# Regionale Verteilungswirkung der Energiewende

**Eine modellbasierte Analyse möglicher Effekte auf Wertschöpfung und Beschäftigung**

**Luisa Sievers**

**Vollständiger Abdruck der an der**
**Fakultät für Wirtschafts- und Organisationswissenschaften der**
**Universität der Bundeswehr München**
**zur Erlangung des akademischen Grades eines**

**Doktors der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften (Dr. rer. pol.)**

**genehmigten Dissertation**

Gutachter:
1. Univ.-Prof. Dr. Axel Schaffer
2. Prof. Dr. Rainer Walz

Die Dissertation wurde am 31.03.2020 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Wirtschafts- und Organisationswissenschaften am 21.07.2020 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 28.10.2020 statt.

## Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI in Karlsruhe. Viele Personen haben mich in dieser Zeit auf vielfältige Art begleitet und unterstützt. Ihnen allen möchte ich ganz herzlich danken.

Ein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Prof. Axel Schaffer, Inhaber des Lehrstuhls für Wandel und Nachhaltigkeit an der Universität der Bundeswehr in München, für das entgegengebrachte Vertrauen und viele wertvolle Anregungen. Prof. Rainer Walz, dem stellvertretenden Leiter des Fraunhofer ISI, danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens und seine fachlichen Impulse. Für ihre stete Offenheit und die ganzheitliche Unterstützung bedanke ich mich herzlich bei meiner Mentorin Barbara Breitschopf. Ich danke meinem Geschäftsfeldleiter Claus Doll, für das Schaffen von Freiräumen und seinen darüberhinausgehenden Einsatz für das Gelingen dieser Arbeit.

Bei meinen Kolleginnen und Kollegen am Fraunhofer ISI bedanke ich mich für die fachlichen Diskussionen ebenso wie für die mir entgegengebrachte Wertschätzung und die vielen gemeinsamen stärkenden Auszeiten. Insbesondere Matthias Pfaff möchte ich für den intensiven inhaltlichen Austausch und seine Hilfsbereitschaft danken. Bei Michael Krail bedanke ich mich für die Einführung in die systemdynamische Modellierung, bei Benjamin Pfluger für die Bereitstellung und Erläuterung von Daten zu den Szenarien.

Meinen Freunden und insbesondere meiner Familie danke ich von Herzen. Durch sie habe ich viel Verständnis, Ermutigung und Unterstützung erfahren. Meine Eltern Anita und Johannes Müller haben sich immer dafür eingesetzt, dass ich meine Ziele verfolgen konnte und mir Werte vermittelt, die mich auch zu dieser Arbeit inspiriert haben. Die liebevolle Kinderbetreuung durch meine Mutter schaffte wichtige zeitliche Freiräume. Mein Mann Sven war stets für mich da und seine Unterstützung von unschätzbarem Wert. Die gemeinsame Zeit mit ihm und meinen Kindern Arndt und Frieda verhalf mir zum nötigen Perspektivwechsel und war und ist eine wunderbare Kraftquelle.

Luisa Sievers

## Abstract

Greenhouse gases must be reduced worldwide in order to limit climate change. To achieve this, far-reaching changes in both the provision and consumption of energy are necessary. This also applies to Germany. The structural change associated with the energy transition affects the distribution of value added and income across industries , regions and households.

The aim of this dissertation is to estimate the potential future impacts of the energy transition on employment and value added as well as its distribution across regions and industries. For this purpose, a novel economic impact assessment model for Germany is developed and linked to existing energy models. The model contains a detailed representation of the German economy, including regional economic structures, which it links with economic activities arising from the physical consumption and supply of energy. In order to determine the effects on employment and value added, an energy transition scenario is compared to a reference scenario, which describes the socio-economic framework conditions and a status-quo development of the energy system. The energy transition scenario is designed in such a way that key political goals in terms of energy efficiency, renewable energies and greenhouse gas emission reduction are achieved. The scenario impulses relate to electricity, heating and transport.

The model results show an overall slightly positive macroeconomic impact of the energy transition, with a varying distribution of positive and negative effects across industries. The main drivers behind this economic growth are additional investments that are primarily due to measures in buildings. The substitution of imported fossil fuels with domestic renewable energy production also has a positive impact on the economy. The biggest relative increases in value added occur in construction, real estate and electricity generation; the biggest decrease is in mining of lignite.

All federal states benefit from positive impacts on value added and employment. The results show that, in particular, the less productive economies of the northern and eastern German states benefit above average, while the more productive western and southern states show a below-average increase. The transformation in the electricity sector entails the widest range of impacts on regional value added and employment and thus contributes significantly to the distribution of the overall effects. The effects of the transformation in the heating and transport sectors, on the other hand, are more evenly distributed among the regions. They contribute significantly to the positive macroeconomic impact.

For two federal states, the impacts on value added are analysed in more detail. These federal states show differences in their energy technology mix, which implies different im-

pacts of the measures portrayed in the energy transition scenario. Further, they vary in several characteristics that are relevant for their share in national value added, including population size and economic structure. The comparison enables a more precise understanding of regional distribution effects.

Overall, the model results indicate that the energy system transformation will not have any negative macroeconomic effects. The positive effects in many industries offset the negative effects in a few industries. Moreover, the energy transition could contribute positively to regional convergence without the negative effects dominating even one region. The work concludes with recommendations on how best to exploit the opportunities identified and reduce possible risks.

## Zusammenfassung

Die Treibhausgase müssen weltweit reduziert werden, um den Klimawandel zu begrenzen. Hierfür sind auch in Deutschland weitreichende Änderungen sowohl bei der Bereitstellung als auch beim Verbrauch von Energie nötig. Der mit der Energiewende einhergehende strukturelle Wandel verändert die Verteilung von Wertschöpfung und Einkommen auf Wirtschaftsbereiche, Regionen und Haushalte.

Ziel dieser Arbeit ist es die mögliche zukünftige Wirkung der Energiewende auf Beschäftigung und Wertschöpfung und deren Verteilung auf Regionen und Wirtschaftsbereiche abzuschätzen. Hierfür wird ein Modell zur ökonomischen Folgenabschätzung mit einer Schnittstelle zu bestehenden Energiemodellen entwickelt. Das Modell enthält eine detaillierte Darstellung der deutschen Wirtschaft einschließlich der regionalen Wirtschaftsstrukturen und verknüpft diese mit wirtschaftlichen Aktivitäten, die sich aus dem Verbrauch und der Versorgung mit Energie ergeben. Um die Auswirkungen auf Wertschöpfung und Beschäftigung zu ermitteln, wird ein Energiewendeszenario mit einem Referenzszenario verglichen, das die Status-quo-Entwicklung des Energiesystems beschreibt. Das Energiewendeszenario ist so ausgestaltet, dass zentrale politische Ziele in Bezug auf Energieeffizienz, erneuerbare Energien und Treibhausgaseinsparungen erreicht werden. Die Impulse des Szenarios beziehen sich auf Strom, Wärme und Verkehr.

Die Ergebnisse zeigen eine leicht positive gesamtwirtschaftliche Wirkung der Energiewende. Haupttreiber sind hierbei zusätzliche Investitionen insbesondere im Gebäudebereich, darüber hinaus wirkt sich auch die Substitution importierter fossiler Energieträger durch heimisch erzeugte Erneuerbare Energie positiv aus. Hinsichtlich der Verteilung auf die Wirtschaftsbereiche gibt es positive und negative Effekte: Während der Kohleabbau stark negativ betroffen ist, wirkt sich die Energiewende insbesondere auf Elektrizitätsversorgung, Baugewerbe und Grundstücks- und Wohnungswesen positiv aus.

Alle Bundesländer verzeichnen positive Effekte auf Wertschöpfung und Beschäftigung durch die Energiewende. Die Ergebnisse zeigen, dass vor allem die weniger produktiven Volkswirtschaften der nord- und ostdeutschen Bundesländer überdurchschnittlich profitieren, während die produktiveren westlichen und südlichen Bundesländer eine unterdurchschnittliche Zunahme verzeichnen. Die Transformation im Stromsektor führt zur größten Bandbreite an Effekten auf die regionale Wertschöpfung und Beschäftigung und trägt so wesentlich zur Verteilung der Gesamteffekte bei. Die Effekte der Veränderungen im Wärme- und Verkehrssektor sind hingegen gleichmäßiger verteilt und tragen wesentlich zum positiven gesamtwirtschaftlichen Niveau bei.

Für zwei exemplarisch gewählte Bundesländer werden die Wertschöpfungseffekte detailliert ausgewertet. Diese Bundesländer unterscheiden sich zum einen hinsichtlich ihrer Stromerzeugung, was zu abweichenden direkt regional zugewiesenen Effekten durch die Energiewende führt. Zum anderen weichen sie in mehreren Aspekten, die relevant für ihren Anteil an der nationalen Wertschöpfung sind, von einander ab, zum Beispiel in Bezug auf ihre Einwohnerzahl und ihre Wirtschaftsstruktur. Der Vergleich ermöglicht ein präziseres Verständnis für die regionalen Verteilungseffekte.

Insgesamt deuten die Modellergebnisse darauf hin, dass die Energiewende keine negativen gesamtwirtschaftlichen Wirkungen mit sich bringt. Negative Wirkungen in wenigen Wirtschaftsbereichen werden von positiven Wirkungen in anderen Wirtschaftsbereichen ausgeglichen. Darüber hinaus kann die Energiewende zur Konvergenz der Regionen beitragen, ohne dass auch nur in einer Region die negativen Wirkungen dominieren. Die Handlungsempfehlungen am Schluss der Arbeit machen deutlich, dass es wichtig ist, den Strukturwandel aktiv anzugehen, um die aufgezeigten Chancen nutzen und mögliche Risiken reduzieren zu können.

# Inhaltsverzeichnis


**1. Einführung** **1**

1.1. Motivation . . . . . 1
1.2. Klassifizierung von Verteilungseffekten . . . . . 6
1.3. Theoretische Perspektive auf die gesamtwirtschaftliche Wirkung der Energiewende . . . . . 8
1.4. Modellierung der Gesamtwirtschaftlichen Wirkung der Energiewende . . . . 11
1.5. Vorgehen und Struktur der Arbeit . . . . . 16

**2. Szenarien** **21**

2.1. Sozioökonomischer Rahmen . . . . . 21
2.1.1. Demographische Entwicklung . . . . . 21
2.1.2. Ökonomische Entwicklung . . . . . 22
2.1.3. Energie- und $CO_2$-Preise . . . . . 23
2.2. Politischer Rahmen . . . . . 30
2.2.1. Referenzszenario . . . . . 30
2.2.2. Energiewendeszenario . . . . . 30
2.3. Modellierung von Energieangebot und -nachfrage . . . . . 31
2.3.1. Energiemodelle . . . . . 31
2.3.2. Ergebnisse der Modellierung von Energieangebot und -nachfrage . . 34
2.4. Einordnung des Energiewendeszenarios . . . . . 44

**3. Impulse** **47**

3.1. Übersicht . . . . . 47
3.2. Nationale Impulse mit regionaler Zuweisung . . . . . 51
3.2.1. Stromerzeugung: Investitionen . . . . . 51
3.2.2. Stromerzeugung: bezogene Vorleistungen, Wertschöpfung und Arbeitskräftebedarf . . . . . 67
3.3. Nationale Impulse ohne regionale Zuweisung . . . . . 81
3.3.1. Stromerzeugung: Investitionen in Netze . . . . . 81
3.3.2. Stromerzeugung: gelieferte Vorleistungen . . . . . 82

3.3.3. Stromerzeugung: Konsum . . . 82
3.3.4. Energie: gelieferte Vorleistungen . . . 83
3.3.5. Energieeffiziente Technologien: zusätzlicher Konsum . . . 86
3.3.6. Energieeffiziente Technologien: zusätzliche Investitionen . . . 86
3.3.7. Baugewerbe: zusätzliche Investitionen . . . 86
3.3.8. Grundstücks- und Wohnungswesen: zusätzlicher Konsum . . . 86
3.3.9. Grundstücks- und Wohnungswesen: bezogene Vorleistungen . . . 87
3.3.10. Grundstücks- und Wohnungswesen: Arbeitskräftebedarf . . . 87
3.3.11. Heizenergie: Konsum . . . 88
3.3.12. Kraftstoffe: Konsum . . . 88
3.3.13. Kraftstoffe: gelieferte Vorleistungen . . . 88
3.3.14. Fahrzeuge: zusätzlicher Konsum . . . 89
3.3.15. Fahrzeuge: zusätzliche Investitionen . . . 89
3.3.16. Verkehrsinfrastruktur: zusätzliche Investitionen . . . 90
3.4. Zusammenfassung der ökonomischen Impulse . . . 90

**4. Makroökonomischer Kern** **93**
4.1. Überblick . . . 93
4.2. Methodische Grundlagen des Modells . . . 95
4.2.1. Input-Output-Rechnung . . . 96
4.2.2. System Dynamics . . . 98
4.3. Formelle Beschreibung des Modells . . . 98
4.4. Endnachfrage . . . 100
4.4.1. Privater Konsum . . . 100
4.4.2. Investitionen . . . 102
4.4.3. Staatskonsum . . . 104
4.4.4. Exporte . . . 105
4.5. Input-Output . . . 107
4.5.1. Sekundäre Inputs . . . 107
4.5.2. Primäre Inputs . . . 110
4.5.3. Schließung des Modells . . . 112
4.6. Beschäftigung . . . 113
4.7. Importe . . . 114
4.8. Bruttoinlandsprodukt . . . 115
4.9. Abschließende Bemerkung . . . 115

**5. Regionale Verteilung** **117**
5.1. Regionale und sektorale Granularität . . . 117
5.2. Modellierungsansatz . . . 119
5.3. Bruttowertschöpfung aus direkt regional zugewiesenen Impulsen . . . 120
5.4. Top-down-Verteilung . . . 121
5.4.1. Status Quo . . . 121
5.4.2. Dynamik . . . 122
5.5. Berechnung der regionalen Verteilungswirkung . . . 124

**6. Ergebnisse und Diskussion** **127**
6.1. Gesamtwirtschaftliche Effekte und Verteilung auf Wirtschaftsbereiche . . . 127
6.2. Regionale Verteilung der Effekte . . . 133
6.2.1. Wertschöpfung . . . 133
6.2.2. Beschäftigung . . . 137
6.2.3. Verteilungswirkung . . . 140
6.3. Detaillierte Analyse für zwei exemplarische Regionen . . . 143
6.3.1. Regionale Verteilung der Bottom-up-Impulse . . . 143
6.3.2. Top-down-Verteilung von Wertschöpfung . . . 147
6.3.3. Regionale und sektorale Wertschöpfung inklusive Bottom-up-Impulse 151

**7. Zusammenfassung und Ausblick** **153**
7.1. Zusammenfassung . . . 153
7.2. Kritische Würdigung und methodischer Ausblick . . . 155
7.3. Schlussfolgerungen . . . 159

**A. Anhang** **179**
A.1. Systematik der Gebietseinheiten . . . 179
A.2. Klassifikation der Wirtschaftszweige . . . 181
A.3. Bruttowertschöpfung nach Wirtschaftsunterabschnitten und Bundesländern 183
A.4. Zugebaute Stromerzeugungskapazitäten nach Technologien und Regionen . 185
A.5. Stillgelegte Stromerzeugungskapazitäten nach Technologien und Regionen . 192
A.6. Installierte Stromerzeugungskapazitäten nach Technologien und Regionen . 199
A.7. Investitionen in Stromerzeugungsanlagen nach Technologien und Regionen . 209
A.8. Inputs für die Stromerzeugung nach Technologien und Regionen . . . 216

# Abbildungsverzeichnis

1.1. Schematische Darstellung des Modellierungsansatzes . . . . . 17

2.1. Bevölkerung je Bundesland in Millionen Personen von 2010 bis 2030 . . . . 22
2.2. Bruttoinlandsprodukt in Milliarden Euro von 1995 bis 2030 . . . . . 24
2.3. Entwicklung der Bruttowertschöpfung je Wirtschaftsunterabschnitt in Milliarden Euro im Referenzszenario von 2010 bis 2030 . . . . . 25
2.4. Bruttowertschöpfung je Bundesland in Milliarden Euro im Referenzszenario von 2010 bis 2030 . . . . . 26
2.5. Bruttowertschöpfung je Bundesland und Wirtschaftsabschnitt in Milliarden Euro in 2010 . . . . . 27
2.6. Brennstoffpreise in Euro je MWh von 2010 bis 2030 und $CO_2$-Preise des Referenz- und Energiewendeszenarios in Euro je Tonne von 2010 bis 2030 . 28
2.7. Strompreise in Euro je MWh von 2010 bis 2030 in Referenz- und Energiewendeszenario unterschieden nach Haushalten, Dienstleistungsbereichen, Industrie und stromintensiver Industrie . . . . . 29
2.8. Endenergieverbrauch der Industrie in TWh von 2010 bis 2030 in Referenz- und Energiewendeszenario unterschieden nach Energieträgern . . . . . 34
2.9. Stromnachfrage in TWh von 2010 bis 2030 in Referenz- und Energiewendeszenario unterschieden nach Industrie, Haushalten, Dienstleistungsbereichen, Verkehr und Gebäudewärme . . . . . 35
2.10. Installierte Stromerzeugungskapazität aus fossilen Energieträgern und Kernenergie in MW nach Bundesländern . . . . . 38
2.11. Installierte Stromerzeugungskapazität aus erneuerbaren Energien in MW nach Bundesländern . . . . . 39
2.12. Stromerzeugung in TWh nach Technologien für das Jahr 2013, sowie für die Jahre 2020 und 2030 des Referenz- und des Energiewendeszenarios . . . 41
2.13. Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser von Haushalten und GHD in TWh von 2010 bis 2030 in Referenz- und Energiewendeszenario differenziert nach Energieträgern . . . . . 42

