen Straßenbau. Investitionen Dritter können durch Subventionen der öffentlichen Hand stimuliert werden. Hierzu gehören u. a. Investitionszuschüsse und Steuernachlässe. In Deutschland und in Österreich fallen diese weitgehend in die Kompetenz des Bundes, wogegen die schweizerischen Kantone über eine eigene Steuerhoheit und damit über einen erheblichen Gestaltungsspielraum verfügen.

Handlungsfeld soziokulturelle Voraussetzungen:

Eine wichtige soziokulturelle Voraussetzung für eine energieautonome Mobilitätsregion ist es, Bewusstsein für die Notwendigkeit der Dekarbonisierung zu schaffen. Dies kann durch gezielte Öffentlichkeitsarbeit und die Schaffung einer Marke »Energieautonome Mobilitätsregion« erfolgen. Beides lässt sich gut auf der regionalen Ebene vorbereiten, finanzieren und umsetzen.

Gegenüber neuen Technologien, seien es Windkraftanlagen, Elektrofahrzeuge oder digitale Mobilitätsplattformen, bestehen in Teilen der Bevölkerung nach wie vor Vorbehalte. Um die Akzeptanz neuer Technologien zu erhöhen, muss die Bevölkerung frühzeitig in Planungsprozesse eingebunden werden. Neue Formen der Beteiligung wie Co-Creation und Rapid Prototyping bieten ein zusätzliches Potenzial für die Steigerung der Akzeptanz.

Die Einführung neuer Antriebstechnologien wird die Kostenstrukturen individueller Mobilität verändern, da Fahrzeuge mit alternativer Antriebstechnologie in der Anschaffung deutlich teurer (aber i. d. R. im Betrieb billiger) sind als Fahrzeuge mit konventionellen Antrieben. Dies wirkt sich unmittelbar auf die individuellen Erreichbarkeitsverhältnisse aus, insbesondere im autoabhängigen ländlichen oder periurbanen Raum. Das Konzept einer energieautonomen Mobilitätsregion wird nur dann von der Bevölkerung akzeptiert werden, wenn es nicht zu Erreichbarkeitsnachteilen für Teile der Bevölkerung führt. Daher gilt es, durch den Ausbau des Öffentlichen Nahverkehrs und des Fuß- und Radverkehrs sowie durch die Ausweitung von Angeboten in den Bereichen Ride-, Car- und Bike-Sharing gleichwertige Alternativen zum privaten PKW-Besitz zu schaffen.

Insgesamt sind die Möglichkeiten, auf der regionalen Ebene die soziokulturellen Voraussetzungen für eine energieautonome Mobilitätsregion zu schaffen, als hoch einzuschätzen.

Handlungsfeld Technologie:

Innovationen in der Fahrzeugtechnologie können auf der regionalen Ebene nur sehr eingeschränkt gefördert werden. Zu den Möglichkeiten zählen Vorgaben in öffentlichen Vergabeverfahren (etwa bei der Anschaffung neuer Fahrzeuge für Kreis- oder Kantonalbehörden, aber auch bei der Ausschreibung von Verkehrsleistungen im ÖPNV) und die Initiierung und Durchführung regionaler Modellvorhaben. Sofern in der Region Fahrzeughersteller oder Zulieferer oder Forschungseinrichtungen, die sich mit alternativen Antrieben beschäftigen, vorhanden sind, so sollten diese mit dem Ziel in die Aktivitäten der energieautonomen Mobilitätsregion eingebunden werden, ein regionales Innovations-Ökosystems aufzubauen. Beim Aufbau von Ladeinfrastrukturen wurden in den letzten zehn Jahren erhebliche Fortschritte gemacht. Der weitere Ausbau kann auf der regionalen Ebene durch die Standortplanung gefördert werden, die Investitionssicherheit für Errichter und Betreiber von Ladeinfrastrukturen schafft. Ladeinfrastrukturen werden oft von regionalen Energieversorgern errichtet, an denen Kantone, Bundesländer, Landkreise oder kreisfreie Städte beteiligt sind. Dies erleichtert eine proaktive und mit den regionalen Zielsetzungen abgestimmte Standortplanung.

Die Erfahrungen aus dem Ausbau der Ladeinfrastrukturen sollten auch bei der Konzeptionierung einer Wasserstoff-Tankinfrastruktur berücksichtigt werden. Die Dekarbonisierung des regionalen Verkehrssystems kann nicht losgelöst von der Dekarbonisierung des Energiesystems erfolgen. Es muss nicht nur sichergestellt werden, dass ausreichend erneuerbare Energie zur Verfügung steht, sondern auch, dass diese zur richtigen Zeit bereitsteht. Dies erfordert leistungsfähige regionale Energienetze und Speicher sowie ein regionales Lastmanagement. Diese können von den regionalen Akteuren schrittweise aufgebaut werden.

Zusammenfassung:

Regionen können die Dekarbonisierung des Verkehrssystems und in erheblichem Umfang gestalten, wobei der Handlungsspielraum je nach Handlungsfeld aufgrund der jeweiligen gesetzlichen Rahmenbedingungen unterschiedlich groß ausfällt. In vielen Handlungsfeldern kann die Region nicht allein handeln, sondern muss mit anderen staatlichen und nichtstaatlichen Akteuren kooperieren. Multilevel Governance ist daher eine Grundvoraussetzung für energieautonome Mobilität. Dies gilt in besonderem Maße für grenzüberschreitende Regionen wie die Bodenseeregion.

Tabelle 29: Handlungsfelder der Verkehrssystem-Dekarbonisierung

Handlungsfelder	Maßnahmen, die von der Region ergriffen werden können	Maßnahmen außerhalb des regionalen Handlungsspielraums	Bewertung des Handlungsspielraums der Region
Verkehrsvermeidung			
Flächensparende Siedlungsentwicklung	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Abgestimmte Siedlungs- und Verkehrsentwicklung in der Region ▶ Mobilisierung von Nachverdichtungspotenzialen ▶ Interkommunales Flächenmanagement 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Widmung bzw. Entwidmung von Bauland erfolgt im Rahmen der kommunalen Planungshoheit 	Mittel
Begrenzung der Flächenverbrauchs, Förderung einer flächensparenden Siedlungsentwicklung	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Aufbau eines regionalen bzw. interkommunalen Flächenmanagements 		Mittel
Verkehrsverlagerung			
Verkehrsverlagerung durch den Ausbau öffentlicher Verkehrsmittel	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Erstellung von Verkehrskonzepten ▶ Bestellung von Nahverkehrsleistungen für den Regionalbusverkehr (in DE, AT, CH) und im Schienenverkehr (in AT, CH) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Finanzierung, Planfeststellung und Umsetzung des Ausbaus von Bahnstrecken ▶ Bestellung von Verkehrsleistungen im Schienenverkehr (in DE) 	Mittel bis hoch
Einstellung von Infrastrukturplänen, die nicht mehr benötigt werden	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Überprüfung der regionalen Raumordnungspläne und regionalen Verkehrskonzepte ▶ Überprüfung der Planungen für Landes-, Kreis- und Kantonalstraßen ▶ Stellnahmen zu Infrastrukturplanungen über- und untergeordneter Ebenen 		mittel

Handlungsfelder	Maßnahmen, die von der Region ergriffen werden können	Maßnahmen außerhalb des regionalen Handlungsspielraums	Bewertung des Handlungsspielraums der Region
Energieeffizienz der Fahrzeuge			
Höhere Energieeffizienz im Personenverkehr durch höheren Besetzungsgrad der PKW	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Förderung des betrieblichen Mobilitätsmanagements ▶ Förderung von Ride Sharing (z. B. durch die Entwicklung und Bereitstellung entsprechender Apps) 		Mittel bis hoch
Höhere Energieeffizienz im Güterverkehr durch höhere Auslastung	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Aufbau von regionalen Logistikzentren ▶ „Über für Güter“ 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Vorgaben zur Auslastung 	Mittel bis
Steigerung der Energieeffizienz durch effizientere Fahrzeugtechnik	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Vorgaben für die Energieeffizienz von Fahrzeugen bei öffentlichen Vergabeverfahren 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Entwicklung von Normen für die Energieeffizienz von Fahrzeugen ▶ Vorgaben zum Flottenverbrauch 	Gering
Umstellung der Fahrzeugbestände auf erneuerbare Antriebe			
Umstellung des Straßenverkehrs auf alternative Antriebe	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Initiierung von Modellvorhaben ▶ Umstellung der eigenen Flotten ▶ Steuerliche Anreize setzen (nur in CH) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Erlass eines allgemeinen Zulassungsstopps 	Gering (DE, AT) bis Mittel (CH)
Umstellung des Schienenverkehrs auf Elektro- und alternative Antrieb	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Anmeldung von Strecken zur Elektrifizierung ▶ Ggf. Kostenbeteiligung 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Finanzierung, Planfeststellung und Umsetzung der Elektrifizierung 	Mittel
Regionale Bereitstellung erneuerbarer Antriebsenergie			
Sektorübergreifende Steigerung der Energieeffizienz im regionalen Energiesystem	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Festlegung von Zielwerten ▶ Ausarbeitung von Umsetzungsplänen ▶ Umsetzung von Maßnahmen im eigenen Wirkungsbereich ▶ Ggf. Bereitstellung bzw. Akquise von Fördermitteln 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Vorgaben zur Energieeffizienz 	Niedrig bis Mittel

Handlungsfelder	Maßnahmen, die von der Region ergriffen werden können	Maßnahmen außerhalb des regionalen Handlungsspielraums	Bewertung des Handlungsspielraums der Region
Flächensicherung für den Ausbau erneuerbarer Energien	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Ausweisung von Vorrang- und Ausschlussflächen in regionalen Raumordnungsplänen 		Hoch
Steigerung der regionalen Stromerzeugung	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Festlegung von Zielwerten ▶ Ausweisung von Vorrangflächen 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Strommarktregulierung 	Mittel bis Hoch
Förderung der regionalen Erzeugung von Biotreibstoffen	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Berücksichtigung in der Agrarplanung sowie in der regionalen Landschafts- und Freiraumplanung 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Verbindliche Vorgaben zur Nutzung der Agrarflächen 	Mittel
Mittel- bis langfristige Einführung von Power-to-X-Technologien	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Initiierung und Durchführung von Modellvorhaben ▶ Aufbau und Koordination eines regionalen Innovations-Ökosystems 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Kosten der Technologie 	Mittel
Politische Voraussetzungen schaffen			
Grundsatzbeschluss fassen	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Grundsatzbeschluss kann von der Volksvertretung der Region oder durch ein Referendum gefasst werden 		Hoch
Organisationsstruktur schaffen	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Aufbau einer Geschäftsstelle ▶ Programmleitung der regionalen Aktivitäten 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Ggf. Finanzierungsbeiträge über- und untergeordneter Ebenen 	Hoch
Multilevel-Governance	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Abstimmung der auf eine energieautonome Mobilitätsregion zielenen Maßnahmen mit über- und untergeordneten Ebenen (vertikale Koordination) sowie mit den relevanten regionalen Akteuren (horizontale Koordination) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Mitwirkungsbereitschaft der über- und untergeordneten Ebenen 	Mittel bis hoch

Handlungsfelder	Maßnahmen, die von der Region ergriffen werden können	Maßnahmen außerhalb des regionalen Handlungsspielraums	Bewertung des Handlungsspielraums der Region
Ökonomische Voraussetzungen			
Öffentliche Investitionen	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Umschichtung von Investitionen aus dem Bau von Landes- (AT), Kreis- und Kantonalstraßen in den Ausbau des öffentlichen Nahverkehrs und des Fuß- und Radwegenetzes 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Autobahnen und Bundesstraßen 	Gering (DE&AT) bis Hoch (CH)
Investitionszuschüsse	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Subsidiäre Zuschüsse für die Anschaffung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Zuschüsse für die Anschaffung von Fahrzeugen werden auch von der Bundesebene und den Kommunen entschieden. 	Mittel
Steuernachlässe	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Zuschüsse für die Anschaffung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ In Deutschland und in Österreich wird über die Höhe der Kraftfahrzeugsteuer nicht auf der regionalen Ebene entschieden. 	Gering (DE&AT), Hoch (CH, LI)
Attraktive Geschäftsmodelle als Voraussetzung für private Investitionen	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Entwicklung neuer Geschäftsmodelle im Rahmen regionaler Modellvorhaben 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen 	Hoch
Soziokulturelle Voraussetzungen			
Bewusstsein für die Notwendigkeit der Dekarbonisierung schaffen	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Gezielte Öffentlichkeitsarbeit ▶ Schaffung einer Marke „Energieautonome Mobilitätsregion“ 		Hoch
Akzeptanz neuer Technologien fördern	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Frühzeitige Einbindung der Bevölkerung in Planungsprozesse ▶ Co-Creation und Rapid Prototyping von (ggf. vorläufigen) Lösungen 		Hoch

Handlungsfelder	Maßnahmen, die von der Region ergriffen werden können	Maßnahmen außerhalb des regionalen Handlungsspielraums	Bewertung des Handlungsspielraums der Region
Erreichbarkeit auch bei veränderten Kostenstrukturen sicherstellen	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Ausbau des Öffentlichen Nahverkehrs und des Fuß- und Radverkehrs als Alternativen zum Motorisierten Individualverkehr ▶ Schaffung bzw. Ausbau von Angeboten in den Bereichen Ride-, Car- und Bike-Sharing 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Finanzierung des öffentlichen Nahverkehrs ▶ Die Preise des öffentlichen Nahverkehrs und des Ride-, Car- und Bike-Sharings können von den regionalen Akteuren nur bedingt beeinflusst werden. 	Mittel
Akzeptanz neuer Technologien fördern	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Frühzeitige Einbindung der Bevölkerung in Planungsprozesse ▶ Co-Creation und Rapid Prototyping von (ggf. vorläufigen) Lösungen 		Hoch
Technologische Voraussetzungen			
Innovationen in der Fahrzeugtechnik	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Vorgaben in öffentlichen Vergabeverfahren ▶ Initiierung von regionalen Modellprojekten ▶ Aufbau eines regionalen Innovations-Ökosystems 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Der Erfolg innovativer Technologien entscheidet sich auf globalen Märkten. 	Gering bis Mittel
Aufbau einer flächendeckenden Lade- und Tankinfrastruktur	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Regionale Standortplanung ▶ Beteiligungen an Verkehrs- und Verkehrsinfrastrukturunternehmen sowie an Energieerzeugern und Energie netzbetreibern 		Hoch
Integration der Mobilität in das übergeordnete Energiesystem	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Beteiligungen an Verkehrs- und Verkehrsinfrastrukturunternehmen sowie an Energieerzeugern und Energie netzbetreibern ▶ Initiierung von regionalen Modellprojekten ▶ Entwicklung neuer Geschäftsmodelle 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Energiemarktregulierung 	Mittel

Quelle: Eigene Darstellung.

10.4 Übertragbarkeit der Ergebnisse

Die in dieser Arbeit verwendeten und zum Teil neu entwickelten Methoden und Modelle sind allgemein gültig und können auch in anderen Regionen angewendet werden. Einschränkungen können sich für Regionen ergeben, in denen die benötigten Daten nicht zur Verfügung stehen. Dies gilt insbesondere für Regionen außerhalb Europas, da in der Arbeit verschiedene EUROSTAT-Datensätzen sowie CORINE LAND COVER Daten verwendet wurden. Sollten die Methoden für außerhalb Europas gelegene Regionen angewendet werden, müssten für diese Regionen inhaltlich und qualitativ gleichwertige Datensätze zur Verfügung stehen.

Die Methoden und Modelle wurden in der Arbeit verwendet, um eine Fallstudie zu Bodenseeregion zu bearbeiten. Dabei stand die Bodenseeregion stellvertretend für alle europäische Regionen, die an der Energiewende und der Dekarbonisierung des Verkehrssystems arbeiten. Gleichwohl ergeben sich aus der Raumstruktur der Bodenseeregion sowie aus ihrer spezifischen Governance gewisse Einschränkungen der Übertragbarkeit:

Die Raumstruktur beeinflusst das Potenzial einer Region, sich vollständig mit erneuerbarer Energie zu versorgen. Dies betrifft sowohl den Energieverbrauch, da die Raumstruktur auf das Verkehrsverhalten einwirkt, als auch das Potenzial für die Erzeugung erneuerbarer Energie, das wesentlich von der Siedlungsdichte und dem Verhältnis von bebauten zu unbebauten Flächen abhängt.

Um Regionen zu identifizieren, die eine ähnliche Raumstruktur wie die Bodenseeregion haben und somit vermutlich ein ähnliches Verkehrsverhalten und einen ähnlichen Verkehrsenergieverbrauch, kann die *Typology on urban-rural regions* des Europäischen Forschungsnetzwerks für Raumentwicklung und territorialen Zusammenhalt ESPON herangezogen werden (ESPON, 2009). Diese Typologie klassifiziert alle europäischen NUTS-3-Regionen nach Ihrem Urbanisierungsgrad. Die rund um den Bodensee gelegenen NUTS-3-Regionen werden von ESPON den Kategorien IU »Intermediate region, close to a city« und RU »Predominantly rural region, close to a city« zugeordnet.

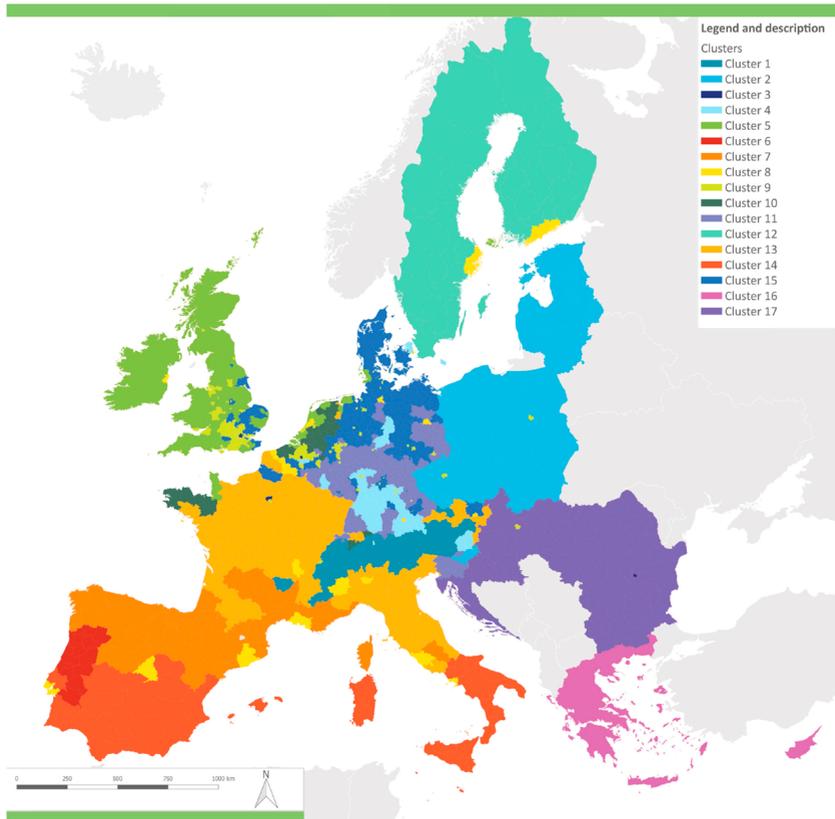
Das regionale Potenzial für die Erzeugung erneuerbarer Energie hängt stark von klimatischen und topographischen Faktoren ab. Scaramuzzino et al. (2019) haben eine Raumtypologie entwickelt, die das

regionale Potenzial für die Erzeugung erneuerbarer Energie auf der NUTS-3-Ebene abbildet. Die NUTS-3-Regionen der Bodenseeregion gehören demnach zu den Clustern 1 »Alpine areas with very high potential from waste water per person«, 4 »Innovation oriented areas with high potential from forest biomass, 7 »Mountain areas with high potential from municipal solid waste« und 11 »Central European areas with very high potential from forest biomass per m² and high potential from waste water per person«. Wie der Abbildung 95 entnommen werden kann, sind nahezu alle schweizerischen und österreichischen, bayerischen, baden-württembergischen, rheinland-pfälzischen und hessischen NUTS-3-Regionen sowie wie viele NUTS-3-Regionen in Thüringen, Sachsen, Brandenburg und Niedersachsen diesen Kategorien zugeordnet.

Zu berücksichtigen ist ferner, dass die Bodenseeregion aus einer deutschen, einer österreichischen und einer schweizerischen Teilregion sowie dem Fürstentum Liechtenstein besteht. Hieraus ergeben sich weitere Beschränkungen für die Übertragbarkeit, da die politischen und institutionellen Rahmenbedingungen für die Realisierung einer energieautonomen Mobilitätsregion nur für die regionale Konstellation dieser vier Länder untersucht werden konnten.

Aus einer Zusammenschau der Faktoren, die die Übertragbarkeit im Hinblick auf die institutionellen Rahmenbedingungen, auf das Verkehrsverhalten und den Verkehrsenergieverbrauch und das Potenzial für die Erzeugung erneuerbarer Energien bestimmen, lässt sich schließen, dass die Ergebnisse dieser Arbeit auf ländliche und semiurbane Regionen in Deutschland, Österreich und der Schweiz übertragbar sind. Gewisse Einschränkungen ergeben sich bei der Übertragbarkeit auf Regionen im Norden und Osten Deutschlands sowie im Osten Österreichs aufgrund des dort anders strukturierten Potenzials für die Erzeugung erneuerbare Energie. Da die letztgenannten Regionen ein großes Windkraftpotenzial aufweisen, kann vermutet werden, dass das Ziel einer regionalen Energieautonomie im Verkehr dort eher zu erreichen ist als in der Bodenseeregion.

Abbildung 94: Klassifizierung von NUTS-3-Regionen nach ihrem Potenzial für die Erzeugung erneuerbarer Energie



Quelle: Scaramuzzino et al., 2019; reproduziert mit Einwilligung des Elsevier-Verlags [Lizenz Nr. 5083030084640].