2.14. Energiebedarf im Verkehr in TWh von 2010 bis 2030 in Referenz- und Energiewendeszenario . . . . . 43

3.1. Transformation der Impulse . . . . . 53
3.2. Endnachfrageimpulse in Mio Euro . . . . . 91

4.1. Schema des makroökonomischen Kerns . . . . . 94
4.2. Schematische Darstellung einer Input-Output-Tabelle . . . . . 97

5.1. Schema des regionalökonomischen Modellierungsansatzes . . . . . 120

6.1. Abweichung der Wertschöpfung pro Wirtschaftsabschnitt im Energiewendeszenario im Vergleich zum Referenzszenario in 2030 als Gesamteffekt und differenziert für die Handlungsfelder Strom, Wärme und Verkehr . . . . . 129
6.2. Abweichung der Beschäftigung pro Wirtschaftsabschnitt im Energiewendeszenario im Vergleich zum Referenzszenario in 2030 als Gesamteffekt und differenziert für die Handlungsfelder Strom, Wärme und Verkehr . . . . . 130
6.3. Abweichung der Wertschöpfung nach Regionen im Energiewendeszenario im Vergleich zur Referenz in 2030 . . . . . 135
6.4. Kartographische Darstellung der Abweichung der Wertschöpfung nach Regionen im Energiewendeszenario im Vergleich zur Referenz in 2030 . . . . . 136
6.5. Abweichung des Arbeitskräftebedarfs nach Regionen im Energiewendeszenario im Vergleich zur Referenz in 2030 . . . . . 138
6.6. Kartographische Darstellung der Abweichung des Arbeitskräftebedarfs nach Regionen im Energiewendeszenario im Vergleich zur Referenz in 2030 . . . . 139
6.7. Relative Abweichung der Wertschöpfung im Energiewendeszenario im Vergleich zur Referenz in 2030 je Region. Regionen geordnet nach Wertschöpfung pro Kopf im Jahr 2010. . . . . 141
6.8. Kartographische Darstellung der Bruttowertschöpfung pro Kopf in 2010 und der relativen Abweichung der Wertschöpfung im Energiewendeszenario im Vergleich zur Referenz in 2030 . . . . . 142
6.9. Den Regionen Mecklenburg-Vorpommern und Nordrhein-Westfalen direkt zugewiesene Nachfrage nach Vorleistungen und Investitionsgütern und direkt zugewiesene Wertschöpfung aus der Stromerzeugung . . . . . 148
6.10. Direkt Mecklenburg-Vorpommern und Nordrhein-Westfalen zugewiesene Wertschöpfung: Absolute Abweichung zwischen Energiewendeszenario und Referenzszenario im Jahr 2030 in Mio Euro . . . . . 151

6.11. Aggregierte Wertschöpfung in Mecklenburg-Vorpommern und Nordrhein-Westfalen: Relative Abweichung zwischen Energiewendeszenario und Referenzszenario im Jahr 2030 in Prozent . . . . . 152

A.1. Deutschland NUTS2 Regionen . . . . . 179
A.2. Bruttowertschöpfung je Bundesland und Wirtschaftsabschnitt in Milliarden Euro in 2020 . . . . . 183
A.3. Bruttowertschöpfung je Bundesland und Wirtschaftsabschnitt in Milliarden Euro in 2030 . . . . . 184

# Tabellenverzeichnis

2.1. Klimapolitische Ziele der Bundesregierung . . . . . 30

3.1. Inputs aus den Energiemodellen und transformierter ökonomischer Impuls . 47
3.2. Zusammenfassung der Variablen zur Beschreibung der Transformation der Inputs aus den Energiemodellen in ökonomische Impulse . . . . . 50
3.3. Stromerzeugungstechnologien im makroökonomischen Modell . . . . . 51
3.4. Investitionsstruktur PV-Aufdachanlagen . . . . . 56
3.5. Investitionsstruktur PV-Freiflächenanlagen . . . . . 57
3.6. Zuordnung der Investitionen in PV-Anlagen zu Gütergruppen . . . . . 57
3.7. Hersteller von Komponenten für PV-Anlagen . . . . . 58
3.8. Investitionsstruktur Onshore-Windenergieanlagen . . . . . 61
3.9. Hersteller Onshore-Windenergieanlagen . . . . . 62
3.10. Investitionsstruktur Offshore-Windenergieanlagen . . . . . 63
3.11. Hersteller Offshore-Windenergieanlagen . . . . . 63
3.12. Investitionsstruktur Stromerzeugung aus fossilen Energiequellen . . . . . 64
3.13. Investitionen in Stromerzeugungstechnologien nach Wirtschaftsbereichen . . 65
3.14. Investitionen in Stromerzeugungsanlagen nach Regionen . . . . . 66
3.15. Fixe Betriebskosten, Arbeitskräftebedarf und Wertschöpfung nach Stromerzeugungstechnologien . . . . . 74
3.16. Auslastung, variable Betriebskosten, Brennstoffkosten und $CO_2$-Kosten nach Stromerzeugungstechnologien . . . . . 75
3.17. Vorleistungen für die Stromerzeugung mit PV-Aufdachanlagen . . . . . 76
3.18. Vorleistungen für die Stromerzeugung mit PV-Freiflächenanlagen . . . . . 76
3.19. Vorleistungen für die Stromerzeugung aus Onshore-Wind . . . . . 76
3.20. Vorleistungen für die Stromerzeugung aus Offshore-Wind . . . . . 76
3.21. Vorleistungen für die Stromerzeugung aus Wasserkraft . . . . . 76
3.22. Vorleistungen für die Stromerzeugung aus Biomasse . . . . . 77
3.23. Vorleistungen für die Stromerzeugung aus Braunkohle . . . . . 77
3.24. Vorleistungen für die Stromerzeugung aus Steinkohle . . . . . 77
3.25. Vorleistungen für die Stromerzeugung aus Erdgas . . . . . 77

3.26. Vorleistungen für die Stromerzeugung aus Kernenergie . . . . . 78
3.27. Inputs für die Stromerzeugung nach Gütergruppen und Wertschöpfungselementen . . . . . 79
3.28. Inputs für die Stromerzeugung nach Regionen . . . . . 80
3.29. Investitionen in Stromnetze: Abweichungen zwischen Energiewendeszenario und Referenzszenario . . . . . 81
3.30. Produktionsbereiche mit stromintensiver Produktion . . . . . 83
3.31. Energie- und Verkehrsausgaben: Zuordnung zu Gütergruppen und Überleitung von Anschaffung zu Herstellungspreisen . . . . . 84
3.32. Energie: Delta der gelieferten Vorleistungen an die Industrie zwischen Energiewendeszenario und Referenz nach Energieträger in Mio Euro zu Herstellungskosten . . . . . 84
3.33. Anteile der einzelnen Produktionsbereiche an industrieller Energienachfrage in TWh (ohne Strom) . . . . . 85

4.1. Zusammenfassung der Variablen des Modells ISI-Macro . . . . . 99

6.1. Spezifische Investitionen in Stromerzeugungstechnologien und Zuordnung zu regionalen Kategorien . . . . . 144
6.2. Top-down-Verteilung: Wertschöpfungsanteil von MV und NW in 2030 je Wirtschaftsbereich und abgeschätzte Abweichung der nicht direkt regional zugewiesenen Wertschöpfung ($\Delta v$) zwischen EW und REF in Mio Euros . . 150

A.1. Systematik der Gebietseinheiten NUTS 2013 . . . . . 180
A.2. Gütergruppen und Wirtschafts(unter)abschnitte in ISI-Macro . . . . . 181
A.3. Braunkohle: Zugebaute Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen . . 185
A.4. Steinkohle: Zugebaute Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen . . 186
A.5. Erdgas: Zugebaute Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen . . . . 187
A.6. PV-Aufdachanlagen: Zugebaute Kapazität in kW nach Regionen . . . . . 188
A.7. PV-Freiflächenanlagen: Zugebaute Kapazität in kW nach Regionen . . . . . 189
A.8. Onshore-Wind: Zugebaute Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen 190
A.9. Offshore-Wind: Zugebaute Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen 191
A.10. Braunkohle: Stillgelegte Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen . . 192
A.11. Steinkohle: Stillgelegte Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen . . 193
A.12. Erdgas: Stillgelegte Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen . . . . 194
A.13. PV-Aufdachanlagen: Stillgelegte Kapazität in kW nach Regionen . . . . . 195
A.14. PV-Freiflächenanlagen: Stillgelegte Kapazität in kW nach Regionen . . . . . 196

A.15.Onshore-Wind: Stillgelegte Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen 197
A.16.Biomasse: Stillgelegte Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen . . . 198
A.17.Braunkohle: Installierte Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen . . 199
A.18.Steinkohle: Installierte Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen . . 200
A.19.Erdgas: Installierte Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen . . . . 201
A.20.Kernenergie: Installierte Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen . 202
A.21.PV-Aufdachanlagen: Installierte Kapazität in kW nach Regionen . . . . . 203
A.22.PV-Freiflächenanlagen: Installierte Kapazität in kW nach Regionen . . . . . 204
A.23.Onshore-Wind: Installierte Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen 205
A.24.Offshore-Wind: Installierte Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen 206
A.25.Wasserkraftanlagen: Installierte Kapazität in kW nach Regionen . . . . . 207
A.26.Biomasse: Installierte Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen . . . 208
A.27.Braunkohle: Investitionen in Stromerzeugungsanlagen in Tausend Euro nach Regionen (direkt zugewiesener Impuls) . . . . . 209
A.28.Steinkohle: Investitionen in Stromerzeugungsanlagen in Tausend Euro nach Regionen (direkt zugewiesener Impuls) . . . . . 210
A.29.Erdgas: Investitionen in Stromerzeugungsanlagen in Tausend Euro nach Regionen (direkt zugewiesener Impuls) . . . . . 211
A.30.PV-Aufdachanlagen: Investitionen in Tausend Euro nach Regionen (direkt zugewiesener Impuls) . . . . . 212
A.31.PV-Freiflächenanlagen: Investitionen in Tausend Euro nach Regionen (direkt zugewiesener Impuls) . . . . . 213
A.32.Onshore-Wind: Investitionen in Stromerzeugungsanlagen in Tausend Euro nach Regionen (direkt zugewiesener Impuls) . . . . . 214
A.33.Offshore-Wind: Investitionen in Stromerzeugungsanlagen in Tausend Euro nach Regionen (direkt zugewiesener Impuls) . . . . . 215
A.34.Braunkohle: Inputs für die Stromerzeugung nach Regionen . . . . . 217
A.35.Steinkohle: Inputs für die Stromerzeugung nach Regionen . . . . . 218
A.36.Erdgas: Inputs für die Stromerzeugung nach Regionen . . . . . 219
A.37.Kernenergie: Inputs für die Stromerzeugung nach Regionen . . . . . 220
A.38.PV-Aufdachanlagen: Inputs für die Stromerzeugung nach Regionen . . . . . 221
A.39.PV-Freiflächenanlagen: Inputs für die Stromerzeugung nach Regionen . . . 222
A.40.Onshore-Wind: Inputs für die Stromerzeugung nach Regionen . . . . . 223
A.41.Offshore-Wind: Inputs für die Stromerzeugung nach Regionen . . . . . 224
A.42.Wasserkraft: Inputs für die Stromerzeugung nach Regionen . . . . . 225
A.43.Biomasse: Inputs für die Stromerzeugung nach Regionen . . . . . 226

# Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---|---|
| BIP | Bruttoinlandsprodukt |
| BWS | Bruttowertschöpfung |
| $CO_2$ | Kohlenstoffdioxid |
| CPA | Statistische Güterklassifikation in Verbindung mit den Wirtschaftszweigen in der Europäischen Wirtschaftsgemeinschaft (englisch: Classification of Products by Activity) |
| DL | Dienstleistung |
| DV-Geräte | Datenverarbeitungsgeräte |
| EEG | Erneuerbare-Energien-Gesetz |
| EW | Energiewendeszenario |
| EWT | Erwerbstätige |
| GHD | Gewerbe Handel Dienstleistungen |
| GW | Gigawatt |
| kW | Kilowatt |
| kWh | Kilowattstunde |
| Lkw | Lastkraftwagen |
| Mio | Millionen |
| Mrd | Milliarden |
| MV | Mecklenburg-Vorpommern |

| | |
|---|---|
| MW | Megawatt |
| MWh | Megawattstunde |
| NUTS | Klassifikation der Gebietseinheiten für die Statistik (französisch: Nomenclature des Unités territoriales statistiques) |
| NW | Nordrhein-Westfalen |
| p.a. | per annum |
| Pkw | Personenkraftwagen |
| PV | Photovoltaik |
| Ref | Referenzszenario |
| Tsd | Tausend |
| TWh | Terawattstunde |
| VGR | Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen |
| VZÄ | Vollzeitäquivalent |

# 1. Einführung

## 1.1. Motivation

Deutschland hat sich zum Ziel gesetzt, seine Treibhausgasemissionen deutlich zu reduzieren (gemessen an 1990 um 40% bis 2020, um 55% bis 2030 und um 80% bis 95% bis 2050). Dafür sind weitreichende Änderungen sowohl bei der Bereitstellung als auch beim Verbrauch von Energie nötig, welche in ihrer Gesamtheit als Energiewende bezeichnet werden. Spezifische Ziele und Strategien für einzelne Sektoren und Bereiche ergänzen dieses übergeordnete Vorhaben. Erneuerbare Energien sind von hoher Bedeutung für die deutsche Energiewende. Ihr Anteil am Endenergieverbrauch soll bis 2030 auf 30% und bis 2050 auf 60% ansteigen. Dies erfordert weitreichende Transformationen sowohl im Strom-, Wärme als auch im Verkehrssektor, nicht nur in Bezug auf Bereitstellung und Verbrauch, sondern auch in Bezug auf Verteilung, Speicherung und Sektorkopplung. Eine weitere wichtige Säule der Energiewende ist die Erhöhung der Energieeffizienz und damit einhergehend die Senkung des Energieverbrauchs. Konkret soll der Primärenergieverbrauch im Vergleich zu 2008 um 20% bis 2030 und 50% bis 2050 gesenkt werden.

Bei der Bewertung der Energiewende aus gesellschaftlicher Sicht spielt ihre makroökonomische Wirkung eine wichtige Rolle. Eine große Zahl von Studien und wissenschaftlichen Projekten befassen sich mit den gesamtwirtschaftlichen Effekten von Energie und Klimapolitik (Wei, Patadia & Kammen, 2010; sowie Cameron & van der Zwaan, 2015, bieten hierzu gute Übersichten). In den meisten Fällen liegt der Schwerpunkt der Analyse auf der europäischen oder nationalen Ebene (siehe z.B. Böhringer, Keller & van der Werf, 2013; Europäische Kommission, 2016; Fankhaeser, Sehlleier & Stern, 2008; Frondel, Ritter, Schmidt & Vance, 2010; Hillebrand, Buttermann, Behringer & Bleuel, 2006; Lehr, Lutz & Edler, 2012). Neben Wachstum und Wertschöpfung ist Beschäftigung einer der ökonomischen Indikatoren, die am häufigsten untersucht werden. Während sich viele Studien auf den Anstieg erneuerbarer Energien und den Rückgang fossiler und nuklearer Energien konzentrieren, umfassen einige auch die Energieeffizienz im Gebäudebereich und in der Industrie (z.B. Pfaff & Walz, 2017; Ringel, Schlomann, Krail & Rohde, 2016). Investitionen in erneuerbare Energien und zur Erhöhung der Energieeffizienz, veränderte

Nachfrage der Elektrizitätswirtschaft nach intermediären und primären Inputs inklusive Arbeit, reduzierte Importe fossiler Energieträger, veränderte Strompreise und reduzierte Energienachfrage sind allesamt Beispiele für ökonomische Impulse durch die Energiewende mit gesamtwirtschaftlicher Wirkung.

Der mit der Energiewende einhergehende strukturelle Wandel verändert die Verteilung von Wertschöpfung und Einkommen auf Wirtschaftsbereiche, Regionen und Haushalte. Die öffentliche und auch wissenschaftliche Diskussion zu Verteilungseffekten der Energiewende in Deutschland hat sich in den letzten Jahren häufig auf das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) und insbesondere die politischen Instrumente Einspeisevergütung und Umlage beschränkt. Es steht aufgrund seiner regressiven Wirkung in der Kritik: einkommensschwächere Haushalte sind durch die Umlage stärker belastet, wohingegen einkommensstarke Haushalte stärker von der Einspeisevergütung profitieren (Grösche & Schröder, 2014; Heindl, 2014; Heindl & Löschel, 2015; Lehr & Drosdowski, 2015; Neuhoff, Bach, Diekmann, Beznoska & El-Laboudy, 2013; Schulte & Heindl, 2017). Der regressive Effekt trifft auch auf weitere Bestandteile des Strompreises zu, etwa die Netzentgelte, die durch den erhöhten Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung einen Anstieg erfahren haben (Schlesewsky & Winter, 2018). Auch für die regionale Verteilungswirkung wurde aufgezeigt, dass das Bundesland Bayern, das zu den wenigen Nettozahlern beim Länderfinanzausgleich gehört, auch das Bundesland ist, welches die höchsten Einnahmen aus den Zahlungsströmen des EEG erzielt (W. Fischer, Hake, Kuckshinrichs, Schröder & Venghaus, 2016; Growitsch, Meier & Schleich, 2015; Mihm, 2014; Monstadt & Scheiner, 2014, 2016). Auch wenn die Analysen teilweise kritisiert werden, weil sie Klimapolitik und Sozialpolitik gegeneinander ausspielen würden (Gawel, Korte & Tews, 2015), haben die Debatten gezeigt, wie sensibel die Öffentlichkeit auf Verteilungsaspekte eines zentralen politischen Instruments zur Förderung der Energiewende reagiert. Dies deutet darauf hin, dass Verteilungsaspekte für die Akzeptanz dieses wichtigen Vorhabens eine nicht zu unterschätzende Rolle spielen.