10.5 Limitationen und Vorschläge zu weiterer Forschung

Diese Arbeit hat gezeigt, inwieweit es technisch möglich ist, den Verkehrsenergiebedarf einer Region vollständig mit regional erzeugter erneuerbarer Energie zu decken. Außerdem hat sie untersucht, welche politischen, ökonomischen, soziokulturellen technologischen Rahmenbedingungen dazu erfüllt sein müssen und inwieweit diese Rahmenbedingungen auf der regionalen Ebene geschaffen werden können. Im Zuge

dessen sind nicht nur Forschungsfragen beantwortet, sondern – zum Teil als Ergebnis der Limitationen der vorliegenden Arbeit – auch neue Forschungsfragen aufgeworfen worden, die Ausgangspunkte für mögliche Nachfolgeprojekte sind:

- ▶ Die Arbeit berücksichtigt den Verkehrsenergiebedarf von Straßen- und Schienenfahrzeugen, aber nicht den Luftverkehr, den Schiffsverkehr sowie den Off-Road-Verkehr (land- und forstwirtschaftliche Fahrzeuge etc.). In zukünftigen Studien zu regionalen Energieautonomie sollten auch diese Verkehrsmittel berücksichtigt werden.
- ▶ In den Szenarien wurde ein großes Potenzial für die Verkehrsvermeidung und die Verkehrsverlagerung vom Motorisierten Individualverkehr auf öffentliche Verkehrsmittel unterstellt. Wie groß die Freiheitsgrade der Bewohnerinnen und Bewohner in periurbanen und ländlichen Regionen im Hinblick auf die Veränderung ihres Verkehrsverhaltens, aber auch im Hinblick auf die Anschaffung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben sind, bedarf einer genaueren Untersuchung.
- ▶ Nicht untersucht werden konnten die Kosten für die vollständige Umstellung der Verkehrsenergieversorgung auf regional erzeugte erneuerbare Energie. Dies betrifft sowohl die gesamtwirtschaftlichen Kosten als auch die Kosten von einzelnen Akteuren oder Akteursgruppen (z. B. öffentliche Hand, Privathaushalte, Unternehmen, Infrastrukturbetreiber). Neben den Kosten verdient auch der gesamtwirtschaftliche Nutzen einer energieautonomen Mobilitätsregion eine nähere Betrachtung. In diese sind zunächst eingesparte CO₂-Emissionen und die dadurch vermiedenen Kosten des Klimawandels einzubeziehen. Außerdem kann vermutet werden, dass durch Verkehrsvermeidung, Verkehrsverlagerung und die weitgehende Umstellung der Fahrzeugparks auf Elektro- und Wasserstoffantriebe weitere positive externe Effekte auftreten, wie deutlich verringerte Lärm- und Luftschadstoffemissionen. Ein Vergleich der gesamtwirtschaftlichen Kosten und Nutzen einer energieautonomen Mobilitätsregion wäre hochrelevant für Entscheidungsträger und sollte daher in einer Nachfolgestudie gezogen werden.

- ▶ Die Deckung des Verkehrsenergiebedarfs durch regional erzeugte erneuerbare Energie ist nur eine unter mehreren Optionen für die Dekarbonisierung des Verkehrssystems. Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, gibt es auch andere Denkmodelle, wie den »Regionenverbund« und die »Internationale Großtechnik«. Es ist unklar, welche dieser Lösungen unter Berücksichtigung aller volkswirtschaftlichen Nutzen und Kosten die ökonomisch effizienteste ist.
- ▶ Ein weiterer wichtiger Aspekt, der in der Arbeit nicht betrachtet werden konnte, ist die Ökobilanz einer energieautonomen Mobilitätsregion. Auch hier bietet sich ein Vergleich mit anderen Organisationsmodelle wie dem »Regionenverbund« und der »Internationalen Großtechnik« an, der Gegenstand weiterer Studien sein kann.

10.6 Schlussbemerkung

Seit dem Abschluss des Forschungsprojekts BAER im Jahr 2013 hat die Energiewende sowohl in der Bodenseeregion als auch europaweit bedeutende Fortschritte gemacht. So stieg in Deutschland der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch von 11,4 % im Jahr 2010 auf zuletzt 17,5 % im Jahr 2019 (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2020). Städte, Regionen, Staaten und sogar die Europäische Union haben sich das Ziel einer CO₂-neutralen Entwicklung bis spätestens 2050, teilweise bereits bis zum Jahr 2040 oder sogar 2030 gesetzt.

Auch im Verkehrsbereich gibt es ermutigende Signale. So hat sich die Elektromobilität in den letzten zehn Jahren von einer Nischentechnologie mit Potenzial zu einer alltagstauglichen und damit marktreifen Technologie entwickelt, die von den Endverbrauchern stark nachgefragt wird. Auch der Wasserstoffantrieb scheint sich nach Jahrzehnten des Forschens und Erprobens der Marktreife zu nähern.

Trotz aller guten Nachrichten ist der Verkehrsbereich nach wie vor sehr weit von CO₂-Neutralität entfernt: So zeigt die oben zitierte Statistik auch, dass der Anteil der erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch des Verkehrs zwischen dem Jahr 2010 und dem Jahr 2019 sogar leicht rückläufig war und nur 5,6 % beträgt (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2020). Es bedarf daher neuer Technologien, aber auch neuer Geschäftsmodelle und regionaler Organisationsformen, um die Energiewende auch im Verkehrsbereich voranzubringen.

In der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene Optionen diskutiert, wie die Dekarbonisierung des Verkehrs auf der regionalen Ebene organisiert werden kann und welcher Voraussetzungen und Maßnahmen es hierfür bedarf. Vor diesem Hintergrund hofft der Autor, mit dieser Arbeit einen nützlichen Beitrag zur aktuellen wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Diskussion zu leisten.

Quellen

- ADAC Autotest (2011). *VW Golf 1.6 BiFuel Comfortline*. <https://www.adac.de/infotestrat/tests/auto-test/alltests.aspx>.
- ADAC Autotest (2019). *Test Hyundai Nexo: Elektro-SUV mit Brennstoffzelle*. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/hyundai/hyundai-nexo/>.
- AEG (2019). *Allgemeines Eisenbahngesetz vom 08.07.2019*. https://www.gesetze-im-internet.de/aeg_1994/AEG.pdf.
- Althaus, H.-J., & Gauch, M. (2010). *Vergleichende Ökobilanz individueller Mobilität. Elektromobilität versus konventioneller Mobilität mit Bio- und fossilen Treibstoffen*. EMPA.
- Ammoser, H., & Hoppe, M. (2006). *Glossar Verkehrswesen und Verkehrswissenschaft: Definitionen und Erläuterungen zu Begriffen des Transport- und Nachrichtenwesens*. Diskussionsbeiträge aus dem Institut für Wirtschaft und Verkehr: 2/2006. Fakultät für Verkehrswissenschaften »Friedrich List«, Technische Universität Dresden.
- Amstein + Walther AG, & Infrac AG (2011). *Regionalstudie 2000-Watt-Gesellschaft Bodensee*. Version 01. Zürich.
- Amt der Vorarlberger Landesregierung. (2010). *Energiezukunft Vorarlberg – Ergebnisse aus dem Visionsprozess: Etappenbericht*. Bregenz. www.vorarlberg.at.
- Amt der Vorarlberger Landesregierung, & Vorarlberger Rheintalgemeinden (2006). *Vision Rheintal: Dokumentation 2006*. Bregenz.
- Amt für Statistik. (2009). *Bevölkerungsszenarien für Liechtenstein für den Zeitraum 2005 bis 2050*. Vaduz.
- Amt für Statistik. (2015). *Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung 2010*. Vaduz.
- Amt für Umweltschutz. (2019): *Klimaschutz*. <https://www.llv.li/inhalt/1524/amtsstellen/klimaschutz>.
- Ashrafi, S. R., Neumann, Hans-Martin (2017). Determinants of Transport Mode Choice in the Austrian Province of Vorarlberg. In M. Schrenk, V. V. Popovich, P. Zeile, P. Elisei, & C. Beyer (Hg.), *REAL CORP 2017 Proceedings* (S. 121-130). Wien.

- Austriatech GmbH (2013). *E-Mobilität für Kommunen: Elektromobilität als Chance für die kommunale Entwicklung*. Wien.
- Autogas (n. d.). <https://de.wikipedia.org/wiki/Autogas>.
- BAER – Bodensee-Alpenrhein Energieregion (2016). <http://www.baernet.org/>, zuletzt aktualisiert am 18.05.2016.
- Batteriebus (o. J.). <https://de.wikipedia.org/wiki/Batteriebus>.
- Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, & Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst. (2020). *Ladeatlas Bayern*. <https://ladeatlas.elektromobilitaet-bayern.de/>.
- Bayern Innovativ GmbH (2020). *Bayerisches Förderprogramm Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Bayern*. <https://www.bayern-innovativ.de/kompetenzstelle-elektromobilitaet-bayern/seite/bayerisches-foerderprogramm-oeffentliche-ladeinfrastruktur>.
- Benz, S., & Moser, P. (2010). *Klassifizierung und länderspezifische Unterstützung von Erneuerbare-Energie-Regionen: Entwicklungsperspektiven für nachhaltige 100%-Erneuerbare-Energie-Regionen* (Arbeitsmaterialien 100EE No. 4). Kassel
- Bodensee (o. J.). <http://de.wikipedia.org/wiki/Bodensee>.
- Bodenseemobil e.V. (2017). *Bodenseemobil CarSharing*. www.bodenseemobil.de/links.html, zuletzt geprüft am 28.12.2017.
- Bodensee-S-Bahn. [de.wikipedia.org/bodensee-s-bahn](http://de.wikipedia.org/wiki/Bodensee-S-Bahn).
- Bohunovsky, L., Stocker, A., Großmann, A., Hutterer, H., Arends, G., Haslinger, J. et al. (2010). *Szenarien eines nachhaltigeren Energiekonsums: Ausbau erneuerbarer Energien, Erhöhung der Energieeffizienz und Verhaltensänderungen im Energieverbrauch bis 2020* (e-co Working Paper No. 2). Wien.
- Breuer, C., & Übelher, D. (2009). *IBK-Statusbericht Erneuerbare Energieträger im Gebiet der Internationalen Bodenseekonferenz*. Konstanz. www.bodenseekonferenz.org.
- Bruckner, Th., Bashmakov, I. A., Chum, H., De la Vega Navarro, A., Edmonds, J., Faaij, A. et al.: Energy Systems. In O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth et al. (Hg.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (S. 511-598). Cambridge

- University Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_chapter7.pdf.
- Bundesamt für Energie (BfE). (2007). *Die Energieperspektiven 2035 – Band 2 Szenarien I bis IV: Energienachfrage und Elektrizitätsangebot in der Schweiz 1990-2035 in den Szenarien I bis IV*. Bern.
- Bundesamt für Statistik. (2015a). *Bruttoinlandsprodukt (BIP) pro Einwohner*. Neuchatel.
- Bundesamt für Statistik. (2015b). *Strassenfahrzeugbestand nach Fahrzeuggruppe und Kanton*. Neuchatel.
- Bundesamt für Statistik (BfS), & Bundesamt für Raumentwicklung (ARE). (2007a). *Mobilität in der Schweiz: Personen- und Haushaltsdatensatz des Mikrozensus Verkehrs zum Verkehrsverhalten 2005*. Neuchatel und Bern.
- Bundesamt für Statistik (BfS), & Bundesamt für Raumentwicklung (ARE). (2007b). *Mobilität in der Schweiz: Ergebnisse des Mikrozensus Verkehrs zum Verkehrsverhalten 2005*. Neuchatel und Bern.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. (2009). *Siedlungsstruktureller Kreistyp 2008*. Bonn.
- Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, & Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. (2018). *Mission 2030. Die Klima- und Energiestrategie der österreichischen Bundesregierung*. Wien. https://mission2030.info/wp-content/uploads/2018/04/mission2030_Klima-und-Energiestrategie.pdf.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. (2014). *Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung II zwischen der Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das vertreten durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, und der DB Netz AG, der DB Station&Service AG, der DB Energie GmbH sowie der Deutschen Bahn AG der DB Energie GmbH*.
- Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. (2005). *Energieregionen der Zukunft* (Nachhaltig wirtschaften konkret). Wien. www.energiesystemederzukunft.at.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2019a). *Abkommen von Paris*. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-abkommen-von-paris.html>.

- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2019b): *Zweiter Fortschrittsbericht zur Energiewende*. Berichtsjahr 2017. Berlin. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/fortschrittsbericht-monitoring-energiewende.pdf?__blob=publicationFile&v=26.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2020). *Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland*. https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html.
- Burmeister, K. H. (2003). Bodensee. In *Historisches Lexikon der Schweiz*. Basel: Schwabe.
- Cambridge Systematics, & Moving Cooler Steering Committee (2009). *Moving Cooler: An analysis of transportation strategies for reducing greenhouse gas emissions*. Urban Land Institute.
- Caruso Carharing eGen (2017). *Caruso Carsharing*. <https://www.carusocarsharing.com>.
- Cervero, R. (2011). *Going beyond travel-time savings*. The World Bank.
- Chassot, S., & Wüstenhagen, R. (2014). Erneuerbare Energien und Kundenverhalten. In P. Droege (Ed.), *Regenerative Region. Energie- und Klimaatlas Bodensee-Alpenrhein* (S. 347-363). Oekom.
- Corine Land Cover (CLC) (2006). *Copernicus Land Monitoring Service*. <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2006?tab=metadata>.
- Corpus, A., Courtney, P., Dax, T., Meredith, T., Noguera, J., Talbot, H., & Shucksmith, M. (2011). *EDORA – European Development Opportunities for Rural Areas: Final report*. ESPON. http://www.espon.eu/export/sites/default/Documents/Projects/AppliedResearch/EDORA/EDORA_Final_Report_Parts_A_and_B-maps_corrected_06-02-2012.pdf.
- DEENET (2009). *Schriftliche Befragung von Erneuerbare-Energie-Regionen in Deutschland: Regionale Ziele, Aktivitäten und Einschätzungen in Bezug auf 100% Erneuerbare Energie in Regionen* (Arbeitsmaterialien 100EE No. 1). Kassel. www.100-ee.de.
- DESTATIS (2015): *Kraftfahrzeugbestand nach Kraftfahrzeugarten*.
- Deutsche Bahn AG (2018). DB Energie – Strom für die Deutsche Bahn. Anteil der erneuerbaren Energien steigt auf 57 Prozent • 80 Prozent

- Ökostromanteil bis 2030 • Lösungen für alternative Antriebe. https://www.dbenergie.de/resource/blob/3528740/dfef99555fe2ded3702e36a3b41b5b8fd/1118_80Prozent-data.pdf.
- Deutsche Energieagentur (DNA) (2009): *Woher kommt der Wasserstoff in Deutschland bis 2050?* Berlin.
- Deutsche Energieagentur (DNA) (2014). *LNG in Germany: Liquefied Natural Gas and Renewable Methane in Heavy-Duty Road Transport: What it can deliver and how the policy framework should be geared towards market entry*. Berlin. http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Presse/Meldungen/2014/Studie_LNG_komplett_englisch.pdf.
- Deutsches Institut für Urbanistik (DIFU) (2015). *Elektromobilität in der kommunalen Umsetzung*. Berlin. http://www.starterset-elektromobilitaet.de/content/3-Infothek/3-Publikationen/12-elektromobilitaet-in-der-kommunalen-umsetzung/elektromobilitaet_in_der_kommunalen_umsetzung.pdf.
- Deuschle, J., Hauser, W., Sonnberger, M., Tomaschek, J., Brodecki, L., & Fahl, U. (2015). Energie-Autarkie und Energie-Autonomie in Theorie und Praxis. *Zeitschrift für Energiewirtschaft*, 39(3), 151-162. DOI: 10.1007/s12398-015-0160-5.
- Drei Länder – Ein Ticket: Bodensee-Ticket Bahn | Bus | Fähre (o. J.). <https://www.bodensee-ticket.com>.
- Droege, P., Genske, D. D., Joedecke, T., Ruff, A., & Schwarze, M. (2013). *Der BAER-Atlas als integriertes Modell und regionales Werkzeug*. Universität Liechtenstein.
- Droege, P., Genske, D. D., Joedecke, Th., Roos, M., & Ruff, A. (2012). *Erneuerbares Liechtenstein*. Universität Liechtenstein.
- Droege, P., Genske, D. D., Ruff, A., & Schwarze, M. (2014b): Das BAER-Energiemodell als regionales Planungswerkzeug. In P. Droege (Hg.), *Regenerative Region. Energie- und Klimaatlas Bodensee-Alpenrhein = Energy- and climate atlas Lake Constance-Alpine Rhine* (S. 76-179). Oekom.
- Droege, Peter (Hg.) (2009). *100 Per Cent Renewable. Energy Autonomy in Action*. Routledge.
- Droege, Peter (Hg.) (2014). *Regenerative Region. Energie- und Klimaatlas Bodensee-Alpenrhein = Energy- and climate atlas Lake Constance-Alpine Rhine*. Oekom.

- Droege, Peter (Hg.) (2014a). Regenerative Region. Energie- und Klimaatlas Bodensee-Alpenrhein = Energy and climate atlas Lake Constance-Alpine Rhine. Oekom.
- Economic Intelligence Group (2016a). *Forecast Germany*. <http://gfs.eiu.com>.
- Economic Intelligence Group (2016b). *Forecast Austria*. <http://gfs.eiu.com>.
- Economic Intelligence Group (2016c). *Forecast Switzerland*. <http://gfs.eiu.com>.
- E-Control (2013): Stromkennzeichnung in Österreich 2012. Wien. www.e-control.at.
- Edenhofer, O., Pichs Madruga, R., & Sokona, Y. (2012). *Renewable energy sources and climate change mitigation. Special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SRREN_Full_Report-1.pdf.
- Edenhofer, O; Pichs Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K. et al. (Hg.) (2014). *Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Eidgenössische Steuerverwaltung. (2011). *Jahresmittelkurs zur Umrechnung der in ausländischer Währung erzielten Einkünfte gemäss Artikel 20 WPEV für die Veranlagung der Ersatzabgabe des Ersatzjahres 2010*. Bern.
- Energie für die Zukunft: Initiativen in Richtung stromautarkes Burgenland (2008). <http://www.burgenland.at/aktuell/908>.
- Energie Klima Plan GmbH, & Hochschule Liechtenstein (2011). *Erneuerbares Liechtenstein: Entwurf Endbericht*. unveröffentlicht. Vaduz und Nordhausen.
- Energieinstitut Vorarlberg (2010a). *Umsetzungskonzept der Energieregion Großes Walsertal*. Dornbirn.
- Energieinstitut Vorarlberg (2010b). *Gesamtkonzept der Energieregion Großes Walsertal*. Dornbirn.
- Energietal Toggenburg: *Das sind wir*. <http://energietal-toggenburg.ch/energietal-toggenburg>.

- Ernst Basler und Partner AG (2009). *Das Goms: auf dem Weg zur ersten Energieregion der Schweizer Alpen: Integriertes Energiekonzept für die ländliche Regionalentwicklung*. Schlussbericht September 2009. Zürich. www.energieregiongoms.ch.
- Ernst Basler und Partner AG (2015). *Chancen der Elektromobilität für den Kanton Graubünden: Erweiterter Schlussbericht*.
- European Commission. (2017). *2050 low-carbon economy*. https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en.
- European Federation for Transport and Environment. (2018). *How to decarbonize European Transport by 2050*. Brüssel.
- EUROSTAT (2010a). *Illustrated Glossary for Transport Statistics*. Luxembourg. Office for the Official Publications of the European Communities.
- EUROSTAT (2010b). *Illustriertes Glossar für die Verkehrsstatistik*. Luxembourg. Office for the Official Publications of the European Communities.
- EUROSTAT (2013a). *Road freight transport measurement (road_go): Reference Metadata in Euro SDMX Metadata Structure (ESMS)*. http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_SDDS/de/road_go_esms.htm.
- EUROSTAT (2013b). *Regional transport statistics (reg_tran): Reference Metadata in Euro SDMX Metadata Structure (ESMS)*. http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_SDDS/de/reg_tran_esms.htm.
- EUROSTAT (2014). *Traffic flows of trains on the rail network (number of trains, 2010 data) [rail_tf_netseg10]*, zuletzt aktualisiert am 04.02.2014.
- EUROSTAT (2015a). *Bestand der Fahrzeuge nach Kategorie und NUTS-2-Regionen [tran_r_vehst]*, zuletzt aktualisiert am 12.06.2015.
- EUROSTAT (2015b). *Bevölkerung im Jahresdurchschnitt zur Berechnung des BIP (Tausend Personen), nach NUTS-3-Regionen [nama_10r_3popgdp]*, zuletzt aktualisiert am 21.05.2015.
- EUROSTAT (2015c). *Bevölkerung im Jahresdurchschnitt zur Berechnung des BIP (Tausend Personen), nach NUTS-3-Regionen [nama_10r_3popgdp]*, zuletzt aktualisiert am 21.05.2015.
- EUROSTAT (2015d). *Bruttoinlandsprodukt (BIP) zu laufenden Marktpreisen nach NUTS-3-Regionen [nama_10r_3gdp]*, zuletzt aktualisiert am 21.05.2015.

- EUROSTAT (2015e): *Bruttoinlandsprodukt zu laufenden Marktpreisen nach NUTS-2-Regionen [nama_r_e2gdp]*, zuletzt aktualisiert am 03.03.2014.
- EUROSTAT (2016). *Bevölkerungsvorausschätzung 2013: Hauptszenario – Bevölkerung am 1. Januar nach Alter, Geschlecht und NUTS-3-Regionen [proj_13rpms3]*.
- Everding, D., & Kloos, M. (2007). *Solarer Städtebau: Vom Pilotprojekt zum planerischen Leitbild*. Kohlhammer.
- Everding, D., Ecofys, FH Köln, & RWTH Aachen (2004). *Leitbilder und Potenziale des solaren Städtebaus*. FH-Köln (Institut für Regenerative Energien), RWTH Aachen (Lehrstuhl für Städtebau und Landesplanung), Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU).
- Everding, D., Genske, D. D. & Ruff, A. (Eds.) (2020). *Energiestädte*. (Im Druck). Springer Spektrum.
- Fachstelle für Statistik Kanton St. Gallen. (2020). *Die Bodenseeregion*. <http://www.statistik-bodensee.org/startseite.html>.
- Förderungen für Elektroautos in Österreich im Überblick (o. J.). https://elektroautor.com/foerderungen-elektroautos_oesterreich/.
- Forschungsgruppe Bodenseestadt (Ed.) (2003). *Vision Bodenseestadt: Städtebauforschung zwischen Utopie und Machbarkeitsstudie*. VDG.
- Fouad, N. A. (Ed.) (2013), *Bauphysik-Kalender 2013. Schwerpunkt: Nachhaltigkeit und Energieeffizienz*. Ernst & Sohn.
- Frischknecht, R., Itten, R., Flury, K. (2012). *Treibhausgas-Emissionen der Schweizer Strommische, V1.4*. Uster. <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/klima/fachinfo-daten/treibhausgas-emissionenschweizerstrommische2009.pdf.download.pdf/treibhausgas-emissionenschweizerstrommische2009.pdf>.
- Füllung, T. (2018). BVG-Busflotte wird bis 2030 unter Strom gesetzt. *Berliner Morgenpost*, 11.08.2018. <https://www.morgenpost.de/berlin/article215300097/BVG-Busflotte-wird-bis-2030-unter-Strom-gesetzt>.
- Gasser, F., & Jacobsen, L. (2020). Nah am Wasser gebaut. Die Corona-Krise hat den Menschen am Bodensee gezeigt, wie selbstverständlich offene Grenzen für sie sind – und dass sie ohne sie nicht mehr leben können. *Die Zeit*, 02.07.2020 (28/2020), 16-17.