In Bezug auf die regionalen Verteilungseffekte sind die politischen Ziele „Angleichung der Regionen“ und „ Schaffung gleicher Lebensbedingungen“ von Relevanz. In Deutschland sind diese im Grundgesetz (Art. 72 GG) und auch im Raumordnungsgesetz (§2 Abs. 1 ROG) festgehalten. Die Kohäsionspolitik ist auch Bestandteil des Vertrags über die Europäische Union (Art. 174). Sowohl auf deutscher als auch auf europäischer Ebene werden dabei die Angleichung der Regionen und nachhaltige Entwicklung gemeinsam zum Ziel erklärt. Dies legt nahe, dass diese Ziele in der Auffassung politischer Institutionen nicht als konfligierend sondern als synergetisch wahrgenommen werden. Nationale und europäische regionalpolitische Instrumente unterscheiden sich hinsichtlich der adressierten regionalen Ebene, der zugrunde gelegten Indikatoren für die Förderwürdigkeit und in den Mecha-

nismen zur Zielerreichung. Je nach politischem Instrument variieren die förderwürdigen Regionen, wobei die ostdeutschen Regionen von allen Instrumenten profitieren. Das regionale Bruttoinlandsprodukt pro Kopf oder das Pro-Kopf-Einkommen einer Region dienen unter anderen als Indikatoren. Die Ziele zur regionalen Verteilung stehen somit nicht nur für sich selbst, sondern sind durchaus auch aus der Perspektive der personellen Einkommensverteilung wichtig.

Auch wenn das EEG ein zentraler Bestandteil der deutschen Energie(wende)politik ist, so sollte sich die Diskussion der Verteilungseffekte nicht darauf beschränken, da sie sonst von einer partiellen Sichtweise geprägt wäre. Denn wie eingangs beschrieben handelt es sich bei der Energiewende um eine weitreichende, mehrere Sektoren umspannende Transformation. Die ökonomischen Effekte der Energiewende sollten daher aus einer breiteren Perspektive betrachtet werden und insbesondere der oben beschriebene strukturelle Wandel mit einbezogen werden. Die Analyse ihrer regionalen Verteilung bedarf einer systemischen Betrachtung, denn deutsche Regionen unterscheiden sich bezüglich ihrer ökonomischen Aktivität, ihrer Wirtschaftsstruktur und ihrer Ausbaupotenziale. Beispielsweise haben ökonomisch sehr aktive Regionen mit großen Industrien wie das Ruhrgebiet anteilig höhere Energieausgaben als ökonomisch schwächere Regionen. Höhere Energiepreise treffen diese Regionen stärker, gleichzeitig haben sie auch ein größeres Potenzial durch Effizienzmaßnahmen zu profitieren. Süddeutsche Regionen, die einen hohen Anteil an verarbeitendem Gewerbe aufweisen, könnten von einer steigenden Nachfrage nach Technologien zur Erzeugung erneuerbarer Energie oder zur Erhöhung der Energieeffizienz profitieren. Die Ausbaupotenziale für Erneuerbare Energien unterscheiden sich aufgrund natürlicher Gegebenheiten: die süddeutschen Regionen sind besser für Photovoltaik (PV) geeignet, die norddeutschen Regionen bieten gute Bedingungen für Windkraft. Darüber hinaus unterscheiden sich die Regionen auch hinsichtlich anderer Faktoren, von denen der Ausbau erneuerbarer Energien abhängt, wie Siedlungsdichte, Hausbesitz und Pro-Kopf-Einkommen (Schaffer & Brun, 2015) oder regionaler Transformationsfähigkeit und landwirtschaftliche Struktur (Schaffer, Brun & Düvelmeyer, 2015; Schaffer & Düvelmeyer, 2016). Gleichermaßen ist auch die Erzeugung von Energie aus fossilen Energieträgern sowie die Förderung von Kohle regional nicht gleichmäßig verteilt.

Politische Strategien zum Ausbau erneuerbarer Energien werden häufig durch Abschätzung der Bruttoeffekte unterstützt, einer Quantifizierung der Beschäftigten, die an Herstellung, Betrieb und Instandhaltung von erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen direkt und indirekt beteiligt sind. Methodisch werden dabei oft Input-Output-Modelle eingesetzt. Die Verteilung der Bruttobeschäftigung auf Bundesländer wurde sowohl für das Jahr 2016 wie auch für Vorgängerjahre ex post quantifiziert (Ulrich, Distelkamp & Lehr, 2012; Ulrich,

Distelkamp, Lehr, Bickel & Püttner, 2012; Ulrich & Lehr, 2013, 2014, 2018). Die Methodik wird exemplarisch für Windenergieanlagen an Land beschrieben (Ulrich, Distelkamp & Lehr, 2012). Die regionale Verteilung der direkt in der Anlagenherstellung Beschäftigten basiert auf einer Firmendatenbank. Für die direkt in Betrieb und Instandhaltung Beschäftigten dient insbesondere die regionale Verteilung der Anlagen als Indikator. Zur Bestimmung der regionalen Verteilung der indirekten Beschäftigung werden zunächst für die 16 Bundesländer (und 59 Produktionsbereiche der zugrundeliegenden Input-Output-Tabelle) die Anteile der aus heimischer Produktion bezogenen Inputs (versus aus anderen Bundesländern und dem Ausland) berechnet. Die Allokation der interregionalen Lieferungen basiert auf einem Gravitationsansatz (Isard, Azis, Drennan, Miller & Saltzman, 1998), in den der Anteil der liefernden Region an der nationalen Produktion im Zähler, die Entfernung zwischen den Regionen im Nenner eingeht.

Die Beschäftigung durch erneuerbare Energien wird sowohl national (O'Sullivan, Edler & Lehr, 2018)[1] als auch regional durch Windenergie dominiert, in acht von sechzehn Bundesländern entfällt mehr als die Hälfte der Bruttobeschäftigungseffekte auf diese Technologie. Die nördlichen vom Windenergieausbau geprägten Bundesländer verzeichnen seit 2013 einen starken Zuwachs an Bruttobeschäftigung: die spezifischen Werte (bezogen auf 1000 Beschäftigte) sind mit 14 bis 27 Beschäftigten in diesen Regionen am höchsten. Im Gegensatz dazu kann der Rückgang der Beschäftigung in der Produktion von Photovoltaikanlagen im Vergleich zu 2013 in den süd- und mitteldeutschen Regionen nicht durch den Windenergieausbau kompensiert werden. Diese Bundesländer zeichnen sich durch geringere spezifische Werte von 3 bis 10 Beschäftigten aus. Die Ergebnisse zeigen auch, dass für die regionale Verteilung der Bruttobeschäftigung nicht nur die gesamtdeutsche Dynamik des Marktes für erneuerbaren Energien sondern auch die Entwicklung in den einzelnen Bundesländern selbst relevant ist. Gerade der Betrieb und die Wartung der installierten Anlagen sichern langfristig Arbeitsplätze in der Region (Ulrich & Lehr, 2018).

In Bezug auf die zukünftige regionale Verteilung der Bruttobeschäftigung durch Windenergie (zu verallgemeinern für erneuerbare Energien insgesamt) ist Folgendes zu beachten (Ulrich, Distelkamp & Lehr, 2012): Die regionalen Verteilungen von Beschäftigung durch erstens Produktion, zweitens Bereitstellung intermediärer Inputs sowie drittens Betrieb und Instandhaltung unterscheiden sich voneinander und ihre Überlagerung bestimmt die Gesamtverteilung. Dynamiken, die die Verteilung einzelner Komponenten ändern oder

[1] Für das Jahr 2016 wurde eine Bruttobeschäftigung von 338.500 Erwerbstätigen ermittelt. Investitionen in und Export von Technologien zur Erzeugung erneuerbarer Energie tragen mit 194.000 Beschäftigten den größten Teil bei, gefolgt von Betrieb und Wartung (75.500 Beschäftigte) und der Bereitstellung der (biogenen) Brennstoffe (69.000 Beschäftigte). Beim Vergleich der Energieerzeugungstechnologien entfielen die meisten Beschäftigten (109.000) auf Windenergieanlagen an Land.

aber eine Verschiebung ihrer relativen Bedeutung bewirken, bestimmen somit die zukünftige Entwicklung. Dies umfasst für die direkten Effekte die zukünftige regionale Verteilung der Hersteller (Exportorientierung der Regionen wird hier als möglicher Indikator genannt) und der installierten Kapazität (politisches Umfeld sowie Windenergiepotenziale als möglicher Indikator). Für die Verteilung der indirekten Effekte ist die Entwicklung der regionalen Anteile am nationalen Produktionswert (sektoral) sowie die Entwicklung der regionalen und sektoralen Arbeitsproduktivität relevant. Eine zukünftige Entwicklung der regionalen Beschäftigung durch erneuerbare Energien kann somit nicht prognostiziert, sondern nur basierend auf Szenarien abgeschätzt werden.

Werden neben der Beschäftigung im Bereich erneuerbarer Energien zusätzlich wegfallende Arbeitsplätze im Bereich der konventionellen Energieträger und die Effekte sich ändernder Strompreise mit einbezogen, handelt es sich um Analysen von Nettoeffekten. Neben den beschriebenen Arbeiten zur Bruttobeschäftigung durch erneuerbare Energien in den Bundesländern, gibt es noch weitere Studien, die entweder auf Wertschöpfungsketten, regionalen Input-Output-Tabellen oder hybriden Ansätzen basieren. Die meisten dieser Analysen konzentrieren sich jedoch auf Brutto- und nicht auf Nettoeffekte und berücksichtigen nur teilweise indirekte Effekte (Bröcker, Burmeister, Preißler-Jebe & Alberty, 2014; Heinbach, Aretz, Hirschl, Prahl & Salecki, 2014; Kosfeld & Gückelhorn, 2012; Raupach-Sumiya, Matsubara, Prahl, Aretz & Salecki, 2015). Mit Többen (2017b) liegt erstmals eine Analyse zur regionalen Verteilung der Nettoeffekte für das Jahr 2011 vor, die den positiven Wertschöpfungseffekten durch Produktion und Betrieb von Anlagen zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien die negativen Wertschöpfungseffekte durch wegfallende konventionelle Energieträger gegenübergestellt. Auch die regionale Verteilung der Preiseffekte (EEG-Umlage) wird mit einbezogen. Hierfür erstellen Többen und Oosterhaven (2017) eine multiregionale Supply and Use Table (MRSUT) für die deutschen Bundesländer. Die Weiterentwicklung einer existierenden Non-Survey-Methode (Kronenberg, 2009; Többen & Kronenberg, 2015) und die simultane Schätzung physischer und monetärer Güterströme (Többen, 2017a) liefern die methodischen Grundlagen hierfür. Um neben regionalen auch soziale Verteilungswirkungen abzuschätzen, wird die MRSUT um detaillierte Konten über die Entstehung, Verteilung und Verwendung von Lohneinkommen erweitert. Auf dieser Datenbasis werden (über die Haushalte geschlossene) Input-Output-Preismodelle und Input-Output-Mengenmodelle verwendet, um die Verteilungseffekte des EEG auf die regionale Bruttowertschöpfung und die verfügbaren Einkommen der Haushalte zu analysieren. Deutschlandweit entstehen im Jahr 2011 geringe positive Wertschöpfungseffekte, die regional ungleichmäßig verteilt sind. Bundesländer mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien verzeichnen leicht positive Effekte, wohingegen insbesondere Nordrhein-Westfalen und die

Stadtstaaten negative Effekte verzeichnen. Auch sozial zeigt sich eine ungleiche Verteilung: lediglich die Gruppen mit hohem Einkommen profitieren leicht, wohingegen Gruppen mit mittlerem und niedrigem Einkommen moderate bis starke Verluste an verfügbaren Einkommen hinnehmen müssen.

Többen (2017b) liefert einen beachtlichen Beitrag bezüglich der regionalen Verteilung der Nettoeffekte. Dennoch: eine ganzheitliche Betrachtung der Energiewende erstreckt sich über die Sektoren Industrie, Strom, Wärme und Verkehr und sollte neben der Energieerzeugung (höhere Anteile erneuerbarer Energien) auch den Energieverbrauch (steigende Effizienz) mit einbeziehen. Weiterhin gibt es bisher keine Analyse, die sich vorausschauend, das heißt ex ante mit der regionalen Verteilung der Nettoeffekte der Energiewende befasst. Gerade bei einer so langfristig angelegten politischen Strategie ist dies von Bedeutung. Die von Többen (2017b) entwickelte multiregionale Supply and Use Table ist ein statisches Instrument basierend auf Daten für das Jahr 2007 (Impulse beziehen sich auf das Analysejahr 2011) mit einem beeindruckenden Detailgrad (41 Produktionsbereiche, 63 Gütergruppen, 16 Regionen). Es ist jedoch wenig realistisch, anzunehmen, dass die abgebildeten regionalen und sektoralen Verflechtungen zukünftig konstant bleiben. Für eine Ex-ante-Analyse bedarf es daher eines Instruments, welches die durch die Klimapolitik angestoßenen Änderungen in Bezug auf Höhe und Struktur von Energieversorgung und Energienachfrage über den betrachteten Zeitraum hinweg erfasst. Diese Lücke soll durch die vorliegende Arbeit geschlossen werden. Ziel ist es, die Nettowirkung der Energiewende auf Beschäftigung und Wertschöpfung und deren Verteilung auf Regionen und Wirtschaftsbereiche ex ante bis zum Jahr 2030 zu modellieren.[2]

## 1.2. Klassifizierung von Verteilungseffekten

Einkommensverteilung umfasst unterschiedliche Dimensionen (für eine Einführung siehe z.B. Blümle, 1975; für eine aktuelle und umfassende Zusammenfassung Atkinson, 2015; Atkinson & Bourguignon, 2000; Sell, 2015). Die funktionale Einkommensverteilung bezeichnet die Verteilung der Erträge auf die Produktionsfaktoren, die personelle Einkommensverteilung die Verteilung des Einkommens auf Einkommensbezieher oder Haushalte. Bei letzterer wird zwischen primärer und sekundärer (vor und nach Eingriff des Staates) Einkommensverteilung unterschieden. Die Dimensionen sind nicht unabhängig voneinander. Beispielsweise wirkt sich eine Änderung der funktionalen Einkommensverteilung auch

[2] Teile der vorliegenden Arbeit wurden bereits in Sievers, Breitschopf, Pfaff und Schaffer (2019) veröffentlicht.

auf die personelle Einkommensverteilung aus, da Löhne und Gewinne personell nicht gleich verteilt sind.

Eine weitere Dimension ist die regionale Verteilung von Einkommen, die Gegenstand der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Politik ist. Nationale Disparitäten in der Einkommensverteilung können auf Disparitäten zwischen den Regionen und innerhalb einer Region zurückgeführt werden (Cowell, 2000). Unterschiede im Durchschnittseinkommen zwischen den Regionen bestimmen den Anteil der Ungleichheit in der nationalen Einkommensverteilung, der auf Disparitäten zwischen den Regionen zurückzuführen ist, und stellen somit auch ein Maß für regionale Einkommensverteilung dar. Je höher die Anzahl der betrachteten Regionen, desto höher der entsprechende Anteil; Schätzungen von 15 bis 20% sind nicht unüblich (Kanbur, 2006). Andererseits enthält eine solche Betrachtung implizit eine Gewichtung nach der Bevölkerung und es kann auch sinnvoll sein, die regionalen Durchschnittseinkommen direkt zu vergleichen und so der Gleichwertigkeit (etwa in einem föderalen System) stärker gerecht zu werden (Kanbur & Venables, 2005). Regionale Preisunterschiede können sich auf die Verteilung realer Einkommen auswirken (Moretti, 2013).

Basierend auf Fullerton (2017) können Verteilungseffekte von Energie- und Umweltpolitik in drei Kategorien eingeteilt werden. Auch wenn diese dazu genutzt werden personelle Einkommensverteilung zu adressieren, können sie teilweise auch auf regionale Einkommensverteilung angelegt werden.

Die erste Kategorie enthält Effekte auf Renten. Änderungen der Angebots- oder Nachfragefunktionen für Energie wirken sich auf die Konsumentenrente und Produzentenrente aus. Da sich Angebots- und Nachfragefunktionen regional unterscheiden und unterschiedlich stark durch die Energiewende verändert werden, ist auch die Wirkung auf die Renten regional unterschiedlich, wodurch sich die regionale Einkommensverteilung ändern kann. Neben Konsumenten- und Produzentenrenten fallen zudem Knappheitsrenten und Umweltrenten in diese Kategorie. Von Knappheitsrenten profitieren beispielsweise die Inhaber von handelbaren $CO_2$-Zertifikaten, wenn die Emissionsobergrenzen reduziert werden. Da deren Verteilung regional variieren kann, wirkt sich dies auch auf die regionale Einkommensverteilung aus. Umweltrenten resultieren daraus, dass Unternehmen die Umwelt als kostenfreien Produktionsfaktor nutzen, und bleiben entweder in Form von Gewinnen bei den Unternehmen, in Form von Lohnsteigerungen bei deren Arbeitnehmern oder durch Preisweitergabe bei den Konsumenten. Die Höhe der Umweltrenten variiert regional, da sich Produktionsstrukturen regional unterscheiden, somit wirkt sich eine Änderung der Umweltrente auch auf die regionale Einkommensverteilung aus.

Die zweite Kategorie enthält Kapitalisierungseffekte. Eigentümer von Land oder Immobilien profitieren beispielsweise vom Wertzuwachs, der sich durch die Energiepolitik ergibt, z.B. durch die Renaturierung eines ursprünglichen Kohleabbaugebiets, oder sie erfahren Wertverlust beispielsweise aufgrund des Neubaus einer Windenergieanlage in der Nähe des Grundstücks. Da auch Kapitalisierungseffekte regional unterschiedlich verteilt sind, ist auch hier von einer Wirkung auf die regionale Einkommensverteilung auszugehen.