- Gather, M., Kagermeier, A., & Lanzendorf, M. (2008). *Geographische Mobilitäts- und Verkehrsforschung*. Studienbücher der Geographie. Borntraeger.
- Genske, D. D., & Messari-Becker, L. (2013). Energetische Stadtsanierung und Klimaschutz. In Fouad, N.A. (Ed.), *Bauphysik-Kalender 2013. Schwerpunkt: Nachhaltigkeit und Energieeffizienz* (S. 1-26). Ernst & Sohn.
- Genske, D. D., Henning-Jacob, J., Joedecke, T., & Ruff, A. (2010a). Zukunftsszenarien für Wilhelmsburg. In Internationale Bauausstellung Hamburg (Hg.), *Energieatlas. Zukunftskonzept Erneuerbares Wilhelmsburg* (S. 79-119). Jovis.
- Genske, D. D., Henning-Jacob, J., Joedecke, T., & Ruff, A. (2010b). Methodik und Strategieentwicklung. In Internationale Bauausstellung Hamburg (Hg.). *Energieatlas. Zukunftskonzept Erneuerbares Wilhelmsburg* (S. 43-66). Jovis.
- Genske, D. D., Jödecke, T., & Ruff, A. (2009). *Nutzung städtischer Freiflächen für erneuerbare Energien. Ein Projekt des Forschungsprogramms »Experimenteller Wohnungs- und Städtebau« (ExWoSt) des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) und des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR)*. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung.
- Gertz, C., Altenburg, S., & Hertel, C. B. M. (2008). *Chancen und Risiken steigenden Mobilitätskosten für die Stadt- und Siedlungsentwicklung unter Beachtung der Aspekte postfossiler Mobilität* (BBSR-Onlinepublikation No. 06/2009). Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS); Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung.
- Gilbert, R., & Perl, A. (2008). *Transport revolutions: Moving people and freight without oil* (Repr.). Earthscan.
- Gilbert, R., & Perl, A. (2010). *Transport revolutions: Moving people and freight without oil* (2., revidierte Ausgabe, Taschenbuch). Earthscan.
- Gornig, M. (2018). Szenario. In ARL – Akademie für Raumforschung und Landesplanung (Hg.), *Handwörterbuch der Stadt- und Raumentwicklung* (S. 2641-2646). Verlag der ARL.
- Götz, A. (2007). *Wir Alpen!. Menschen gestalten Zukunft. Alpenreport. Bd. 3.2007*. Bern: Haupt.

- Großes_Walsertal (o. J.). http://de.wikipedia.org/wiki/Großes_Walsertal.
- Hegger, M., & Dettmar, J. (2014). *Energetische Stadtraumtypen. Strukturelle und energetische Kennwerte von Stadträumen*. Fraunhofer IRB Verl. http://www.ciando.com/img/books/extract/3816792936_lp.pdf.
- Herry Consult GmbH (2009a). *Mobilität in Vorarlberg: Ergebnisse der Verkehrsverhaltensbefragung 2008*. <http://www.vorarlberg.at/pdf/verkehrsbefragungskontiv20.pdf>.
- Herry Consult GmbH (2009b). *Mobilität in Vorarlberg: Wegedatensatz der Verkehrsverhaltensbefragung 2008*.
- Herzberg, M., Scherer, R., & Schnell, K.-D. (2010). *Der Europäische Verflechtungsraum Bodensee: Ein MORO-Projekt*. Regionalverband Bodensee-Oberschwaben, Regionalverband Hochrhein-Bodensee.
- Hessen Mobil (2020). *ELISA eHighway Hessen*. Online verfügbar unter: <https://ehighway.hessen.de/>.
- Hooghe, L., & Marks, G. (2001). *Multi-Level Governance and European Integration*. Rowman & Littlefield Publishers.
- Infas, & DLR-Institut für Verkehrsforschung (2010a). *Mobilität in Deutschland 2008: Personen- und Haushaltsdatensatz*.
- Infas, & DLR-Institut für Verkehrsforschung (2010b). *Mobilität in Deutschland 2008: Ergebnisbericht. Struktur – Aufkommen – Emissionen – Trends*. http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2008_Abschlussbericht_I.pdf.
- Infras (2010). *Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs*, <http://www.hbefa.net>.
- International Energy Agency (2007). *Energy Balances of OECD- and Non-OECD Countries*. Paris.
- International Energy Agency (2009a). *Energy Balances of OECD Countries 2009*. Paris.
- International Energy Agency (2009b). *CO₂ Emissions from Fuel Combustion 2009*. Paris.
- International Energy Agency. (2009c). *Transport, energy and CO₂: Moving toward sustainability*. IEA.
- International Panel on Climate Change (2007). *Climate change 2007 – Mitigation of climate change: Contribution of Working Group III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

- Internationale Bauausstellung Hamburg (Hg.) (2010). *Energieatlas. Zukunftskonzept Erneuerbares Wilhelmsburg*. Jovis.
- Internationale Bodenseekonferenz (IBK) (2010). Statut der Internationalen Bodenseekonferenz (IBK), Stand 01.01.2010. https://www.bodenseekonferenz.org/bausteine.net/f/9847/IBK-Statut_Stand1.1.2010.pdf?fd=2.
- Internationale Bodenseekonferenz (IBK) (2017). *Leitbild und Strategie der Internationalen Bodensee-Konferenz (IBK) für die Bodenseeregion: Beschluss durch die IBK-Regierungschefkonferenz am 15.12.2017*. Konstanz.
- Internationale Bodenseekonferenz (IBK) (2020). *Die Internationale Bodenseekonferenz*. www.bodenseekonferenz.org, zuletzt geprüft am 04.08.2020
- Internationale Bodenseekonferenz (IBK) (2020a). *Plattform Klimaschutz und Energie*. <https://www.bodenseekonferenz.org/klimaschutz>, zuletzt geprüft am 04.08.2020
- Internationale Bodenseekonferenz (IBK) (2020b). *Kommission Verkehr*. https://www.bodenseekonferenz.org/20954/Handlungsfelder-und-Projekte/Verkehr/Kommission-Verkehr/index_v2.aspx, zuletzt geprüft am 04.08.2020
- Internationale Raumordnungskommission Bodensee (ROK Bodensee) (2000). *Statut der Internationalen Raumordnungskommission Bodensee*. Friedrichshafen.
- Interreg IIIA Alpenrhein Bodensee Hochrhein (2007). Geobasisdaten DACH+. Projektion Liechtenstein LI1903. Stand: 03/007
- IPCC (2014): *Climate change 2014. Synthesis report*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf.
- Isopublic Institut für Markt- und Meinungsforschung (2007). *Verkehrsverhalten Liechtenstein: Repräsentative Meinungsumfrage vom Oktober-Dezember 2007*. Schwerzenbach.
- Kanton Thurgau. (2020): Öffentlicher Verkehr – Ziele / Aufgaben. <https://oev.tg.ch/oeffentlicher-verkehr/zieleaufgaben.html/3761>.
- Klaus, Th., Vollmer, C., Werner, K., Lehmann, H., & Müschen, K. (2010). *Energieziel 2050: 100 % Strom aus erneuerbaren Quellen*. Umweltbundesamt (UBA). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/energieziel_2050.pdf.

- Kluth, T., Mück, R., Rihs, H. R., Stohler, W., & Strittmatter, P. (2001a). *BODAN-RAIL 2020: ZIP Archiv mit allen wichtigen Teilresultaten und Resultaten einschliesslich der beiden Schlussberichte*. <http://www.bodan-rail.net/>.
- Kluth, T., Mück, R., Rihs, H. R., Stohler, W., & Strittmatter, P. (2001b). *Das Konzept BODAN-RAIL 2020: Grundlagen für eine internationale Verkehrsplanung im Grossraum Bodensee und Vorschläge für ein markant verbessertes Angebot im Personen-Bahnverkehr*. Schlussbericht Langfassung. Kronbühl.
- Kosow, H., & Gaßner, R. (2008). *Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse: Überblick, Bewertung und Auswahlkriterien* (Werkstattbericht Nr. 103). IZT Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung.
- Kraftfahrtbundesamt. (2011). Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Fahrzeugalter. Flensburg.
- Kraftfahrtbundesamt. (2012). Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Fahrzeugalter. Flensburg.
- Kratena, K., & Würger, M. (2005). *Energieszenarien für Österreich bis 2020*. Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung.
- Kreibich, R. (2006). *Zukunftsforschung* (Arbeitsbericht Nr. 23/2006). IZT Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung.
- Land Vorarlberg. (2020). *Elektromobilität und Ladeinfrastruktur in Vorarlberg – Förderungen 2020*. https://vorarlberg.at/web/land-vorarlberg/contentdetailseite/-/asset_publisher/qA6AJ38txuok/content/elektromobilitaet-und-ladeinfrastruktur-in-vorarlberg-foerderung?article_id=326440.
- Latvian Presidency of the Council of the European Union. (2015). *Submission by Latvia and the European Commission on Behalf of the European Union and its Member States. Subject: Intended Nationally Determined Contribution of the EU and its Member States*. Riga. <https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Austria%20First/LV-03-06-EU%20INDC.pdf>.
- Laufer, N. (2019). Österreich hat den Klimanotstand ausgerufen. *Der Standard*, 26.09.2019. <https://www.derstandard.at/story/2000109125168/oesterreich-hat-den-klimanotstand-ausrufen>.