Die dritte Kategorie umfasst Transitionseffekte. Die Energiewende vereint mehrere der von Köhler et al. (2019) aufgeführten Charakteristiken einer Nachhaltigkeitstransformation (Sustainability transition) auf sich (siehe auch Elzen, Geels & Green, 2004; Grin, Rotmans & Schot, 2010; L. Quitzow et al., 2016). Sie kann als Teil einer übergeordneten Globalen Transformation aufgefasst werden (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, 2011). Transitionseffekte sind Verteilungseffekte, die sich durch den (hier energiewendebedingten) Strukturwandel ergeben. Dieser zeichnet sich aus durch ein ggfs. verändertes Nachfrageniveau, eine veränderte Nachfragestruktur und eine veränderte Vorleistungsstruktur. Die strukturelle Aufteilung der Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte wirkt auf die regionale Einkommensverteilung aus, da sich die Regionen in ihrer Produktionsstruktur voneinander unterscheiden (Walz & Schleich, 2009, S. 61). Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf diese Kategorie der Verteilungseffekte.

## 1.3. Theoretische Perspektive auf die gesamtwirtschaftliche Wirkung der Energiewende

Die gesamtwirtschaftliche Wirkung der Energiewende wird häufig anhand des Bruttoinlandprodukts und des Beschäftigungsniveaus gemessen. Aus einer theoretischen Perspektive lassen sich hier Preis- und Kosteneffekte, Innovationseffekte und Nachfrageeffekte unterscheiden (für eine ausführliche Darstellung siehe Kapitel 2 in Walz & Schleich, 2009).

Unter der Annahme, dass sich die Wirtschaft bereits an der Grenze ihrer Produktionsmöglichkeiten befindet, führen die Kosten der Klimaschutzmaßnahmen zu negativen gesamtwirtschaftlichen Effekten. Dies ändert sich, wenn angenommen wird, dass sich die Wirtschaft in einem ineffizienten Zustand befindet, das heißt an einem Punkt unterhalb der Produktionsmöglichkeitengrenze. Dies wäre beispielsweise bei der Existenz von sogenannten no-regret-Potenzialen der Fall, also kosteneffizienten Maßnahmen zur Emissionsreduzierung, die bisher nicht ausgeschöpft wurden. In Bezug auf Energieeffizienz, wurden die Gründe für die Existenz dieses so genannten „Energy efficiency gap“ ausführlich diskutiert (Cagno, Worrell, Trianni & Pugliese, 2013; Jaffe & Stavins, 1994; Schleich, 2009; Sorrell, Mallett & Nye, 2011). Externe Hemmnisse betreffen die Marktsituation (Energiepreise,

Risiken), die Politik (fehlende Regulierung), das Technologie- und Dienstleistungsangebot und die Finanzierung. Interne Hemmnisse können in organisatorische Barrieren, Verhaltensbarrieren, ökonomische Hemmnisse und Mangel an Information und Bewusstsein eingeteilt werden (Cagno et al., 2013). Eine weitere Hürde entsteht dadurch, dass häufig lediglich die Rentabilität und nicht dies gesamte Bandbreite des ökologischen, sozialen und ökonomischen Nutzens („Multiple Benefits“) betrachtet wird (International Energy Agency, 2014; Reuter, Patel, Eichhammer, Lapillonne & Pollier, 2020; Ürge-Vorsatz et al., 2016). Können solche Barrieren etwa durch eine entsprechend zielgerichtete Politik (C. Fischer & Newell, 2008; Jaffe, Newell & Stavins, 2002, siehe z.B.) gemindert werden und entsprechend no-regret-Potenziale gehoben werden, erhöhen die erzielten Kosteneinsparungen die Effizienz und führen zu positiven makroökonomischen Effekten. Erst wenn die Mehrkosten von unwirtschaftlichen Klimaschutzmaßnahmen diese Kosteneinsparungen übersteigen, entstehen negative Effekte.

Innovationseffekte umfassen eine erhöhte Produktivität, induzierten technologischen Fortschritt und Wettbewerbsvorteile. Unter der Annahme eines konstanten Investitionsniveaus verdrängen Investitionen in Klimaschutzmaßnahmen andere produktivitätssteigernde Investitionen. Dadurch ergibt sich eine etwas geringere Produktivität als ohne Klimaschutzmaßnahmen. Eine Ausnahme bietet der Fall, dass die getätigten Investitionen nicht nur die Emissionen reduzieren, sondern darüber hinaus ebenso produktiv wirken wie die verdrängten Investitionen. Eine stärker keynesianische Perspektive unterstellt hingegen eine Erhöhung des Investitionsniveaus, etwa durch beschleunigte Modernisierung aufgrund der Klimaschutzmaßnahmen, die sowohl Produktivitätssteigerung als auch Emissionssenkung bewirkt. Technologischer Fortschritt führt zu einer Ausweitung der Produktionsmöglichkeiten und findet unabhängig von Klimaschutzpolitik statt. Dennoch können entsprechende Politikmaßnahmen zusätzlichen technischen Fortschritt bewirken (siehe Kapitel 5 in Walz & Schleich, 2009). Wettbewerbsvorteile oder First Mover Advantages ergeben sich, wenn eine Region als „Lead Market“ einer Klimaschutztechnologie bezeichnet werden kann, also als Markt, von dem aus sich das Design einer Innovation global verbreitet. Die erste umfassende Definition dieses Konzepts (für eine aktuelle Übersicht im Zusammenhang mit Umweltinnovationen siehe R. Quitzow, Walz, Köhler & Rennings, 2014) stammt von Meyer-Krahmer und Reger (1999), die theoretische Ausarbeitung geht auf Beise (2001, 2004, 2006) zurück. Neben der frühen Nachfrage (demand advantage), sind auch frühzeitige Kostenreduktion (price advantage), nationaler Wettbewerb (market structure advantage), der Einfluss auf Konsumenten anderer Länder (transfer advantage) und die Fähigkeit, die Nachfrage anderer Länder zu bedienen (export advantage) Faktoren für einen Lead Market. In Bezug auf Umweltinnovationen kommt noch hinzu, dass ein

Land internationale Trends in der Umweltpolitik antizipiert oder (mit) setzt (regulatory advantage, siehe Beise & Rennings, 2005; Jacob et al., 2006; Rennings & Smidt, 2010).

Nachfrageeffekte umfassen zum einen Änderungen des Nachfrageniveaus wie auch Änderungen der Nachfragestruktur. Eine Erhöhung der Gesamtnachfrage durch Klimapolitik setzt wie zuvor erwähnt voraus, dass andere Elemente der Nachfrage nicht verdrängt werden. Aus einer keynesianischen Perspektive ergeben sich dadurch Multiplikator und Akzeleratoreffekte, die positiv zum Wirtschaftswachstum beitragen. Eine stärker neoklassische Perspektive berücksichtigt hingegen strukturelle Änderungen durch Verschiebungen zwischen Elementen der Endnachfrage. Beispielsweise können die höheren Kosten aufgrund von getätigten Investitionen auf Konsumenten umgelegt werden und so das real verfügbare Einkommen schmälern, es findet also eine Verschiebung vom Konsum hin zu Investitionen statt. Die sektorale Struktur der Endnachfrage aber auch die Vorleistungsstruktur wird durch Klimaschutz direkt beeinflusst, die Berücksichtigung von indirekten Effekten entlang der vorgelagerten Stufen in den Wertschöpfungsketten kommt noch hinzu. Die Importanteile unterscheiden sich je nach Gütergruppen, ebenso der Anteil der importierten Vorleistungen der einzelnen Produktionsbereiche. Daher wirken sich strukturelle Verschiebungen auf die Handelsbilanz und somit auch auf das Bruttoinlandsprodukt aus. Die Produktionsbereiche weisen auch verschieden starke Beschäftigungsintensitäten auf, sodass Änderungen der Nachfragestruktur auch auf die Beschäftigung wirken. Wie bereits in Abschnitt 1.2 erwähnt, wirken sich strukturelle Änderungen auch auf die regionale Verteilung von Wertschöpfung und Beschäftigung aus, da sich Regionen in ihrer Produktionsstruktur unterscheiden.

Ökonomische Folgenabschätzungen lassen sich grob in Analysen von Brutto- und Nettoeffekten unterteilen (für eine vergleichende Darstellung siehe Lutz, Lehr, Ulrich & Schlesinger, 2012; oder Breitschopf, Nathani & Resch, 2013). Die Analyse der Bruttoeffekte beschränkt sich auf die Quantifizierung positiver Effekte, z.B. Beschäftigung in der Produktion und im Betrieb von Anlagen zur erneuerbaren Energieerzeugung. Analysen der Nettoeffekte vergleichen immer eine Situation mit und ohne starke Effizienz und Einsatz von erneuerbaren Energien und zeigen so negative Auswirkungen wie den Verlust von Arbeitsplätzen in der konventionellen Stromerzeugung. Dies sind Beispiele für direkte Nachfrageeffekte. Darüber hinaus berücksichtigen die meisten makroökonomischen Modelle positive und/oder negative indirekte Nachfrageeffekte, und -im Fall von Nettoeffekten- je nach Ansatz auch Preis- und Kosteneffekte und Innovationseffekte.

## 1.4. Modellierung der Gesamtwirtschaftlichen Wirkung der Energiewende

Die empirische Abschätzung der gesamtwirtschaftlichen Wirkung der Energiewende ist eine komplexe Fragestellung, für die Modelle eingesetzt werden. In erster Linie werden CGE-Modelle (Computable General Equilibrium), makroökonometrische Modelle und Input-Output-Modelle genutzt, die jeweils spezifische Stärken und Schwächen haben (für eine ausführliche Darstellung siehe Kapitel 3 in Walz & Schleich, 2009).

CGE-Modelle nutzen Angebots- und Nachfragefunktionen und das Gleichgewicht ergibt sich durch Preisanpassungsmechanismen. Ihre mikroökonomische Fundierung und die Abbildung von Langzeitentwicklungen zählen zu den Vorteilen dieser Modelle. In Bezug auf die oben genannte Kategorien haben diese Art der Modelle ihre Stärke im Darstellen von Preis- und Kosteneffekten. Allerdings ist eine Grundannahme der Modelle, dass sich die Ökonomie bereits in einem Gleichgewicht befindet, in dem alle Produktionsfaktoren so effizient wie möglich genutzt werden und no-regret-Potenziale nicht existieren. Die Abschätzung der gesamtwirtschaftlichen Effekte von Klimaschutzmaßnahmen mit dieser Art von Modellen führt daher tendenziell zu negativen Ergebnissen (z.B. Böhringer et al., 2013).

Makroökonometrische Modelle basieren im Gegensatz zu CGE-Modellen nicht auf einem einzelnen Jahr, sondern nutzen Zeitreihen zur Kalibration der hinterlegten makroökonomischen und Verhaltensgleichungen. Je nach theoretischer Ausrichtung der Modelle können stärker neoklassische oder stärker keynesianische Aspekte betont werden. Im Gegensatz zu CGE-Modellen sind Ineffizienzen in dieser Art von Modellen abbildbar, solange sie durch historische Daten reflektiert werden. Makroökonometrische Modelle gelten zumindest für die Abbildung der kurz- und mittelfristigen Entwicklung als realitätsnaher. Der Einsatz von makroökonometrischen Modellen für eine Abschätzung mit Langzeithorizont setzt voraus, dass historisch beobachtete Zusammenhänge auch für die Zukunft fortgeschrieben werden können. Die Abschätzung der gesamtwirtschaftlichen Effekte von Klimaschutzmaßnahmen mit dieser Art von Modellen fällt weniger negativ aus als für CGE-Modelle.

Mit Input-Output-Modellen können die Produktions- und Beschäftigungseffekte, die sich aus der Änderung der Endnachfrage ergeben, berechnet werden. Dies schließt indirekte Effekte, die sich durch die Betrachtung der kompletten Wertschöpfungskette ergeben, mit ein. Wenn es sich um statische und offene Input-Output-Modelle handelt, sind jedoch induzierte Effekte durch die Betrachtung der Rückkopplung von Einkommenseffekten auf die Nachfrage nicht enthalten. Auch durch Preis- und Kostenänderungen angestoßene Substitutionseffekte können in solchen Modellen nicht endogen berücksichtigt werden.

Input-Output-Modelle haben ihre Stärke insbesondere bei Fragestellungen, die eine hohe sektorale Auflösung erfordern, wo also die Änderung der Nachfragestruktur im Vordergrund steht.

Neben dem ökonomischen Ansatz unterscheiden sich Modelle auch in Bezug auf den Dateninput und die Szenarienimplementierung. Top-down-Analysen basieren auf sogenannten E3-Modellen (Economy, Environment, Energy), meist makroökonometrische oder Gleichgewichtsmodelle. Sie sind losgelöst von konkreten technologischen Entwicklungen und die Energienachfrage basiert auf aggregierten Produktionsfunktionen oder statistischen Korrelationen. Veränderungen in den relativen Preisen der Produktionsfaktoren führen zu Substitutionseffekten, wobei die unterstellten Elastizitäten auf fortgeschriebenen Entwicklungen der Vergangenheit beruhen. Technologiesprünge können mit dieser Art von Modellen nicht abgebildet werden. Technologischer Fortschritt wird durch eine autonome Erhöhung der Energieeffizienz über die Zeit dargestellt, durch Politikmaßnahmen induzierter Wandel hingegen nicht oder nur unzulänglich integriert. Dies führt tendenziell dazu, dass die Kosten von Klimaschutzpolitik von solchen Modellen überschätzt werden.

Im Gegensatz dazu nutzen Bottom-up-Ansätze detaillierte Energieszenarien, die typischerweise auf techno-ökonomischen Partialmodellen des Energieangebots und der Energienachfrage beruhen. Diese Modelle integrieren verschiedene Technologien und ihre Entwicklung, auch unter Berücksichtigung von Lerneffekten. Sie heben sich daher von Modellen mit einem generisch unterstellten technischen Fortschritt ab. Kosteneffekte und direkte Nachfrageeffekte lassen sich aus den Szenarienergebnissen ermitteln. Um auch die indirekten Nachfrageeffekte zu erfassen, werden Bottom-up-Modelle häufig mit Input-Output-Modellen gekoppelt. Hierbei kommt die oben beschriebene Limitierung von Input-Output-Modellen hinsichtlich der Abbildung von Einkommenseffekten und durch relative Preisänderungen angestoßenen Substitutionseffekten zum Tragen. Ein breiteres Spektrum an Effekten kann durch die Kopplung von Bottom-up-Modellen mit komplexeren makroökonomischen Modellen wie CGE-Modellen oder makroökonometrischen Modellen abgebildet werden. Wie zu Beginn dieses Abschnitts diskutiert, haben jedoch auch diese Ansätze Schwächen im Hinblick auf das Abbilden von no-regret-Potenzialen und Innovationseffekten und unterschätzen daher die positive Wirkung von Klimaschutzmaßnahmen.

Die beschriebenen Unterschiede in den Modellierungsansätzen werden auch beim Vergleich einer Vielzahl empirischer Studien zur makroökonomischen Wirkung von Klimapolitik deutlich (Walz & Schleich, 2009): Während kombinierte Bottom-up/Top-down-Ansätze Energie insbesondere durch Kapital substituieren, ist bei reinen Top-down-Ansätzen die Substitution von Arbeit relevant. Daher werden letztere häufig für Analysen zur ökologischen Steuerreformen (Senkung der Lohnkosten aus Energiesteuereinnahmen) eingesetzt

mit entsprechend positiver Wirkung auf die Beschäftigung, wohingegen sich erstere auch für die Analyse einer Kombination von Maßnahmen (Policy-Mix) gut eignet. Da somit unterschiedliche Politiken Gegenstand der Folgenabschätzung sind, sind die Ergebnisse nur bedingt vergleichbar. Walz und Schleich (2009) kommen zum Schluss, dass die Kombination von Top-down- und Bottom-up-Methoden weiterentwickelt und verstärkt eingesetzt werden sollte, auch die International Energy Agency (2014) betont den Bedarf für diese Art von Modellansätzen.

Der Einfluss der Wahl des makroökonomischen Modellierungsansatzes auf die Ergebnisse zeigt sich besonders deutlich, wenn die gleichen Szenarien zugrunde gelegt werden. Ein Vergleich der Folgenabschätzungen der EU-Energiepolitik zeigte leicht negative Ergebnisse für das Wirtschaftswachstum bei Anwendung eines CGE-Modells und leicht positive Ergebnisse bei Anwendung eines postkeynesianischen makroökonometrischen Modells (Europäische Kommission, 2016). Die Ergebnisse konvergieren nach Anpassung der Annahmen über die Verfügbarkeit von Kapital (Crowding-Out-Effekt) in beiden Modellen. Ein Vergleich des systemdynamischen Modells ASTRA und des makroökonometrischen Modells PANTA RHEI zeigte positive Auswirkungen erhöhter Investitionen für beide Modelle. Langfristig werden die positiven Auswirkungen auf die Faktorproduktivität jedoch bei ASTRA stärker gewichtet, während bei PANTA RHEI Dämpfungseffekte aufgrund gestiegener Kapitalkosten von höherer Bedeutung sind (Lehr et al., 2011). Im Gegensatz dazu werden in einem Modellvergleich des ökonometrischen, neokeynesianischen Modells NEMESIS mit ASTRA (Duscha et al., 2016) größere positive Auswirkungen in NEMEIS als in ASTRA deutlich, da im ASTRA-Modell positive Effekte von Investitionen auf das BIP zeitlich verzögert sind.

Trotz der genannten Unterschiede: die Bandbreite, in der sich die makroökonomischen Effekte von Klimapolitik gemessen an BIP und Beschäftigung bewegen, reicht von leicht negativ zu leicht positiv, ist also moderat (Walz & Schleich, 2009). Dehnen, Mattes und Traber (2015) fassen die wichtigsten Ergebnisse einer Vielzahl von Analysen zu den ökonomischen Effekten der Energiewende in Deutschland zusammen. Obwohl sich die meisten Studien in Bezug auf Modellierungsansatz, Annahmen und Szenarien unterscheiden, liegen die Ergebnisse in ähnlichen Größenordnungen und die Mehrheit der Studien prognostiziert leicht positive Nettoeffekte.