- Liechtensteinische Kraftwerke (2017): *Elektromobilität*. <https://www.lkw.li/unternehmen/zukunft-und-engagement/elektromobilitaet.html>.
- Liechtensteinische Kraftwerke (2020): Öffentliche Ladestationen. <https://www.lkw.li/angebot-und-leistungen/elektromobilitaet/oeffentliche-ladestationen.html>.
- Marchetti, C. (1994). Anthropological Invariants in Travel Behavior. *Technological Forecast and Social Change*, (47), 75-88.
- McKenna, R., Fichtner, W., & Jäger, T. (2014). Energieautarkie – ausgewählte Ansätze und Praxiserfahrungen im deutschsprachigen Raum. *Umwelt Wirtschafts Forum*, 22(4), 241-247. DOI: 10.1007/s00550-014-0339-y.
- Mehlin, M., & Zimmer, W. (2010). Ein Weg für klimagerechte Mobilität?: Das Forschungsprojekt Renewbility. *Internationales Verkehrswesen*, 62(5), 10-15.
- Mobility Genossenschaft (2017). *Mobility – mehr als Carsharing*. <https://www.mobility.ch/de/>.
- Monzón, A., & Nuijten, A. (Hg.) (2006). *Transport strategies under the scarcity of energy supply*. Buck Consultants International.
- Müller, M. O., Stämpfli, A., Dold, U., & Hammer, Th. (2011). Energy autarky: A conceptual framework for sustainable regional development. *Energy Policy Volume*, 39(10), 5800-5810.
- Münchener Verkehrsgesellschaft mbH (2019): *E-Mobilität – Die Elektrobusstrategie der MVG*. <https://www.mvg.de/ueber/mvg-projekte/bus/elektromobilitaet.html>.
- National Research Council (U.S.). (2009). *Driving and the Built Environment. The effects of compact development on motorized travel, energy use, and CO₂ emissions. Transportation Research Board special report: Vol. 298*. Transportation Research Board.
- Netzwerk Oberschwaben GmbH (2017). *Emma – e-mobil mit Anschluss für Bürger, Touristen und Kommunen*. <https://www.emobil-im-sueden.de/emma-projekt.html>.
- Neumann, H.-M. (2011). Regionale Mobilität – erneuerbar und klimafreundlich. In H.-P. Hege, Y. Knapstein, R. Meng, K. Ruppenthal, Ph. Zakrzewski, & A. Schmitz-Veltin (Hg.), *Schneller, öfter, weiter? Perspektiven der Raumentwicklung in der Mobilitätsgesellschaft* (S. 202-215). Akademie für Raumforschung und Landesplanung.

- Neumann, H.-M., Baumgartner, F., & Schär, D. (2014). Erneuerbare Mobilität und solarer Individualverkehr. In P. Droege (Hg.): *Regenerative Region. Energie- und Klimaatlas Bodensee-Alpenrhein = Energy and climate atlas Lake Constance-Alpine Rhine* (S. 308-347). Oekom.
- Neumann, H.-M., Genske, D., & Droege, P. (2011). Transport Aspects of Local and Regional Energy Autonomy. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 1(3), 187-195.
- Neumann, H.-M., Schär, D., & Baumgartner, F. (2012). The potential of photovoltaic carports to cover the energy demand of road passenger transport. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 20(6), 639-649. DOI: 10.1002/pip.1199.
- Newman, P. W. G., & Kenworthy, J. R. (1999). *Sustainability and cities: Overcoming automobile dependence*. Island Press.
- Öko-Institut e.V., & DLR-Institut für Verkehrsforschung (2009a). *Renewability: Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030. Endbericht an das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2: Szenario-Prozess und Szenarioergebnisse)*. Berlin.
- Öko-Institut e.V., & DLR-Institut für Verkehrsforschung (2009b). *Renewability: Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030. Endbericht an das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (1: Methodik und Datenbasis)*. Berlin.
- Österreichische Bundesbahnen (2018). 100% grüner Bahnstrom = neues Kapitel beim Klimaschutz. Die ÖBB bieten ab sofort 100 Prozent grünen Bahnstrom und gehören damit zu den Vorreitern in Europa. Wien. <https://presse.oebb.at/de/presseinformationen/100-prozent-gruener-bahnstrom-neues-kapitel-beim-klimaschutz>.
- Ott, K. (2009). Leitlinien einer starken Nachhaltigkeit: Ein Vorschlag zur Einbettung des Drei-Säulen-Modells. *GAIA*, 18(1), 25-28.
- Parzinger, G., Rid, W., Müller, U., & Grausam, M. (2016). *Elektromobilität im Carsharing: Status quo, Potenziale und Erfolgsfaktoren*. http://www.starterset-elektromobilitaet.de/content/3-Infothek/3-Publikationen/4-elektromobilitaet-im-carsharing-staus-quo-potenziale-und-erfolgsfaktoren/now_handbuch_e-carsharing_web_2.ueberarb.auf.pdf.

- Prognos AG (2009). *Modell Deutschland: Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken*. Endbericht. Basel und Berlin.
- PTV AG (2010). *Status-Analyse BODAN-RAIL*. Karlsruhe.
- Radzi, A. (2009). 100% Renewable Champions: International Case Studies. In P. Droege (Hg.), *100% renewable. Energy autonomy in action* (S. 93-165). Earthscan.
- Radzi, A. (2014): Resiliente Bodenseeregion – im Übergang zur Energieautonomie. In P. Droege (Hg.): *Regenerative Region. Energie- und Klimaatlas Bodensee-Alpenrhein = Energy- and climate atlas Lake Constance-Alpine Rhine* (S. 29-73). Oekom.
- Regierung des Fürstentums Liechtenstein. (2015): *Liechtenstein's Intended Nationally Determined Contribution (INDC). Submission of 22 April 2015 under the United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC*. https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Liechtenstein%20First/150422_INDC_FL.pdf.
- Regierung des Fürstentums Liechtenstein (2007). *Massnahmenplan Luft des Fürstentums Liechtenstein*. Vaduz.
- Regionalverband Hoahrhein-Bodensee (2017). *DACH+ Raumbearbeitung und Raumentwicklung im Grenzraum von Deutschland, Österreich, Schweiz und Liechtenstein*. <http://www.dachplus.org/ueberblick/>.
- Renewability II (2012). Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit hat sich entschlossen, gemeinsam mit dem Umweltbundesamt das Projekt Renewability weiterzuführen. <http://www.renewability.de/index.php?id=46>.
- Ritter, J. (Hg.) (1971). *Historisches Wörterbuch der Philosophie*. Schwabe u. Co.
- Rosinak und Partner Ziviltechniker GmbH (2010). *Verkehrs- und Mobilitätsentwicklung: Entwicklungen, Politiken, Anforderungen, Zielkonflikte, Lösungen. Bericht der Arbeitsgruppe Verkehr und Mobilität*. http://www.oerok.gv.at/fileadmin/Bilder/2.Reiter-Raum_u._Region/1.OEREK/OEREK_2011/AGs/4._AG_IV_Verkehr/OEREK-AG-Verkehr_Ergebnispapier_final.pdf.
- Scaramuzzino, Ch., Garegnani, G., & Zambelli, P. (2019). Integrated approach for the identification of spatial patterns related to renewable

- energy potential in European territories. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 101, 1-13. DOI: 10.1016/j.rser.2018.10.024.
- Scheer, H. (2005). *Energieautonomie: Eine neue Politik für erneuerbare Energien* (3. Aufl.). Kunstmann.
- Schindler, J., & Zittel, W. (2008). *Zukunft der weltweiten Erdölversorgung*. Energy Watch Group.
- Scholles, F. (2008). Szenariotechnik. In D. Fürst, & F. Scholles (Hg.), *Handbuch Theorien + Methoden der Raum- und Umweltplanung* (S. 380-392). Rohn.
- Schrenk, M., Popovich, V. V., Zeile, P., Elisei, P., & Beyer, C. (Hg.): *REAL CORP 2017 Proceedings*. Wien
- Schweizerische Bundesbahnen (2015). *Der Umstieg ist beschlossen. Bahnstrom aus 100% erneuerbarer Energie. Positionspapier Energiestrategie SBB*. Bern.
- Schweizerischer Bundesrat. (2013). *Botschaft zum ersten Massnahmenpaket der Energiestrategie 2050 (Revision des Energierechts) und zur Volksinitiative »Für den geordneten Ausstieg aus der Atomenergie (Atomausstiegsinitiative)«*. Bern.
- Schweizerischer Bundesrat. (2015). *Switzerland's intended nationally determined contribution (INDC) and clarifying information*. https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Switzerland%20First/15%2002%2027_INDC%20Contribution%20of%20Switzerland.pdf.
- Schweizerischer Bundesrat. (2017). *Energiegesetz (EnG). Volksabstimmung vom 21. Mai 2017 – Erläuterungen des Bundesrates*. Bern. <https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/abstimmung/20170521/Energiegesetz.html>.
- Seifert, J., Murat, F., Bühler, F., & Blödt, R. (2006). *Beyond Metropolis: Eine Auseinandersetzung mit der verstädterten Landschaft*. Niggli.
- Shell Deutschland Oil GmbH (2009). *Shell PKW-Szenarien bis 2030: Fakten, Trends und Handlungsoptionen für nachhaltige Auto-Mobilität*. Hamburg.
- Shell Deutschland Oil GmbH (2014). *Shell PKW-Szenarien bis 2040: Fakten, Trends und Handlungsoptionen für Auto-Mobilität*. Hamburg.
- Shell Deutschland Oil GmbH (2016). *Nutzfahrzeugstudie*. Hamburg.

- Sims, R., Schaeffer, R., Creutzig, F., Cruz-Núñez, X., D'Agosto, M., Dimitriu, D. et al.: Transport. In O. Edenhofer, R. Pichs Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, L. Seyboth et al. (Hg.) (2014). *Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, (S. 599-670), Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_chapter8.pdf.
- Solar Roadways (2020). *Solar Roadways – Solar Panels for Every Walking and Driving Surface*. <https://solarroadways.com>.
- Solarcomplex GmbH (2002). *Potentialübersicht der erneuerbaren Energien in der Region Hegau / Bodensee*. Singen.
- Solaroad (2020). *About Solaroad*. <https://www.solaroad.nl/about/>.
- Stadtland Dipl.-Ing. Alfred Eichberger GmbH (2014). *Zukunft der Raumentwicklung im Grenzraum von Deutschland, Österreich, Schweiz und Liechtenstein: Leitvorstellungen und Planungsprinzipien im DACH+ Raum*. Werkstattbericht. Wien.
- Statistik Austria (2013). *Fahrleistungen und Treibstoffeinsatz privater PKW nach Bundesländer 2000 bis 2012*. <http://www.statistik-austria.at>.
- Statistik Austria (2015). *Kraftfahrzeuge und Anhänger nach Bundesland und Zulassungsbehörde*.
- Statistik Austria (2019). *Energieeinsatz der Haushalte (Mikrozensus 2009/2010) –Fahrleistungen und Treibstoffeinsatz privater Pkw. Ergebnisse für Österreich*. file:///C:/Users/NeumannH/Downloads/fahrleistungen_und_treibstoffeinsatz_privater_pkw_nach_bundeslaender_2000_.pdf.
- Statistikplattform Bodensee (2019a). *Bevölkerung*. <http://www.statistik-bodensee.org/bev%C3%B6lkerung.html>.
- Statistikplattform Bodensee (2019b). *Wirtschaft*. <http://www.statistik-bodensee.org/wirtschaft.html>.
- Statistikplattform Bodensee (2020). *Fläche*. <http://www.statistik-bodensee.org/fl%C3%A4che.html>.
- Stiens, G. (1998). Prognosen und Szenarien in der räumlichen Planung. In A. Benz et al., *Methoden und Instrumente räumlicher Planung* (S. 113-145). Verlag der ARL.