Dies legt nahe, dass durch die Energiewende angestoßene strukturelle Verschiebungen gegebenenfalls von größerer Bedeutung sind als die aggregierten Effekte. Einmal mehr für die Fragestellung dieser Arbeit, da wie bereits im Zusammenhang mit Verteilungseffekten argumentiert, die Regionen aufgrund ihrer abweichenden Produktionsstrukturen entsprechend unterschiedlich stark betroffen sein könnten. Der Fokus in der Modellierung

liegt daher auf (strukturellen) Nachfrageeffekten. Ein Ansatz der technologische Bottom-up-Modelle mit einem sektoral hoch aufgelösten makroökonomischen Modell kombiniert scheint hier geeignet.

Der strukturelle Nachfrageeffekt ergibt sich hierbei durch die Berücksichtigung von positiven und negativen sektoral aufgelösten direkten Nachfrageimpulsen und daraus resultierenden Effekten:

- Investitionsimpulse durch Planung, Produktion und Installation von Energieerzeugungsanlagen
- Vorleistungen für den Betrieb der Anlagen
- Wertschöpfung durch den Betrieb der Anlagen
- Investitionen in die Erhöhung der Energieeffizienz
- Konsumausgaben zur Erhöhung der Energieeffizienz
- Auswirkungen geänderter Energieausgaben auf die sektorale Wertschöpfung
- Auswirkungen geänderter Energieausgaben auf den Konsum
- daraus resultierende indirekte und induzierte Effekte

Strukturelle Effekte wirken sich durch die unterschiedliche Beschäftigungsintensität, Wertschöpfungsanteile und die unterschiedlich hohen Importanteile in den einzelnen Produktionsbereichen auch auf makroökonomische Größen und wiederum auf induzierte Einkommenseffekte aus.

Ob sich neben der Struktur auch das Niveau der Nachfrage ändert, hängt von der theoretischen Perspektive ab, die eingenommen wird. Aus einer neoklassischen Perspektive müssen positive und negative Impulse zu jedem Zeitpunkt ausgeglichen sein. Zum Zeitpunkt der Investition (positive Impulse dominieren) erfolgt eine negative Kompensation, das heißt das für andere Investitionen oder auch für privaten Konsum zur Verfügung stehende reale Einkommen wird reduziert. Später, wenn Einspareffekte und somit negative Impulse dominieren, erfolgt hingegen eine positive Kompensation. Diese Kompensationsmechanismen führen wie oben beschrieben in neoklassischen Modellen zu weniger positiven oder gar negativen Effekten auf die Produktion. Durch Höhe und Art der Kompensation ergibt sich zudem ein struktureller Effekt. Unter einer stärker keynesianischen Perspektive kann zusätzliche Nachfrage bedient werden ohne andere Nachfrage zu verdrängen, z.B. öffentliche Zuschüsse über Erhöhung des Staatsdefizits oder privates Sparen ohne

Crowding-out. Dieser Perspektive liegt die Annahme zugrunde, dass die Ökonomie ihr zur Verfügung stehendes Produktionspotenzial nicht ausschöpft. Sie wird gestützt durch die auf die Wirtschaftskrise folgenden und bereits seit längerem andauernden Situation von niedrigen Zinsen in Verbindung mit niedriger Inflation. Erklärungen umfassen globale Ersparnisschwemmen (Bernake, 2015), anhaltende Liquiditätsfallen (Eggertsson & Krugman, 2012) und säkulare Stagnation (Eggertsson, Mehrotra & Summers, 2016; Krugman, 2014; Summers, 2015, 2016). In postkeynesianischen Modellen dämpfen finanzielle Beschränkungen den Wachstumseffekt lediglich, aber heben ihn nicht auf, wie Analysen mit dem makroökonometrischen Modell E3ME zeigen (Europäische Kommission, 2016; Lewney, Chewpreecha & Pollitt, 2017; Pollitt & Mercure, 2018).

In der vorliegenden Arbeit wird tendenziell eine keynesianische Position eingenommen. Im Gegensatz zum neoklassischen Ansatz wird hier davon ausgegangen, dass sich die Wirtschaft nicht an ihrer effizienten Produktionsmöglichkeitenkurve bewegt, sondern dass noch no-regret-Potenziale existieren (vgl. Abschnitt 1.3). Erst die Reduktion von Hemmnissen durch eine entsprechende Politik ermöglicht es, diese Potenziale (teilweise) zu heben. Die Klimaschutzmaßnahmen verdrängen zwar teilweise Investitionen (z.B. Substitution von Kohlekraftwerken durch Windkraftanlagen), führen jedoch insgesamt zu einer Erhöhung des Investitionsniveaus, ohne dass andere Nachfrage verdrängt wird. Das zusätzlich benötigte Kapital wird durch die Finanzmärkte zur Verfügung gestellt, ohne dass Crowding-out stattfindet. Dies ist möglich, weil durch die Politik zusätzliche Nachfrage nach rentablen Investitionen bei gleichzeitig nicht voll ausgelasteten Produktions- und Finanzierungskapazitäten entsteht. Aufgrund der Annahme, dass keine Verdrängung stattfindet, ist es nicht nötig, dass die Rentabilität höher ist als die anderer möglicher Investitionen.

Aus einzelwirtschaftlicher Perspektive ist die Rentabilität der Investitionen, sofern sie nicht durch die Reduktion der Energiekosten gegeben ist (Effizienzmaßnahmen), über eine entsprechende Erhöhung der Stückkosten (z.B. Strompreis, Umlage von Gebäudeinvestitionen auf Miete) sichergestellt. Im gewerblichen Bereich reduziert sich hierdurch die Wertschöpfung der Produktionsbereiche, die diese Güter nachfragen. Im privaten Bereich führen diese Kostenerhöhungen zu einer Veränderung der Konsumstruktur, da die Sparrate als konstant hinterlegt wird.

Wie bereits erwähnt, wird vorausgesetzt, dass das für diese zusätzlichen Investitionen nötige Produktionskapital kurzfristig zur Verfügung steht. Mittelfristig induziert die gestiegene Gesamtnachfrage Investitionen, die das Produktionskapital erhöhen. In Bezug auf Innovationseffekte wird davon ausgegangen, dass die Investitionen für den Klimaschutz keine Produktivitätssteigerung bewirken, auch mögliche Wettbewerbsvorteile durch die

Etablierung eines Leitmarkts werden nicht unterstellt. Die durch die zusätzlichen Investitionen erzielten positiven gesamtwirtschaftlichen Effekte bleiben somit eher moderat.

## 1.5. Vorgehen und Struktur der Arbeit

Das im Rahmen der Arbeit entwickelte Modellinstrumentarium sollte sich durch folgende Eigenschaften als geeignet für die Analyse auszeichnen:

- Das Modell verfügt über eine genügend hohe räumliche Auflösung.
- Die Differenzierung der Wirtschaftsbereiche ist ausreichend.
- Durch eine zeitliche Auflösung in Jahresschritten können Dynamiken abgebildet werden.
- Das Modell reagiert sensitiv auf Szenarien-bezogene Impulse, die sektoral, regional und zeitlich differenziert einfließen können.
- Die sektorale Wirkung der Impulse enthält neben direkten auch indirekte und induzierte Effekte.
- Das Modell bildet Nettoeffekte ab.
- Die Wechselwirkung zwischen Wirtschaftsstruktur und regionaler Einkommensverteilung werden berücksichtigt.
- Regionale und sektorale Wertschöpfung und Arbeitskräftebedarf stellen zentrale Ergebnisse dar. Aggregierte regionale Wertschöpfung dient als Indikator der regionalen Einkommensverteilung.

Um die wirtschaftlichen Folgen der Energiewende abzuschätzen, wird ein integrierter Modellierungsansatz (bzw. kombinierter Bottom-up/Top-down-Ansatz) verwendet, der in Abbildung 1.1 schematisch dargestellt ist. Die wirtschaftlichen Aktivitäten (Impulse), die mit dem Verbrauch von und der Versorgung mit Energie (Energiemodelle) einhergehen, werden mit einem makroökonomischen Modell der deutschen Wirtschaft (Makroökonomischer Kern) und regionalen Wirtschaftsstrukturen (regionale Verteilung) verknüpft. Ein Referenz- und ein Energiewendeszenario beschreiben die sozioökonomischen und politischen Rahmenbedingungen (Szenarien). Durch den Vergleich der Ergebnisse der beiden Szenarien lässt sich der Nettoeffekt auf die regionale Wertschöpfung ermitteln. Blau hinterlegt in Abbildung 1.1 sind die im Rahmen der vorliegenden Arbeit erstellten Teile: die

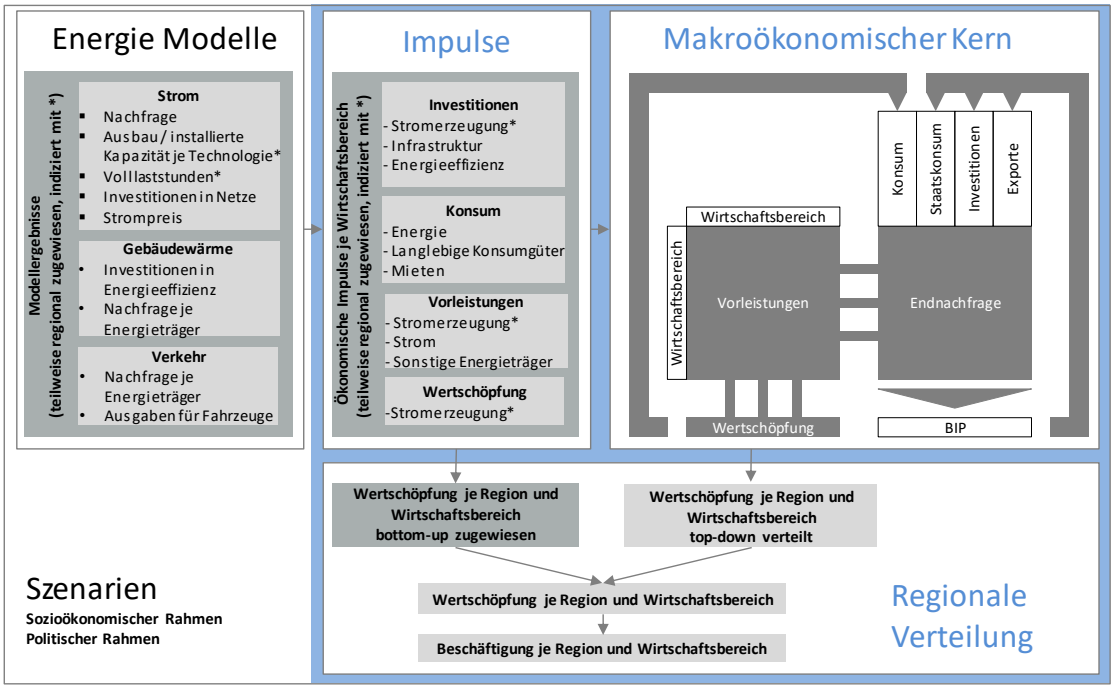



Abbildung 1.1.: Schematische Darstellung des Modellierungsansatzes. Blau hinterlegt sind die im Rahmen der vorliegenden Arbeit erstellten Teile.

Aufbereitung der Impulse und die entsprechende Schnittstelle im Modell (Sievers, Breitschopf et al., 2019), der makroökonomische Kern (Sievers & Pfaff, 2019) und die regionale Verteilung (Sievers, 2019).

Im Gegensatz zu einem vollständig integrierten Bewertungsmodell sind die Modelle nicht fest miteinander verknüpft, sondern basieren auf dem gleichen Szenario-Rahmen. Hinsichtlich der Integrationstiefe handelt sich also um die Integration von Partialmodellen. Die zunächst voneinander unabhängigen Energiemodelle durchlaufen mehrere Iterationsschleifen zur Rückkopplung von Information, bis Angebot und Nachfrage ausgeglichen sind (für Details siehe Pfluger et al., 2017b). Das Modell zur ökonomischen Folgenabschätzung ist mit den Energiemodellen verknüpft. Die Verknüpfung ist jedoch nicht wechselseitig. Eine Rückführung der ermittelten Effekte auf die Produktion einzelner Wirtschaftsbereiche zu den Energienachfragemodellen würde die Abschätzung von gesamtwirtschaftlichen Reboundeffekten möglich machen. Reboundeffekte treten auf, wenn die tatsächlich erzielten Energieeinsparungen geringer ausfallen als bei einer reinen Betrachtung des technologischen Potenzials (Guerra & Sancho, 2010). Generell wird zwischen direkten, indirekten und gesamtwirtschaftlichen Reboundeffekten unterschieden (Barker, Dagoumas & Rubin, 2009; Dimitropoulos, 2007). Direkte Reboundeffekte beschreiben den Fall, dass ein Gut oder eine Dienstleistung zwar mit weniger Energieaufwand bereitgestellt werden kann, es gleichzeitig aber mehr genutzt wird, wodurch Teile der Einsparungen verloren gehen. Sie werden meist empirisch bestimmt (Sorrell, Dimitropoulos & Sommerville, 2009). Indirekte Reboundeffekte entstehen, wenn andere Güter, die durch die Effizienzmaßnahme nicht direkt betroffen waren, mehr nachgefragt werden und dadurch zusätzliche Energienachfrage entsteht. Gesamtwirtschaftliche Reboundeffekte gehen auf ein gestiegenes gesamtwirtschaftliches Nachfrageniveau zurück. Zur Erfassung indirekter und gesamtwirtschaftlicher Reboundeffekte eignen sich E3-Modelle, wobei sowohl makroökonometrische (Barker et al., 2009) als auch CGE-Modelle (Guerra & Sancho, 2010; Turner, 2009) eingesetzt werden. Solche reinen Top-down-Analysen haben jedoch andere Schwächen, wie oben bereits diskutiert wurde. Kombinierte Bottom-up/Top-down-Ansätze verzichten für gewöhnlich auf eine feste und wechselseitige Verknüpfung von Energiemodellen und makroökonomischen Modellen. Beispielsweise implementieren auch Duscha et al. (2016), Lutz et al. (2018) keine Rückkopplung vom makroökonomischen Modell zu den Energiemodellen. Dies trifft wie oben beschrieben auch auf den Modellierungsansatz dieser Arbeit zu, sodass keine indirekten und gesamtwirtschaftlichen Reboundeffekte abgedeckt werden können. Zumin-

dest direkte Reboundeffekte sind teilweise über die iterativ gekoppelten Energiemodelle abgedeckt.[3]

Es kommen sowohl Optimierungsmodelle (Bereitstellung von Energie) wie auch Simulationsmodelle (Energienachfrage, makroökonomischer Kern) zum Einsatz, die sich in ihren Annahmen unterscheiden. Die Energiemodelle berücksichtigen beispielsweise angebotsseitige Einschränkungen wie die begrenzte Verfügbarkeit von Biomasse oder Flächen für erneuerbare Energien. Der Strommix wird im Hinblick auf Kosteneffizienz optimiert, unter Berücksichtigung gegebener politischer Randbedingungen und unter der Annahme von profitmaximierenden Stromanbietern. Der Energieverbrauch wird hingegen basierend auf den hinterlegten Zielen und Politiken simuliert. Beim für die vorliegende Arbeit entwickelten ökonomischen Modell handelt es sich um einen Simulationsansatz ohne angebotsseitige Einschränkungen. Dadurch unterscheidet es sich deutlich von einem Allgemeinen Gleichgewichtsmodell.

Alle Modelle bilden den kompletten Szenarienzeitraum ab, unterscheiden sich jedoch in der zeitlichen Auflösung und ihrer Dynamik. Die Stromsystemmodellierung nutzt für ein einzelnes Jahr zeitlich hoch aufgelöste Angebots- und Nachfragekurven, wird aufgrund des hohen Rechenaufwands der Optimierung jedoch nur für 10-Jahresscheiben angewandt. Das Stromnachfragemodell sowie die Energiemodelle für den Verkehrssektor und für den Gebäudesektor liefern ebenso wie das ökonomische Modell jährliche Ergebnisse. Alle Modelle sind dynamisch im Sinne, dass der Zustand der Vorperiode das weitere Verhalten des Systems beeinflusst.

In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Teile des integrierten Modellierungsansatzes detailliert beschrieben. Kapitel 2 stellt politische und sozioökonomische Rahmenbedingungen der Szenarien dar und geht auf Methodik und Ergebnisse der Modellierung der Energienachfrage und -versorgung ein. Dieses Kapitel beruht im Wesentlichen auf den für die Bundesregierung erstellten Langfristszenarien zur Transformation des Energiesystems in Deutschland Pfluger et al. (2017a, 2017b, 2017c). Die in den folgenden Kapiteln beschriebenen Teile des integrierten Modellierungsansatzes wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelt: In Kapitel 3 wird die Transformation von physischen / monetären Größen aus den Energiemodellen in monetäre Impulse für den makroökonomischen Kern des Modellinstrumentariums inklusive ihrer Verteilung auf Regionen und Wirtschaftsbereiche

[3] Im Energienachfragemodell für Gebäudewärme Invert wird beispielsweise ein effektiver Temperaturanstieg nach Sanierungsmaßnahmen berücksichtigt (Pfluger et al., 2017b, S. 23). Im Modell FORECAST-Residential, welches für die Simulation der Energienachfrage der Haushalte eingesetzt wird, werden direkte Reboundeffekte im Bereich der Diffusion von Energieeffizienten Technologien (zum Beispiel eine höhere Luminosität nach dem Austausch von Leuchtmitteln) sowie im Nutzerverhalten abgebildet (Elsland, 2016, Kapitel 4.4.4 und 4.4.5).

näher beschrieben. Der makroökonomische Kern des Modellinstrumentariums, ISI-Macro, bildet die ökonomische Kreislauflogik und die entsprechende Wirkung der Impulse ab, Kapitel 4 enthält eine formelle Beschreibung hierzu. Kapitel 5 beschreibt die regionale Verteilung, die einen hybriden Ansatz nutzt: Ein Teil der Impulse kann direkt einzelnen Regionen und Wirtschaftsbereichen zugeordnet und die entsprechende Wertschöpfung abgeleitet werden. Die restliche Wertschöpfung wird den Regionen mittels eines Schlüssels, der die regionale Wirtschaftskraft und -struktur und ihre dynamische Entwicklung berücksichtigt, zugeteilt.