- Stiens, Gerhard (2005). Prognosemethoden. In ARL – Akademie für Raumforschung und Landesplanung (Hg.), *Handwörterbuch der Raumordnung* (S. 803-813). Verlag der ARL.
- Tanner, J (1981). Expenditure of Time and Money on Travel. *Transportation Research A*, 15(1), 25-38.
- The Climate Group (2019). *Business Driving Demand for Electric Vehicles: EV100 Progress and Insights*. Annual Report, February 2019. https://www.theclimategroup.org/sites/default/files/downloads/ev100_annual_progress_and_insights_annual_report_february_2019.pdf.
- Toggenburg. <http://de.wikipedia.org/toggenburg>.
- Treuner, P.; Gee, C. (1995): Prognosemethoden. In ARL – Akademie für Raumforschung und Landesplanung (Hg.), *Handwörterbuch der Raumordnung* (S. 728-731). Verlag der ARL.
- Tuchs Schmid, M., & Halder, M. (2010): *mobitool – Grundlagenbericht. Hintergrund, Methodik & Emissionsfaktoren*. Zürich und Bern.
- UBA Berlin, BUWAL Bern, & UBA Wien (2010). *HBEFA. Handbuch für Emissionsfaktoren im Straßenverkehr*. Version 3.1. Bern, Heidelberg, Graz, Essen.
- Übereinkommen von Paris (2015). https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/paris_abkommen_bf.pdf.
- Umweltbundesamt. (2010). *CO₂-Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland: Mögliche Maßnahmen und ihre Minderungspotenziale (UBA-Texte)*. http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3773.
- Umweltbundesamt. (2013). *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2012*. Dessau-Roßlau.
- Umweltministerium Baden-Württemberg (Hg.). (2005). *Klimaschutz am Bodensee: Bilanz und Perspektiven*. Empfehlungen über Aktivitäten der Internationalen Bodenseekonferenz (IBK) bis 2010. www.bodenseekonferenz.org.
- unternehmenGOMS, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, S. u. L. (W.), & Ernst Basler + Partner AG (2007). *Energieregion Goms: Auf dem Weg zur ersten Energie Region der Schweizer Alpen. Münster-Geschinen, Birmensdorf & Zollikon*. www.energieregiongoms.ch

- Velte, D., Magro, E., & Jiménez, I. (2010). *ReRisk: Regions at Risk of Energy Poverty*. Applied Research 2013/1/5. ESPON.
- VKW Mobilität (2017). *VKW Mobilität unterstützt Sie auf dem Weg in eine nachhaltige und umweltschonende Mobilität*. <https://www.vkw.at/mobilitaet-privat.htm>.
- Vorarlberg. de.wikipedia.org/vorarlberg
- Vorarlberger Landtag. (2009). Energieautonomes Vorarlberg. Antrag gem. §12 GO.
- Warnach, W. (1971). Autarkie. In J. Ritter (Hg.). *Historisches Wörterbuch der Philosophie* (S. 685-690). Schwabe u. Co.
- Wildpoldsried.de. www.wildpoldsried.de.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) (2009). *Kassensturz für den Weltklimavertrag: Der Budgetansatz. Sondergutachten*. Berlin.
- Zahavi, Y., & Talavie, A. (1980). Regularities in Travel Time and Money Expenditures. *Transportation Research Record*, (750), 13-19.
- Ziesing, H.-J. (2006). Können wir uns die weitere weltweite Verkehrsexpansion noch leisten? *Informationen zur Raumentwicklung*, (8), 405-415.
- Zotz, T. (2012). Schwaben. In *Historisches Lexikon der Schweiz*, Bd. 11. Schwabe u. Co.

Anhang

Anhang 1:	Kategorien der Straßengüterverkehrsfahrzeuge	303
Anhang 2:	Eigenschaften verschiedener Kraftstoffe	304
Anhang 3:	Verbrauchs- und Emissionsfaktoren	305
Anhang 3.1:	Verbrauchs- und Emissionsfaktoren für Krafträder	305
Anhang 3.2:	Verbrauchs- und Emissionsfaktoren für PKW	306
Anhang 3.3:	Verbrauchs- und Emissionsfaktoren für Omnibusse	309
Anhang 3.4:	Verbrauchs- und Emissionsfaktoren für Leichte Straßengüterverkehrsfahrzeuge	310
Anhang 3.5:	Verbrauchs- und Emissionsfaktoren für Schwere Straßengüterverkehrsfahrzeuge	313
Anhang 4:	CO₂-Emissionen regionaler Strommixe	316

Anhang 1: Kategorien der Straßengüterverkehrsfahrzeuge

Kategorien (englisch) [1]	Kategorien (deutsch) [2]	Definitionen (deutsch) [2]
Goods road vehicle	Straßengüterverkehrsfahrzeug	„Ausschließlich oder vorrangig zur Güterbeförderung bestimmtes Straßenfahrzeug. Hierunter fallen: ▶ Ausschließlich oder vorrangig zur Güterbeförderung bestimmte Leichte Straßengüterverkehrsfahrzeuge mit einem Gesamtgewicht von bis zu 3.500 kg, z.B. Kleintransporter und Pick-Ups; ▶ ausschließlich oder vorrangig zur Güterbeförderung bestimmte Schwere Güterverkehrsfahrzeuge mit einem Gesamtgewicht von mehr als 3.500 kg; ▶ Zugmaschinen; ▶ für die Benutzung öffentlicher Straßen zugelassene Ackerschlepper.“
Light goods road vehicle	Leichte Straßengüterverkehrsfahrzeug	„Ausschließlich oder vorrangig zur Güterbeförderung bestimmtes Straßengüterverkehrsfahrzeug mit einem Gesamtgewicht von bis zu 3.500 kg. Eingeschlossen sind Kleintransporter mit einem Gesamtgewicht von bis zu 3.500 kg, die ausschließlich oder vorrangig zur Güterbeförderung dienen.“
Heavy goods road vehicle	Schweres Güterfahrzeug	„Ausschließlich oder vorrangig zur Güterbeförderung bestimmtes Straßengüterverkehrsfahrzeug mit einem Gesamtgewicht von mehr als 3.500kg“
Goods road motor vehicle	Straßengüterkraftfahrzeug	Sammelbegriff für einfache Güterkraftfahrzeuge (z. B. Lastkraftwagen) und kombinierte Güterkraftfahrzeuge (z. B. Lastzug aus LKW und Anhänger(n), Sattelzug aus Sattelschlepper mit Auflieger und ggf. zusätzlichem Anhänger).
Lorry / truck	Lastkraftwagen	Ausschließlich oder vorrangig zur Güterbeförderung bestimmtes starres Kraftfahrzeug
Road tractor	Zugmaschine	Ausschließlich oder vorrangig zum Ziehen von nichtmotorisierten Anhängern, insbesondere Sattelaufliegern, bestimmtes Straßenkraftfahrzeug. Ackerschlepper sind ausgeschlossen.

Quellen: [1] EUROSTAT, 2010a; [2] EUROSTAT, 2010b.

Anhang 2: Eigenschaften verschiedener Kraftstoffe

Kraftstoffart	Dichte	Brennwert		CO ₂ -Emissionen bei Verbrennung	
	[g/l]	[MJ/kg]	[MJ/l]	[kg/kg Kraftstoff]	[kg/l Kraftstoff]
Benzin	750	42,5	31,88	3,15	2,36
Diesel	840	42,8	35,95	3,15	2,65
Flüssiggas	570	46	24,8	2,88	1,64
Erdgas	0,75	45,8	0,03		
Palmmethylester PME (Malaysia)	870	37	32,19	0	0
E85 aus Zuckerrohr (Brasilien)	783	29	22,71	0	0
E85 aus europäischen Holzabfällen	783	29	22,71	0	0
Biogas (Schweizer Kompogas)	0,75	45,8	0,03	0	0

Quellen: [1] Althaus & Gauch, 2010; [2] Tuchschnid & Halder, 2010.

Anhang 3: Verbrauchs- und Emissionsfaktoren

Anhang 3.1: Verbrauchs- und Emissionsfaktoren für Krafträder

	Endenergieverbrauch		Strom	CO ₂ - Emissionen Betrieb
	Kraftstoff			
	[l/km]	[MJ/km]	[KWh/km]	[kg/km]
Deutschland				
Kraftrad Bestand				
Benzin [1]	0,0340	1,0839		0,0802
Elektrisch [1]			0,0305	0,0172
Kraftrad-Neuzulassung				
Benzin Neuzulassung [1]	0,0340	1,0839		0,0802
Elektrisch [1]			0,0305	0,0172
Österreich				
Kraftrad-Bestand				
Benzin [1]	0,0340	1,0839		0,0802
Elektrisch [1]			0,0305	0,0039
Kraftrad-Neuzulassung				
Benzin Neuzulassung [1]	0,0340	1,0839		0,0802
Elektrisch [1]			0,0305	0,0039
Schweiz				
Kraftrad-Bestand				
Benzin [1]	0,0340	1,0839		0,0802
Elektrisch [1]			0,0305	0,0037
Kraftrad-Neuzulassung				
Benzin Neuzulassung [1]	0,0340	1,0839		0,0802
Elektrisch [2]			0,0305	0,0037

Quellen: [1] UBA Berlin et al., 2010; [2] Althaus & Gauch, 2010) S.17, 29

Anhang 3.2: Verbrauchs- und Emissionsfaktoren für PKW

	Endenergieverbrauch		CO ₂ - Emissionen Betrieb
	Kraftstoff	Strom	
	[l/km]	[MJ/km]	[KWh/ km]
Deutschland			
PKW Bestand			
Benzin [1]	0,0760	2,4229	0,1794
Diesel [1]	0,0588	2,1139	0,1558
Flüssiggas [5,6]	0,0890	2,2072	0,1460
Erdgas [2,3]	63,0000	1,8900	0,1220
Elektrisch [2]			0,2000
Hybrid [2]	0,0490	1,5621	0,1156
Wasserstoff (Brennstoffzelle) [7]		1,1000	0,0000
PKW Neuzulassung			
Benzin Neuzulassung [2]	0,0680	2,1678	0,1605
Diesel Neuzulassung [2]	0,0490	1,7616	0,1299
Biodiesel [2]	0,0544	1,7511	0,0000
Flüssiggas [5,6]	0,0890	2,2072	0,1460
Erdgas [2,3]	63,0000	1,8900	0,1220
Biogas [2]	63,0000	1,8900	0,0000
E85 aus Zuckerrohr (Brasilien) [2,4]	0,0807	1,8327	0,0286
E85 aus europäischen Holzabfällen [2,4]	0,0807	1,8327	0,0286
Elektrisch [2]			0,2000
Plug-In Hybrid [2]	0,0098	0,3124	0,1600
Hybrid [2]	0,0490	1,5621	0,1156
Wasserstoff (Brennstoffzelle) [7]		1,1000	0,0000

	Endenergieverbrauch		CO ₂ -	
			Emissionen	
	Kraftstoff	Strom	Betrieb	
	[l/km]	[MJ/km]	[KWh/km]	[kg/km]
Österreich				
PKW Bestand				
Benzin [1]	0,0742	2,3655		0,1751
Diesel [1]	0,0559	2,0096		0,1481
Flüssiggas [5,6]	0,0890	2,2072		0,1460
Erdgas [2]	63,0000	1,8900		0,1220
Elektrisch [2]			0,2000	0,0258
Hybrid [2]	0,0490	1,5621		0,1156
Wasserstoff (Brennstoffzelle) [7]		1,1000		0,0000
PKW Neuzulassung				
Benzin Neuzulassung [2]	0,0680	2,1678		0,1605
Diesel Neuzulassung [2]	0,0490	1,7616		0,1299
Biodiesel [2]	0,0544	1,7511		0,0000
Flüssiggas [5,6]	0,0890	2,2072		0,1460
Erdgas [2]	63,0000	1,8900		0,1220
Biogas [2]	63,0000	1,8900		0,1220
E85 aus Zuckerrohr (Brasilien) [2]	0,0807	1,8327		0,0286
E85 aus europäischen Holzabfällen [2]	0,0807	1,8327		0,0286
Elektrisch [2]			0,2000	0,0258
Plug-In Hybrid [2]	0,0098	0,3124	0,1600	0,0438
Hybrid [2]	0,0490	1,5621		0,1156
Wasserstoff (Brennstoffzelle) [7]		1,1000		0,0000