Durch den Vergleich der beiden Szenarien ergeben sich die Nettoeffekte auf regionale und sektorale Wertschöpfung und Beschäftigung. Diese werden in Kapitel 6 dargestellt und diskutiert und für zwei exemplarische Regionen detailliert erläutert. Die Arbeit schließt mit Zusammenfassung und Ausblick in Kapitel 7.

# 2. Szenarien

Die Nettoeffekte der Energiewende auf Wertschöpfung und Beschäftigung werden wie einleitend beschrieben durch den Vergleich eines Energiewendeszenarios mit einem Referenzszenario ermittelt. Die beiden Szenarien basieren auf den im Rahmen des Projekts Langfristszenarien zur Transformation des Energiesystems in Deutschland für die Bundesregierung entwickelten Szenarien „Basis“ bzw. „Referenz“, deren Entwicklung nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit war (vgl. Abschnitt 1.5). Eine detaillierte Beschreibung dieser Szenarien sowie der zur Szenarienentwicklung genutzten Modelle findet sich in Pfluger et al. (2017a, 2017b, 2017c). Die wichtigsten für diese Arbeit relevanten Informationen sind zusätzlich in den folgenden Abschnitten zusammengefasst. Der betrachtete Zeithorizont reicht vom Basisjahr 2010 bis zum Jahr 2030.[1]

## 2.1. Sozioökonomischer Rahmen

Für beide Szenarien wurde der gleiche sozioökonomische Rahmen zugrunde gelegt. Wo nötig wurden die in Pfluger et al. (2017a) verwendeten nationalen Entwicklungen um regionale Entwicklungen ergänzt.

### 2.1.1. Demographische Entwicklung

Die demographische Entwicklung entspricht der mittleren Variante mit schwächerer Zuwanderung der 13. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung des Statistischen Bundesamt (Destatis, 2015a). Da für die Berechnung der regionalökonomischen Effekte auch die regionale Bevölkerungsentwicklung relevant ist, wurde die gesamtdeutsche Bevölkerung dann basierend auf der Raumordnungsprognose 2035 (Schlömer, Bucher & Hoymann, 2015) auf die NUTS2-Regionen verteilt. Der gleichen Quelle wurde der jeweilige Anteil der Erwerbspersonen an der regionalen Bevölkerung entnommen. Auf diese Weise ist es

[1] In den Langfristszenarien reicht der Betrachtungszeitraum bis 2050. Dies ist hinsichtlich der langfristig formulierten Klimaziele und in Bezug auf die langen Lebensdauern von Energieerzeugungstechnologien auch sinnvoll. Für die Abschätzung ökonomischer Effekte ist jedoch eine mittelfristige Betrachtung als ausreichend und aufgrund der zunehmenden Unsicherheiten hinsichtlich der zukünftigen sektoralen und regionalen Wirtschaftsstruktur als belastbarer einzuschätzen.

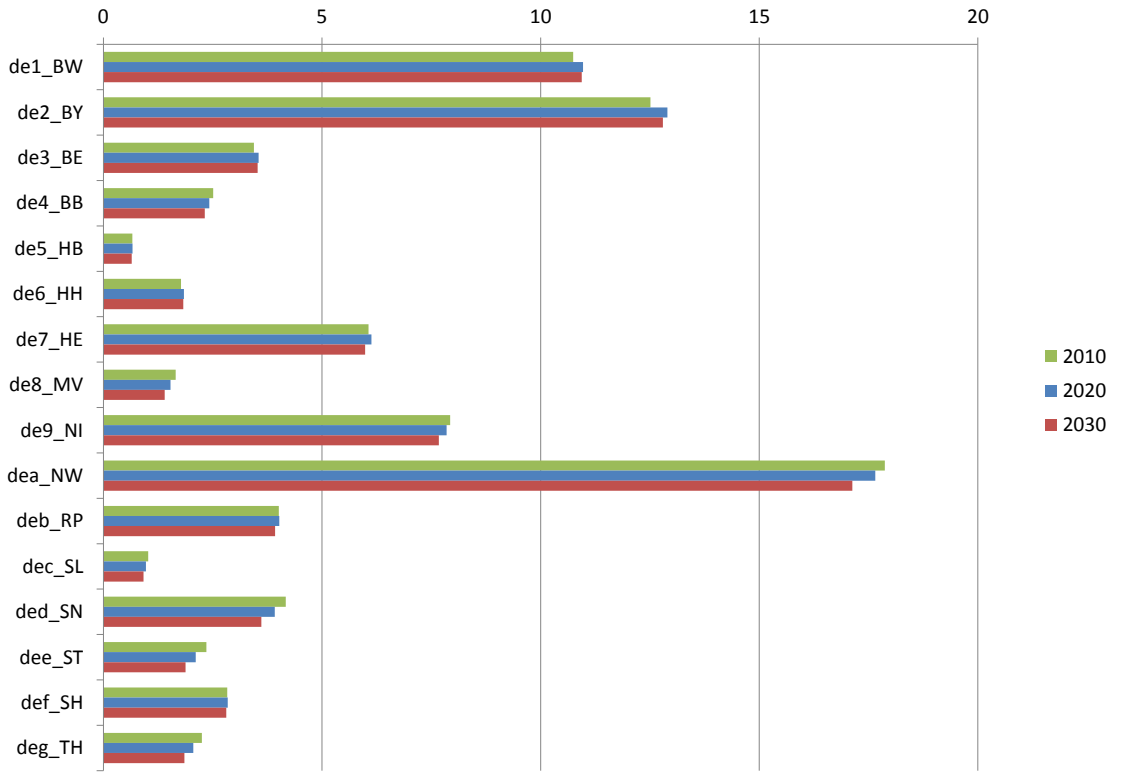



Abbildung 2.1.: Bevölkerung je Bundesland in Millionen Personen von 2010 bis 2030

möglich, Konsistenz mit der in Pfluger et al. (2017a) verwendeten demographischen Entwicklung zu wahren und gleichzeitig eine anerkannte Quelle für die regionale Verteilung zu nutzen. Abbildung 2.1 stellt die so ermittelte demographische Entwicklung in den Bundesländern von 2010 bis 2030 dar. Während die Bevölkerung in den südlichen Bundesländern sowie in den Stadtstaaten Berlin und Hamburg noch ansteigt und erst 2030 zurückgeht, stagniert sie in den anderen Bundesländern bzw. geht deutlich zurück.

### 2.1.2. Ökonomische Entwicklung

Die Entwicklung des Wirtschaftswachstums ist mit Blick auf das Energiesystem insbesondere für die Energie- und Verkehrsnachfrage relevant. Sie orientiert sich in Pfluger et al. (2017a) am OECD Long Term Economic Outlook (OECD, 2014) und zeichnet sich durch ein durchschnittliches Wirtschaftswachstum von 1,1 Prozent per annum bis 2030 aus. Für die Berechnung der ökonomischen Effekte ist das Wirtschaftswachstum maßgeblicher Bestandteil der Referenzentwicklung und die Höhe der relativen Effekte hängt davon direkt ab. Das verwendete makroökonomische Modell (vgl. Kapitel 4) wurde daher so kalibriert,

dass die Entwicklung des Bruttoinlandsprodukt möglichst nah an dem für die Langfristszenarien verwendeten Wachstumspfad liegt (vgl. Abbildung 2.2). Dem so kalibrierten Modell lässt sich auch die Wertschöpfung nach Wirtschaftsbereichen entnehmen (vgl. Abbildung 2.3). Hierbei kann das Wachstum in den einzelnen Bereichen vom gesamtökonomischen Wachstum abweichen, da nicht alle Endnachfragebereiche (Konsum, Staatskonsum, Investitionen und Exporte) gleichermaßen stark wachsen und sich die Produktionsmengen der einzelnen Wirtschaftsbereiche für die Befriedigung der unterschiedlichen Endnachfragekategorien unterscheiden. Für die vorliegende Arbeit stellt auch die Entwicklung der regionalen Wertschöpfung eine wichtige Bezugsgröße dar. Sie ergibt sich aus der in Kapitel 5 erläuterten Top-down-Verteilung der nationalen Wertschöpfung nach Wirtschaftsbereichen und ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Abbildung 2.5 löst die Wertschöpfung in den Bundesländern für das Jahr 2010 nach Wirtschaftsunterabschnitten auf. Die entsprechenden Abbildungen für 2020 und 2030 befinden sich im Anhang (Abbildungen A.2 bzw. A.3).

### 2.1.3. Energie- und $CO_2$-Preise

Die in Pfluger et al. (2017a) benutzten Preise für die Primärenergieträger beruhen auf dem Reference Scenario 2013 der Studie Trends to 2050 (Capros et al., 2013). Sie sind gleich in beiden Szenarien und ihr Verlauf ist in Abbildung 2.6 dargestellt. Der abweichende politische Rahmen in den beiden Szenarien, der im folgenden Abschnitt zusammengefasst wird, spiegelt sich in den $CO_2$-Preisen (Abbildung 2.6) und weiteren Steuern und Abgaben wieder. Dies führt ebenso wie die veränderte Zusammensetzung der Energieträger zur Energieerzeugung zu Unterschieden in den Verbraucherpreisen für Strom, Wärme und Kraftstoffe. Preise für Wärme und Kraftstoffe werden hier nicht gesondert dargestellt, da nur die Ausgaben (das heißt das Produkt aus Preis und verbrauchter Menge) in den makroökonomischen Kern des Modellinstrumentariums eingehen (vgl. Kapitel 3). Bei den Strompreisen wird unterschieden zwischen Haushalten und Dienstleistungssektor, Industrie und industriellen Großverbrauchern (Abbildung 2.7). Während sich das für die Erstellung der Langfristszenarien verwendete Energienachfragemodell Forecast hierbei an der Einteilung der AG Energiebilanzen orientiert, wurde für die Zwecke dieser Arbeit eine Einteilung nach Wirtschaftsbereichen vorgenommen (siehe Abschnitt 3.3.2 für weitere Einzelheiten).

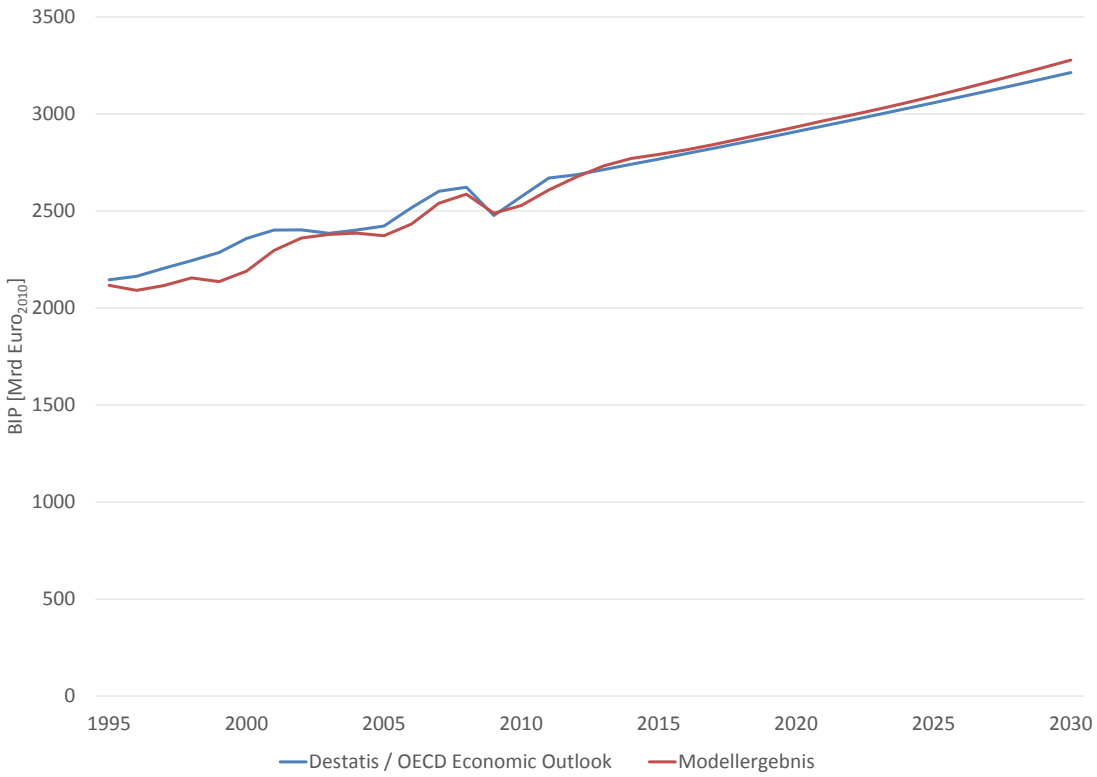



Abbildung 2.2.: Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts in Milliarden Euro von 1995 bis 2030 basierend auf Destatis und OECD Economic Outlook (blaue Linie) und Ergebnissen des Makroökonomischen Modells (rote Linie)

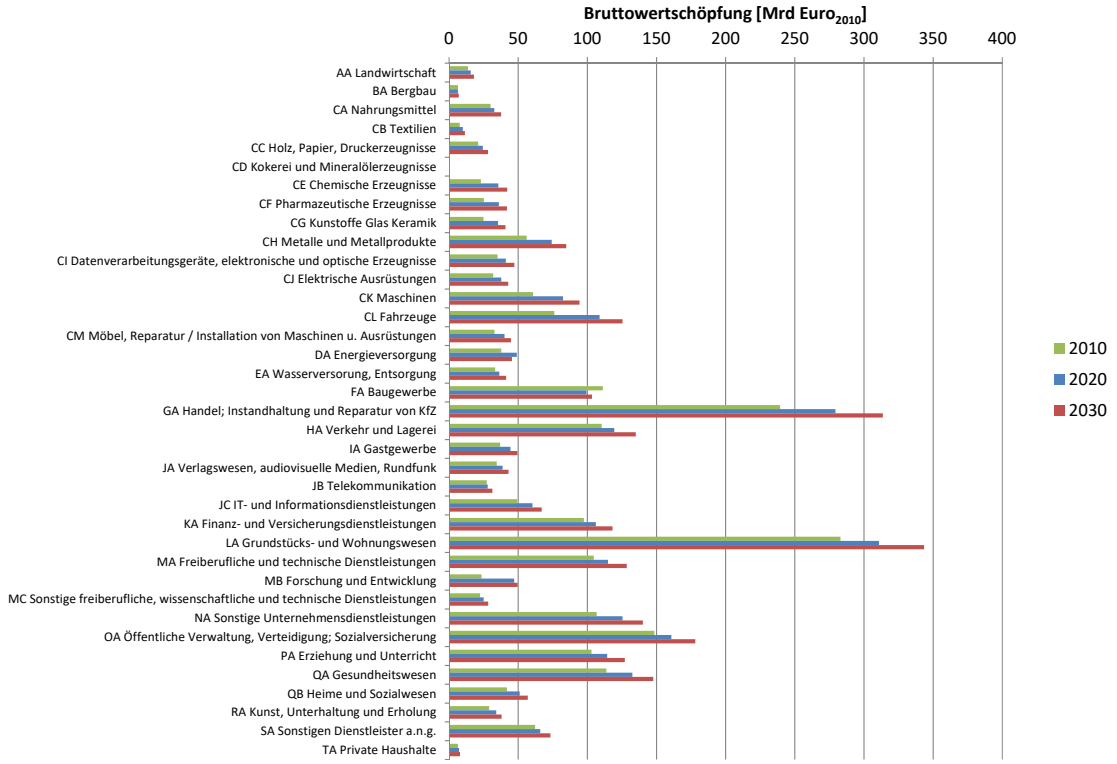



Abbildung 2.3.: Entwicklung der Bruttowertschöpfung je Wirtschaftsunterabschnitt in Milliarden Euro im Referenzszenario von 2010 bis 2030

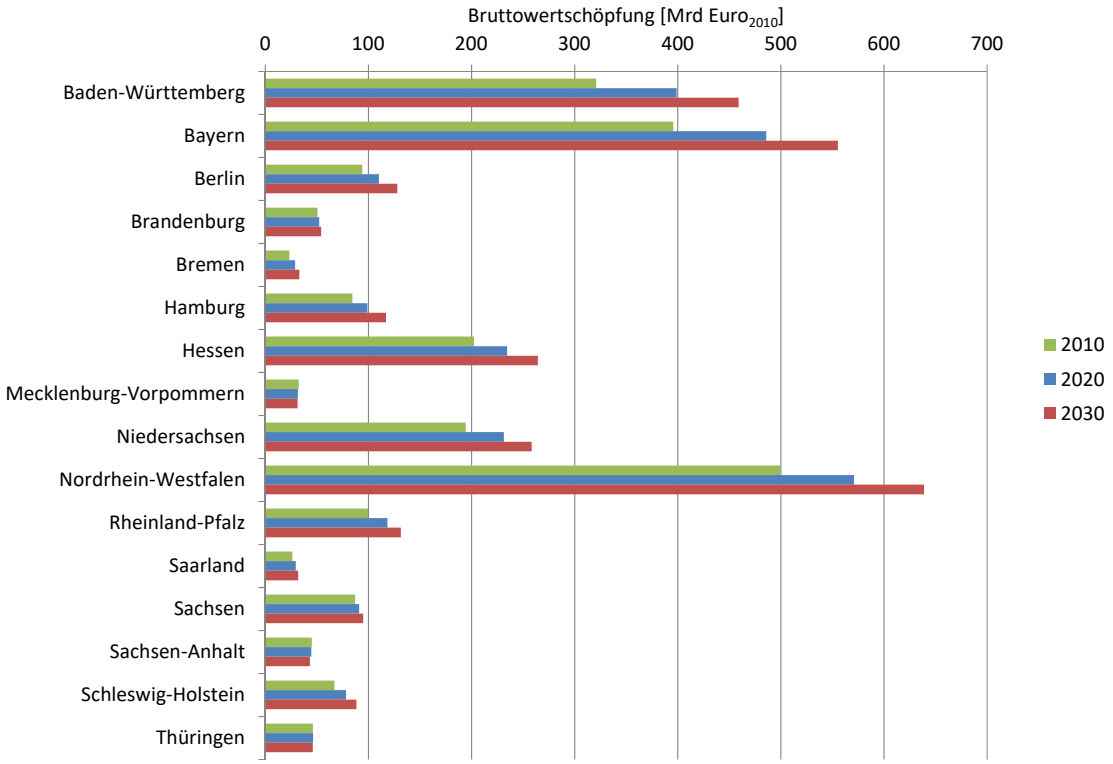



Abbildung 2.4.: Entwicklung der Bruttowertschöpfung je Bundesland in Milliarden Euro im Referenzszenario von 2010 bis 2030 in Zehnjahresschritten

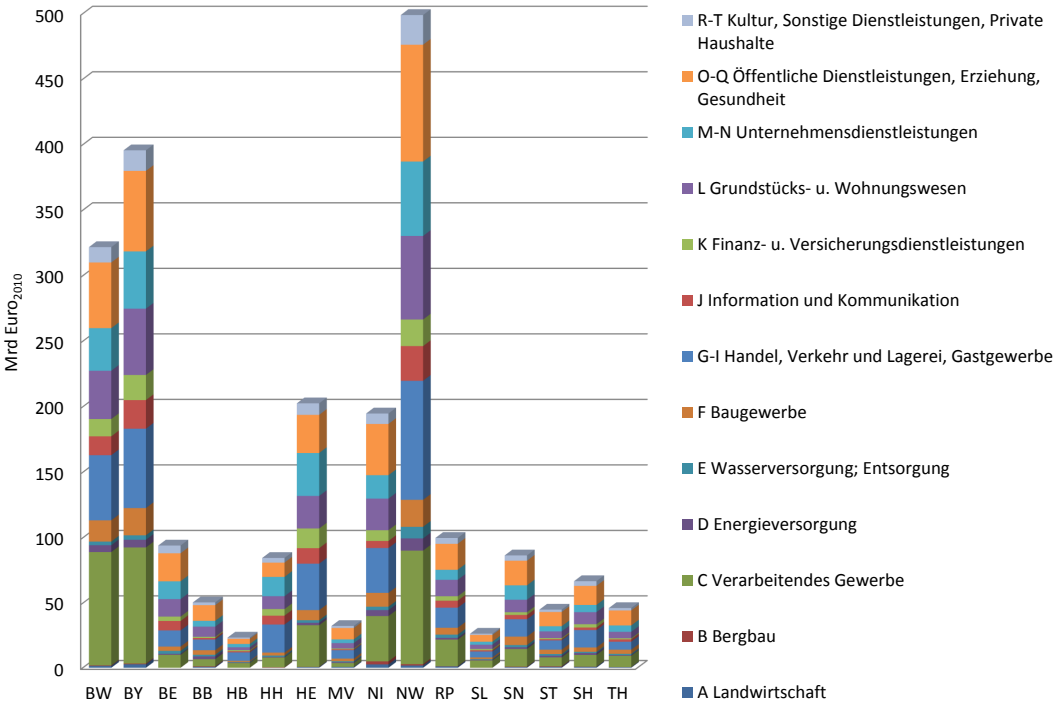



Abbildung 2.5.: Bruttowertschöpfung je Bundesland und Wirtschaftsabschnitt in Milliarden Euro in 2010

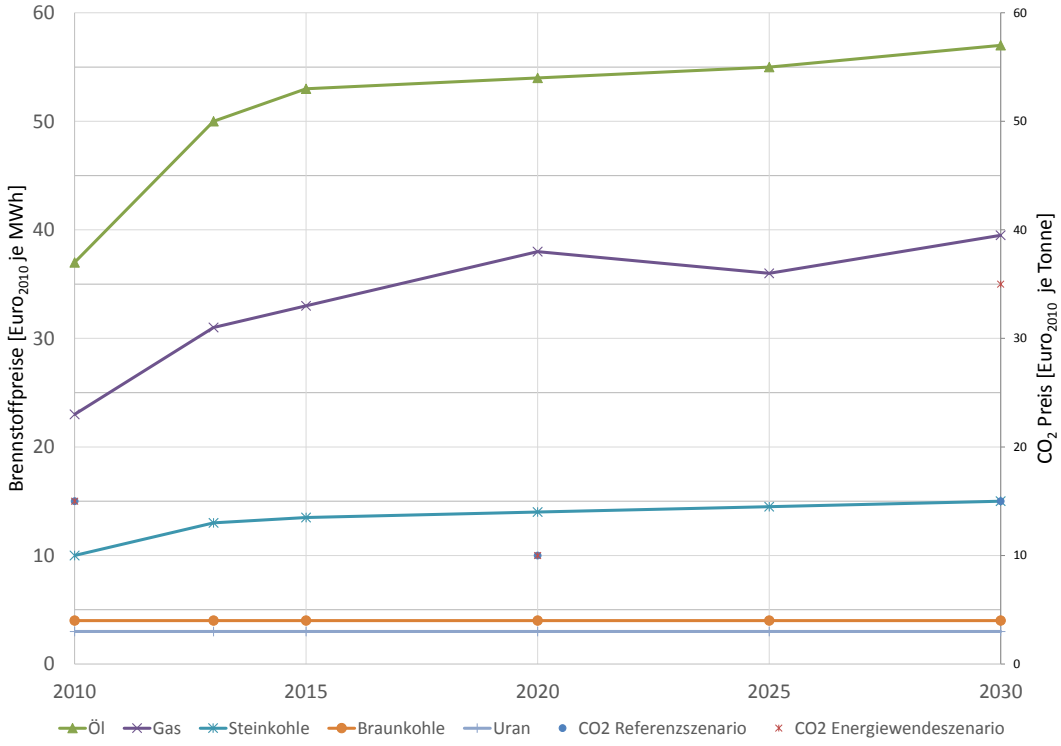



Abbildung 2.6.: Brennstoffpreise in Euro je MWh von 2010 bis 2030 basierend auf Capros et al., 2013 (linke Achse) und $CO_2$-Preise des Referenz- und Energiewendeszenarios in Euro je Tonne von 2010 bis 2030 basierend auf Pfluger et al., 2017a (rechte Achse)

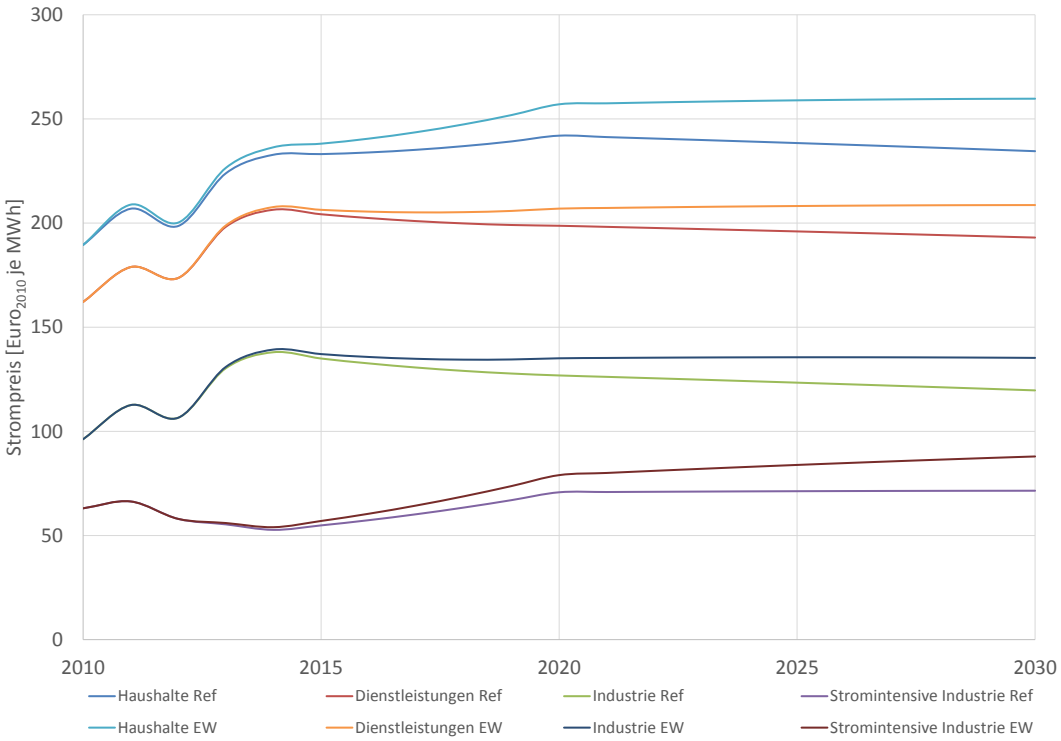



Abbildung 2.7.: Strompreise in Euro je MWh von 2010 bis 2030 in Referenz- und Energiewendeszenario unterschieden nach Haushalten, Dienstleistungsbereichen, Industrie und stromintensiver Industrie. Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Pfluger et al., 2017c

## 2.2. Politischer Rahmen

### 2.2.1. Referenzszenario

Das Referenzszenario beschreibt eine hypothetische Welt, in der die Energiewende nicht weiter voran getrieben wird. Für die Energienachfrage bedeutet dies, dass im Basisjahr 2010 bereits beschlossene Regulierungen und Förderprogramme (z.B. EnEV) zwar berücksichtigt werden, jedoch nicht weiter verschärft werden bzw. auslaufen. Die Entwicklung des Stromsystems basiert in diesem Szenario ausschließlich auf Kosteneffizienz. Politische Ziele in Bezug auf Energieeffizienz, erneuerbare Energien und Treibhausgaseinsparungen werden in diesem Szenario nicht erreicht.

### 2.2.2. Energiewendeszenario

Das Energiewendeszenario ist so ausgestaltet, dass zentrale politische Ziele in Bezug auf Energieeffizienz, erneuerbare Energien und Treibhausgaseinsparungen erreicht werden. Diese sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst. Um dies zu erreichen, werden im Basisjahr 2010 gültige bzw. beschlossene Regulierungen und Förderprogramme fortgeführt und wenn nötig weiter verschärft. Die Ausgestaltung des Stromsystems zeichnet sich durch eine möglich kosteneffiziente Zielerreichung aus (Optimierung mit Nebenbedingungen). Da die Szenarien bereits vor dem im Herbst 2019 beschlossene Klimaschutzprogramm 2030 sowie dem im Januar 2020 beschlossenen Kohleausstiegsgesetz erstellt wurden, konnten diese konkreten Maßnahmen nicht mehr berücksichtigt werden. Eine Einordnung des Energiewendeszenarios vor dem Hintergrund tatsächlicher Entwicklungen seit 2010 und dieser aktuellen politischen Beschlüsse befindet sich am Ende dieses Kapitels.

Tabelle 2.1.: Klimapolitische Ziele der Bundesregierung

| **Kategorie** | **2020** | **2030** | **2040** | **2050** |
|---|---|---|---|---|
| **Treibhausgas-Emissionen** | | | | |
| Treibhausgas-Emissionen im Vergleich zu 1990 | min. - 40 % | min. - 55 % | min. - 70 % | min. - 80 bis -95 % |
| **Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien am Energieverbrauch** | | | | |
| Anteil am Bruttoendenergieverbrauch | 18 % | 30 % | 45 % | 60 % |
| Anteil am Bruttostromverbrauch | min. 35 % | min. 50 % | min. 65 % | min. 80 % |
| Anteil am Wärmeverbrauch | 14 % | | | |
| Anteil im Verkehrsbereich | | | | |
| **Reduktion des Energieverbrauchs und Steigerung der Energieeffizienz** | | | | |
| Primärenergieverbrauch im Vergleich zu 2008 | - 20 % | | | - 50 % |
| Endenergieproduktivität | | + 2,1 % pro Jahr (2008-2050) | | |
| Bruttostromverbrauch im Vergleich zu 2008 | - 10 % | | | - 25 % |
| Primärenergiebedarf Gebäude im Vergleich zu 2008 | | | | etwa - 80 % |
| Wärmebedarf Gebäude im Vergleich zu 2008 | - 20 % | | | |
| Endenergieverbrauch Verkehr im Vergleich zu 2005 | - 10 % | | | - 40 % |

## 2.3. Modellierung von Energieangebot und -nachfrage

### 2.3.1. Energiemodelle

Der Endenergiebedarf der privaten Haushalte für Haushaltsgeräte, Beleuchtung und Klimatisierung wurde für die Langfristszenarien mit dem Modell FORECAST-Residential bestimmt. Die Berechnung der Energienachfrage des Sektors Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) bzw. der Industrie erfolgte mit den Modellen FORECAST-Tertiary bzw. FORECAST-Industry. Methodisch basieren die FORECAST-Modelle auf einem technologiespezifischen Bottom-up-Ansatz, welcher erlaubt, die zukünftige Entwicklung von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen an die technologische Entwicklung in den Sektoren zu knüpfen. Pfluger et al. (2017b) und Fraunhofer ISI (2016) enthalten detaillierte Darstellungen der Modelle und Verweise auf weitere Literatur. Die Energienachfrage von Haushalten, GHD und Industrie wurde für die Langfristszenarien nur national modelliert und liegt nicht in regionaler Auflösung vor.[2]

Der Bedarf und die Bereitstellung von Wärme für Heizung und Warmwasser in Gebäuden (Haushalte und GHD) wurde für die Langfristszenarien mit dem Modell Invert entwickelt. Pfluger et al. (2017b) und Steinbach (2016) enthalten detaillierte Darstellungen von Modell und Datenbasis und Verweise auf weitere Literatur. Kernstück von Invert ist die Datenbasis des Gebäudebestands einschließlich der Technologien zur Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und Klimatisierung. Die Modellierung des Ersatzes von Technologien berücksichtigt die Lebensdauer der Bauteile; der Einsatz neuer Technologien wird unter Integration von akteursspezifischem Investitionsverhalten, Diffusionsrestriktionen und politischen Zielen modelliert. Der Wärmebedarf wurde in Invert nur national modelliert und liegt nicht in regionaler Auflösung vor.[3]

Die Verkehrsnachfrage in den Langfristszenarien wurde mit dem systemdynamischen verkehrsökonomischen Modell ASTRA-D erstellt. Das Modell umfasst zudem die Modalwahl im Güter- und Personenverkehr sowie Fahrzeugflotten inklusive eine Verteilung der Antriebstechnologien. So kann die Energienachfrage nach Verkehrs- und Energieträgern differenziert werden. Die Verkehrsnachfrage wurde nur national modelliert und liegt nicht in regionaler Auflösung vor.[4] Pfluger et al. (2017b) enthält eine kompakte Darstellung

[2] Die Abbildung regionaler Stromnachfrage ist mit der Modellvariante Forecast regional möglich und wurde bereits auf Kreisebene umgesetzt (Elsland et al., 2016). Diese Szenarien sind jedoch nicht mit den Langfristszenarien (Pfluger et al., 2017c) konsistent und finden daher keinen Eingang in diese Arbeit.

[3] Unter Hinzunahme von Daten zum regionalen Gebäudebestand ist ein Herunterbrechen der nationalen Szenarien auf einzelne Regionen möglich und wurde in Sievers et al. (2017) für Bayern umgesetzt. Eine flächendeckende regionale Auflösung liegt jedoch nicht vor.

[4] Für das Bundesland Bayern wurden die nationalen Szenarien mit vereinfachenden Annahmen heruntergebrochen (Sievers et al., 2017). Eine flächendeckende regionale Auflösung liegt jedoch nicht vor.

des ASTRA-Modells, für ausführlichere Beschreibungen sei auf Schade (2005), und, Krail (2009) verwiesen.

In den zur Simulation der Energienachfrage in den unterschiedlichen Sektoren genutzten Modellen FORECAST, Invert und ASTRA hängt die Diffusion von energieeffizienten Technologien neben Kapital- und Betriebskosten auch von Politiken (Effizienzstandards, Energieverbrauchskennzeichnung, finanzielle Förderung etc.) ab. Die Diffusion von energieeffizienten Technologien fällt daher im Energiewendeszenario stärker aus. Dies bedeutet, dass Hemmnisse für die Erhöhung der Energieeffizienz im Energiewendeszenario im Vergleich zur Referenz reduziert sind (siehe auch Abschnitt 1.3).

Die Stromnachfrage aus FORECAST bzw. aus Invert (Wärmepumpen) und ASTRA-D (Elektromobilität) ging als Input an das Modell EnerTile zur detaillierten Optimierung des Elektrizitätssystems im Rahmen der Langfristszenarien. Pfluger et al. (2017b, Kapitel 3) enthält eine kompakte Modellbeschreibung von EnerTile, für ausführlichere Beschreibungen sei auf die Internetseite www.enertile.eu verwiesen, für eine formelle Modellbeschreibung auf Pfluger (2013, Kapitel 4). Das Modell EnerTile wird eingesetzt, um zu gegebenen Rahmenbedingungen kosteneffiziente Entwicklungspfade des Systems bis zum Jahr 2050 zu untersuchen. Zu einer exogenen Stromnachfrage berechnet EnerTile für jeden Zeitschritt den kostenminimalen Erzeugungs- und Infrastrukturmix, das heißt den Ausbau und Einsatz der Kapazitäten an erneuerbaren Energien, konventionellen Kraftwerken, Stromnetzen und Energiespeichern. Die Kostenminimierung erfolgt unter gegebenen Nebenbedingungen: die Strom- und Wärmenachfrage muss gedeckt werden; der stündliche Einsatz einer Technologie wird von der installierten Leistung begrenzt; die Lebensdauer der Technologien wird berücksichtigt; $CO_2$-Emissionen werden über Preise berücksichtigt; mögliche Verschiebungen durch Nachfragemanagement sind begrenzt; zusätzliche szenarienabhängige Nebenbedingungen.