	Endenergieverbrauch			CO ₂ -Emissionen
	Kraftstoff		Strom	Betrieb
	[l/km]	[MJ/km]	[KWh/km]	[kg/km]
Schweiz				
PKW Bestand				
Benzin [1]	0,0849	2,7066		0,2004
Diesel [1]	0,0633	2,2756		0,1677
Flüssiggas [5,6]	0,0890	2,2072		0,1460
Erdgas [2]	63,0000	1,8900		0,1220
Elektrisch [2]			0,2000	0,0244
Hybrid [2]	0,0490	1,5621		0,1156
Wasserstoff (Brennstoffzelle) [7]		1,1000		0,0000
PKW Neuzulassung				
Benzin Neuzulassung [2]	0,0680	2,1678		0,1605
Diesel Neuzulassung [2]	0,0490	1,7616		0,1299
Biodiesel [2]	0,0544	1,7511		0,0000
Flüssiggas [5,6]	0,0890	2,2072		0,1460
Erdgas [2]	63,0000	1,8900		0,1220
Biogas [2]	63,0000	1,8900		0,0000
E85 aus Zuckerrohr (Brasilien) [2]	0,0807	1,8327		0,0286
E85 aus europäischen Holzabfällen [2]	0,0807	1,8327		0,0286
Elektrisch [2]			0,2000	0,0244
Plug-In Hybrid [2]	0,0098	0,3124	0,1600	0,0426
Hybrid [2]	0,0490	1,5621		0,1156
Wasserstoff (Brennstoffzelle) [7]		1,1000		0,0000

Quellen: [1] UBA Berlin et al., 2010; [2] Althaus und Gauch, 2010 S.17, 29; [3] Tuchschnid und Halder, 2010; [4] Eigene Berechnung; [5] ADAC Autotest, 2011; [6] Autogas, 2020; [7] ADAC Autotest, 2019.

Anhang 3.3: Verbrauchs- und Emissionsfaktoren für Omnibusse

	Endenergieverbrauch		CO ₂ - Emissionen Betrieb	
	Kraftstoff	Strom		
	[l/km]	[MJ/km]	[kWh/km]	[kg/km]
Deutschland				
Omnibus-Bestand				
Diesel [1]	0,42	15,26		1,0020
Elektrisch [2]			1,2000	0,6756
Omnibus-Neuzulassung				
Diesel Neuzulassung [1]	0,42	15,26		1,0020
Elektrisch [2]			1,2000	0,6756
Österreich				
Omnibus-Bestand				
Diesel [1]	0,42	15,2635		1,0020
Elektrisch [2]			1,2000	0,1548
Omnibus-Neuzulassung				
Diesel Neuzulassung [1]	0,42	15,2635		1,0020
Elektrisch [2]			1,2000	0,1548
Schweiz				
Omnibus-Bestand				
Diesel [1]	0,42	15,2635		1,0020
Elektrisch [2]			1,2000	0,1464
Omnibus-Neuzulassung				
Diesel Neuzulassung [1]	0,42	15,2635		1,0020
Elektrisch [2]			0,0305	0,0037

Quellen: [1] UBA Berlin et al. 2010; [2] Althaus und Gauch, 2010 S.17, 29.

Anhang 3.4: Verbrauchs- und Emissionsfaktoren für Leichte Straßengüterverkehrsfahrzeuge

	Endenergieverbrauch		CO ₂ - Emissionen Betrieb
	Kraftstoff	Strom	
	[l/km]	[MJ/km]	[KWh/km]
Deutschland			
Leichte SGF Bestand			
Benzin [1]	0,0829	2,6429	0,1956
Diesel [1]	0,0871	3,1312	0,2308
Erdgas [2,3]	75,6000	2,2680	0,1220
Elektrisch [2]			0,2000
Hybrid [2]	0,0588	1,8745	0,1388
Leichte SGF Neuzulassung			
Benzin Neuzulassung [2]	0,0829	2,6429	0,1956
Diesel Neuzulassung [2]	0,0871	3,1312	0,2308
Biodiesel [2]	0,0653	2,1014	0,0000
Erdgas [2,3]	75,6000	2,2680	0,1220
Biogas [2]	75,6000	2,2680	0,0000
E85 aus Zuckerrohr (Brasilien) [2,4]	0,0968	2,1992	0,0343
E85 aus europäischen Holzabfällen [2,4]	0,0968	2,1992	0,0343
Elektrisch [2]			0,2000
Plug-In Hybrid [2]	0,0118	0,3749	0,1600
Hybrid [2]	0,0588	1,8745	0,1388

	Endenergieverbrauch		CO ₂ - Emissionen Betrieb
	Kraftstoff	Strom	
	[l/km]	[MJ/km]	[KWh/km]
Österreich			
Leichte SGF Bestand			
Benzin [1]	0,0883	2,8150	0,2084
Diesel [1]	0,0798	2,8688	0,2115
Erdgas [2]	63,0000	1,8900	0,1220
Elektrisch [2]			0,2000
Hybrid [2]	0,0490	1,5621	0,1156
Leichte SGF Neuzulassung			
Benzin Neuzulassung [2]	0,0883	2,8150	0,2084
Diesel Neuzulassung [2]	0,0798	2,8688	0,2115
Biodiesel [2]	0,0653	2,1014	0,0000
Erdgas [2]	75,6000	2,2680	0,1220
Biogas [2]	75,6000	2,2680	0,1220
E85 aus Zuckerrohr (Brasilien) [2]	0,0968	2,1992	0,0343
E85 aus europäischen Holzabfällen [2]	0,0968	2,1992	0,0343
Elektrisch [2]			0,2000
Plug-In Hybrid [2]	0,0118	0,3749	0,1600
Hybrid [2]	0,0588	1,8745	0,1388

	Endenergieverbrauch		CO ₂ - Emissionen Betrieb
	Kraftstoff	Strom	
	[l/km]	[MJ/km]	[KWh/km]
Schweiz			
Leichte SGF Bestand			
Benzin [1]	0,0965	3,0764	0,2277
Diesel [1]	0,0905	3,2535	0,2398
Erdgas [2]	75,6000	2,2680	0,1220
Elektrisch [2]		0,2000	0,0244
Hybrid [2]	0,0588		0,1388
Leichte SGF Neuzulassung			
Benzin Neuzulassung [2]	0,0965		0,2277
Diesel Neuzulassung [2]	0,0905		0,2398
Biodiesel [2]	0,0653		0,0000
Erdgas [2]	75,6000		0,1220
Biogas [2]	75,6000		0,0000
E85 aus Zuckerrohr (Brasilien) [2]	0,0968		0,0343
E85 aus europäischen Holzabfällen [2]	0,0968		0,0343
Elektrisch [2]		0,2000	0,0244
Plug-In Hybrid [2]	0,0118	0,1600	0,0473
Hybrid [2]	0,0588		0,1388

Quellen: [1] UBA Berlin et al., 2010; [2] Althaus und Gauch, 2010, S.17, 29;
[3] Tuchschnid und Halder, 2010; [4] Eigene Berechnung.

Anhang 3.5: Verbrauchs- und Emissionsfaktoren für Schwere Straßengüter-
verkehrsfahrzeuge

	Endenergieverbrauch		CO ₂ - Emissionen Betrieb
	Kraftstoff	Strom	
	[l/km]	[MJ/km]	[KWh/km]
Deutschland			
Schwere SGF Bestand			
Benzin [1]			
Diesel [1]	0,2704	9,7209	0,7166
Erdgas [2,3]		13,7400	0,7694
Elektrisch [2]			1,1000
Hybrid [2]			0,6193
Schwere SGF Neuzulassung			
Benzin Neuzulassung [2]			
Diesel Neuzulassung [2]	0,2704	9,7209	0,7166
Biodiesel [2]			
Erdgas [2,3]		13,7400	0,7694
Biogas [2]			
E85 aus Zuckerrohr (Brasilien) [2,4]			
E85 aus europäischen Holzabfällen [2,4]			
Elektrisch [2]			1,1000
Plug-In Hybrid [2]			0,6193
Hybrid [2]			

	Endenergieverbrauch		CO ₂ - Emissionen Betrieb
	Kraftstoff	Strom	
	[l/km]	[MJ/km]	[KWh/km]
Österreich			
Schwere SGF Bestand			
Benzin [1]			
Diesel [1]	0,3029	10,8893	0,8027
Erdgas [2]		13,7400	0,7694
Elektrisch [2]			1,1000
Hybrid [2]			0,1419
Schwere SGF Neuzulassung			
Benzin Neuzulassung [2]			
Diesel Neuzulassung [2]	0,3029	10,8893	0,8027
Biodiesel [2]			
Erdgas [2]		13,7400	0,7694
Biogas [2]			
E85 aus Zuckerrohr (Brasilien) [2]			
E85 aus europäischen Holzabfällen [2]			
Elektrisch [2]			1,1000
Plug-In Hybrid [2]			0,1419
Hybrid [2]			

	Endenergieverbrauch		CO ₂ - Emissionen Betrieb
	Kraftstoff	Strom	
	[l/km]	[MJ/km]	[KWh/km]
Schweiz			
Schwere SGF Bestand			
Benzin [1]			
Diesel [1]	0,2949	10,6017	0,7815
Erdgas [2]		13,7400	0,7694
Elektrisch [2]			1,1000
Hybrid [2]			0,1342
Schwere SGF Neuzulassung			
Benzin Neuzulassung [2]			
Diesel Neuzulassung [2]	0,2949	10,6017	0,7815
Biodiesel [2]			
Erdgas [2]		13,7400	0,7694
Biogas [2]			
E85 aus Zuckerrohr (Brasilien) [2]			
E85 aus europäischen Holzabfällen [2]			
Elektrisch [2]			1,1000
Plug-In Hybrid [2]			0,1342
Hybrid [2]			

Quellen : [1] UBA Berlin et al., 2010; [2] Althaus und Gauch, 2010, S.17, 29;
[3] Tuchschnid und Halder, 2010; [4] Eigene Berechnung.

Anhang 4: CO₂-Emissionen regionaler Strommixe

	CO ₂ -Emissionen [g/kWh]
Deutschland	563
Österreich	129
Schweiz	122

Quellen: E-Control, 2013; Umweltbundesamt (UBA), 2013, S. 2;
Frischknecht et al., 2012, V1.4 Egal-Strommix.

In der Arbeit wird am Beispiel der Bodenseeregion diskutiert, ob und unter welchen Voraussetzungen sich der Verkehrsenergiebedarf einer Region vollständig aus heimischen, erneuerbaren Quellen decken lässt.

Hierfür werden mehrere Szenarien entwickelt. Es kann gezeigt werden, dass eine vollständige Dekarbonisierung des Verkehrssystems möglich ist, wenn in den nächsten 5 bis spätestens 10 Jahren die dafür notwendigen Rahmenbedingungen geschaffen werden. Auch eine Deckung des Verkehrsenergiebedarfs mit erneuerbaren Energieträgern aus der Region erscheint unter sehr günstigen Rahmenbedingungen möglich.