Die Berechnung der Stromerzeugung aus Wind und Photovoltaik erfolgt in EnerTile in hoher regionaler Auflösung, einem 7x7 km Raster.[5] Diese regional hoch aufgelösten Daten wurden den NUTS2-Regionen zugeordnet und in dieser Form zur Weiterverwen-

[5]Die Berechnung der Potenziale für Wind und Photovoltaik ist in Pfluger et al. (2017b, Abschnitt 3.3.4) beschrieben: Die Fläche jeder 7x7 km Kachel wird datenbasiert anteilig Landnutzungsarten zugeordnet und je Landnutzungsart werden Flächenanteile für die Stromerzeugung aus Wind oder Photovoltaik freigegeben. Durch Aggregation der unterschiedlichen Landnutzungsarten kann dann die verfügbare Fläche je Technologie pro Kachel berechnet werden. Das Produkt aus verfügbarer Fläche und spezifischem Flächenbedarf (Leistung je Fläche) ergibt das Potenzial (Leistung) einer Technologie pro Kachel. Im Fall von Photovoltaik beträgt der unterstellte spezifische Flächenbedarf 40 MW pro $km^2$. Im Fall von Wind berücksichtigt der spezifische Flächenbedarf eine sinnvolle Abstandsregelung innerhalb eines Windparks. Neben den Potenzialen werden basierend auf regional hoch aufgelöste Wetterdaten die Volllaststunden sowie die spezifischen Erzeugungskosten berechnet. Diese Informationen gehen dann in die Optimierung der Stromversorgung ein.

dung im Rahmen der vorliegenden Arbeit übergeben.[6] Die Berechnung der Stromerzeugung aus weiteren erneuerbaren und aus konventionellen Energiequellen erfolgt in EnerTile für 6 Netzknotenebenen (Pfluger et al., 2017b). Als Teil der vorliegenden Arbeit wurden die Kapazitäten und Erzeugungsmengen innerhalb einer Netzknotenebene auf NUTS2-Regionen heruntergebrochen. Dieses Vorgehen baut auf mehreren Schritten auf: Zunächst wird für jede Technologie die Kapazität je NUTS2-Region $k_r$ basierend auf der Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur (2015) bestimmt.[7] In einem zweiten Schritt wird für jede NUTS2-Region die Verteilung auf Netzknotenebenen berechnet: Ein Element $a_{rn}$ der Matrix $\mathbf{A}$ beschreibt den Flächenanteil[8] der NUTS2-Region r, der auf die Netzknotenebene n entfällt. Für jede Technologie werden mit dieser Verteilung die Kapazitäten nach NUTS2-Regionen zusätzlich auf Netzknotenebenen verteilt und es ergibt sich die Matrix $\mathbf{B}$ mit den Elementen $b_{rn} = a_{rn}k_r$. Für jede Netzknotenebene wird nun der Anteil der einzelnen NUTS2-Regionen an der Gesamtkapazität dieser Netzknotenebene berechnet: $c_{rn} = b_{rn}/\sum_r b_{rn}$. Diese Verteilung wird dann genutzt, um die oben beschriebenen Daten aus der Stromsystemmodellierung, die lediglich auf Netzknotenebene vorliegen, auf NUTS2-Regionen herunterzubrechen. Die Aggregation der Netzknotenebenen liefert die gewünschte Aufschlüsselung der Daten nach NUTS2-Regionen $\mathbf{e}$. Formell entspricht dies einer Multiplikation der Matrix $\mathbf{C}$ mit den Elementen $c_{rn}$ mit dem Vektor der auf Netzknotenebene vorliegenden Daten $\mathbf{d}$, das heißt $\mathbf{e} = \mathbf{Cd}$.

[6] Der Schlüssel für die Aggregation der Daten aus EnerTile auf NUTS2-Regionen wurde von Prof. Dr. Martin Pudlik (Professor für Regenerative Energiewirtschaft an der TH Bingen) für die vorliegende Arbeit erstellt.

[7] In der Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur sind folgende Erzeugungsanlagen aufgeführt:

- alle Bestandskraftwerke in Deutschland mit einer elektrischen Netto-Nennleistung von mindestens 10 MW (Einzelnennung)
- alle Erzeugungsanlagen kleiner 10 MW, die einen Zahlungsanspruch nach dem EEG haben (Summe nach Bundesland und Energieträger)
- alle Erzeugungsanlagen kleiner 10 MW, die keinen Zahlungsanspruch nach dem EEG haben (nach Energieträger zusammengefasst)

Basierend auf diesen Daten werden für den Kraftwerksbestand in 2012 (Ausgangsjahr der Stromsystemmodellierung) für jede Technologie bzw. Energieträger die in Einzelnennung aufgeführten Kraftwerke basierend auf ihrer Postleitzahl den NUTS2-Regionen zugeordnet. Die Kapazitäten von Anlagen kleiner 10 MW werden jeweils gleichmäßig auf die NUTS2-Regionen des entsprechenden Bundeslandes verteilt. Auf diese Weise werden absolute Kapazitäten je NUTS2-Region errechnet und basierend darauf die prozentuale Verteilung der Gesamtkapazität je Technologie auf die NUTS2-Regionen. Erzeugungsanlagen kleiner 10 MW ohne Zahlungsanspruch nach dem EEG, die nur bundesweit vorliegen, werden basierend auf der sich so ergebende Verteilung ebenfalls auf NUTS2-Regionen heruntergebrochen und den Kapazitäten je NUTS2-Region hinzugefügt.

[8] Eine NUTS2-Region kann zu mehreren Netzknotenebenen gehören, das heißt ihre Fläche kann Überschneidungen mit mehreren dieser sechs Regionen haben. Die Zuteilung der Flächen wurde freundlicherweise von Prof. Dr. Martin Pudlik (Professor für Regenerative Energiewirtschaft an der TH Bingen) übernommen.

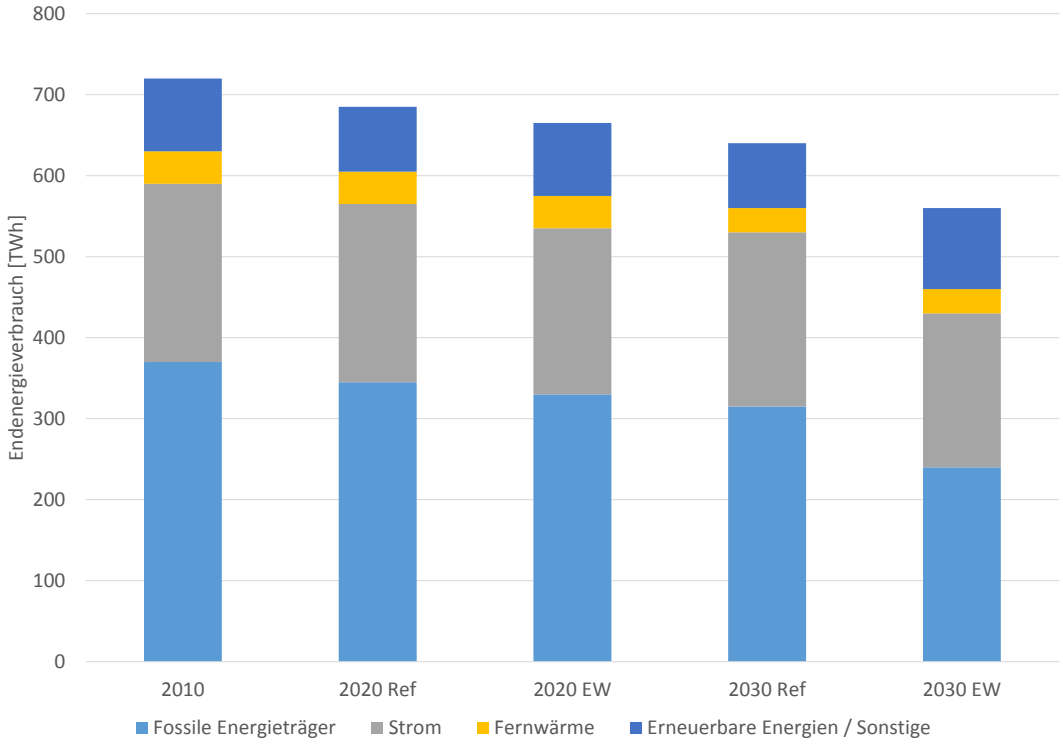



Abbildung 2.8.: Endenergieverbrauch der Industrie in TWh von 2010 bis 2030 in Referenz- und Energiewendeszenario unterschieden nach Energieträgern. Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Pfluger et al., 2017c

### 2.3.2. Ergebnisse der Modellierung von Energieangebot und -nachfrage

Der in Abbildung 2.8 dargestellte Endenergieverbrauch der **Industrie** geht in beiden Szenarien zurück, wobei der Rückgang im Energiewendeszenario wesentlich deutlicher ausfällt. Dieser Rückgang begründet sich zum einen auf steigende Effizienz (hierbei diffundieren energieeffiziente Technologien im Energiewendeszenario stärker als in der Referenz, vlg. Abschnitt 2.3.1), aber auch auf einen strukturellen Wandel. Darüber hinaus werden Prozesse in Bezug auf die eingesetzten Energieträger umgestellt. Im Jahr 2030 verbraucht die Industrie im Energiewendeszenario deutlich weniger Strom und fossile Energieträger als im Referenzszenario, jedoch mehr biogene Brennstoffe.

Die Entwicklung der gesamtdeutschen **Stromnachfrage** im Energiewendeszenario und im Referenzszenario ist in Abbildung 2.9 dargestellt. Im Energiewendeszenario wird steigende Stromnachfrage für Wärmeerzeugung und Elektromobilität zunächst durch erhöhte Effizienz überkompensiert, sodass die Stromnachfrage in 2030 einen Tiefpunkt erreicht

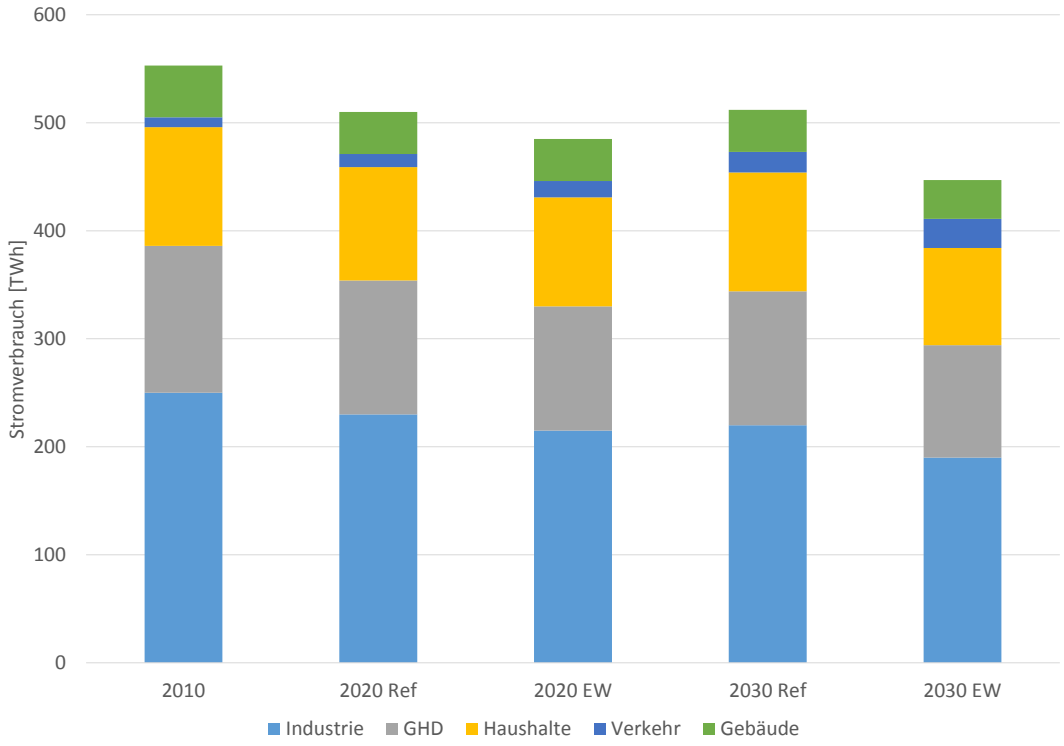



Abbildung 2.9.: Stromnachfrage in TWh von 2010 bis 2030 in Referenz- und Energiewendeszenario unterschieden nach Industrie, Haushalten, Dienstleistungsbereichen, Verkehr und Gebäudewärme. Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Pfluger et al., 2017c

und etwa 15 Prozent unter dem Niveau von 2010 liegt. Danach erfolgt eine starke Sektorkopplung, sodass der Effekt der zusätzlichen Verbraucher dominiert und sich langfristig (Zeithorizont 2050) eine weiter ansteigende Stromnachfrage abzeichnet. Das Referenzszenario zeigt einen ähnlichen Verlauf, wobei die Stromnachfrage durch die geringere Diffusion energieeffizienter Technologien (vgl. Abschnitt 2.3.1) weniger stark sinkt und bereits 2020 wieder ansteigt.

Die Entwicklung der **Stromerzeugungskapazitäten** in den Bundesländern ist für einzelne Jahresscheiben des Energiewendeszenarios und des Referenzszenarios in Abbildung 2.10 für fossile Energieträger und Kernenergie und in Abbildung 2.11 für erneuerbare Energien dargestellt. Im Anhang dieser Arbeit befinden sich zusätzlich detaillierte Tabellen zur installierten, zugebauten und stillgelegten Kapazität nach Technologien und NUTS2-Regionen. Das Energiewendeszenario zeichnet sich im Vergleich zum Referenzszenario durch einen stärkeren Ausbau der Erzeugungskapazitäten aus Onshore- und Offshore-Wind, Photovoltaik und Erdgas aus. Steinkohle fungiert als Brückentechnologie und fällt daher erst 2030 deutlich unter das Ausgangsniveau zurück, wobei dies im Energiewendeszenario stärker ausgeprägt ist als im Referenzszenario. Die Stromerzeugungskapazitäten aus Braunkohle gehen sowohl im Referenz- als auch im Energiewendeszenario deutlich zurück. Allerdings findet im Energiewendeszenario im Gegensatz zum Referenzszenario kein weiterer Ausbau oder Ersatz bestehender Kapazitäten statt, sodass der Rückgang bis 2030 in diesem Szenario wesentlich ausgeprägter ist. Stromerzeugungskapazitäten aus Kernenergie gehen in beiden Szenarien gleichermaßen zurück, da der Beschluss zum Ausstieg aus der Kernenergie auch im Referenzszenario Gültigkeit besitzt. In Bezug auf Wasserkraft wird davon ausgegangen, dass bestehende Potenziale effizient aber bereits ausgeschöpft sind, sodass die Erzeugungskapazitäten in beiden Szenarien auf dem Ausgangsniveau bleiben. Stromerzeugungskapazitäten aus Biomasse werden teilweise nicht ersetzt und gehen in beiden Szenarien zurück.

Die **regionale Verteilung der Stromerzeugungskapazitäten** lässt sich wie folgt beschreiben. Steinkohlekraftwerke befinden sich schwerpunktmäßig in Nordrhein-Westfalen und Baden-Württemberg, gefolgt vom Saarland und Niedersachsen. In Nordrhein-Westfalen fällt der Rückgang der installierten Kapazität besonders deutlich aus. Braunkohlekraftwerke liegen hauptsächlich in Nordrhein-Westfalen, Brandenburg und Sachsen. Der Rückgang der installierten Kapazität konzentriert sich insbesondere auf Nordrhein-Westfalen, gefolgt von Brandenburg, während Sachsen im Energiewendeszenario keinen Rückgang und im Referenzszenario sogar einen leichten Zuwachs erfährt. Kernkraftwerke sind in den südlichen Bundesländern Bayern und Baden-Württemberg, sowie in Niedersachsen und (nachrangig) in Schleswig-Holstein installiert. Der größte Anteil der installierten Kapa-

zität zur Stromerzeugung aus Erdgas liegt in den großen Flächenstaaten Bayern und Nordrhein-Westfalen. Dort ist auch die im Energiewendeszenario zusätzlich installierte Kapazität im Vergleich zum Referenzszenario am größten. Photovoltaik-Aufdachanlagen stehen vor allem in den südlichen Bundesländern Bayern und Baden-Württemberg, gewinnen im Energiewendeszenario aber auch in den mitteldeutschen (insbesondere Nordrhein-Westfalen) und ostdeutschen Bundesländern an Bedeutung. In Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen ist der Ausbau im Referenzszenario sogar größer als im Energiewendeszenario, was damit zu erklären ist, dass er sich in ersterem auf die besten Potenziale beschränkt und in zweiterem die Installation auf Flächen mit geringerem Ertragspotenzial zu einer gleichmäßigeren Verteilung der Anlagen führt. Der größte Anteil an Photovoltaik-Freiflächenanlagen befindet sich in Bayern, gefolgt von Brandenburg, weiterer Ausbau findet lediglich in den sonnenreichen Bundesländern Baden-Württemberg und vor allem Bayern statt. Die wichtigsten Standorte für Stromerzeugung aus Biomasse sind Bayern und Niedersachsen, gefolgt von Baden-Württemberg und Nordrhein-Westfalen. Wasserkraftanlagen stehen vor allem in Bayern und in geringerem Umfang auch in Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz, Hessen und Nordrhein-Westfalen. Offshore-Windenergieanlagen werden in Küstenregionen der Nord- und Ostsee errichtet und basierend auf den Versorgungshäfen den Bundesländern Niedersachsen, Bremen, Hamburg, Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern zugewiesen. Hierbei erfährt Mecklenburg-Vorpommern im Energiewendeszenario den stärksten Zubau. Onshore-Windenergieanlagen stehen insbesondere in nord- und ostdeutschen Bundesländern, deutlichen Zuwachs gibt es in Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern.

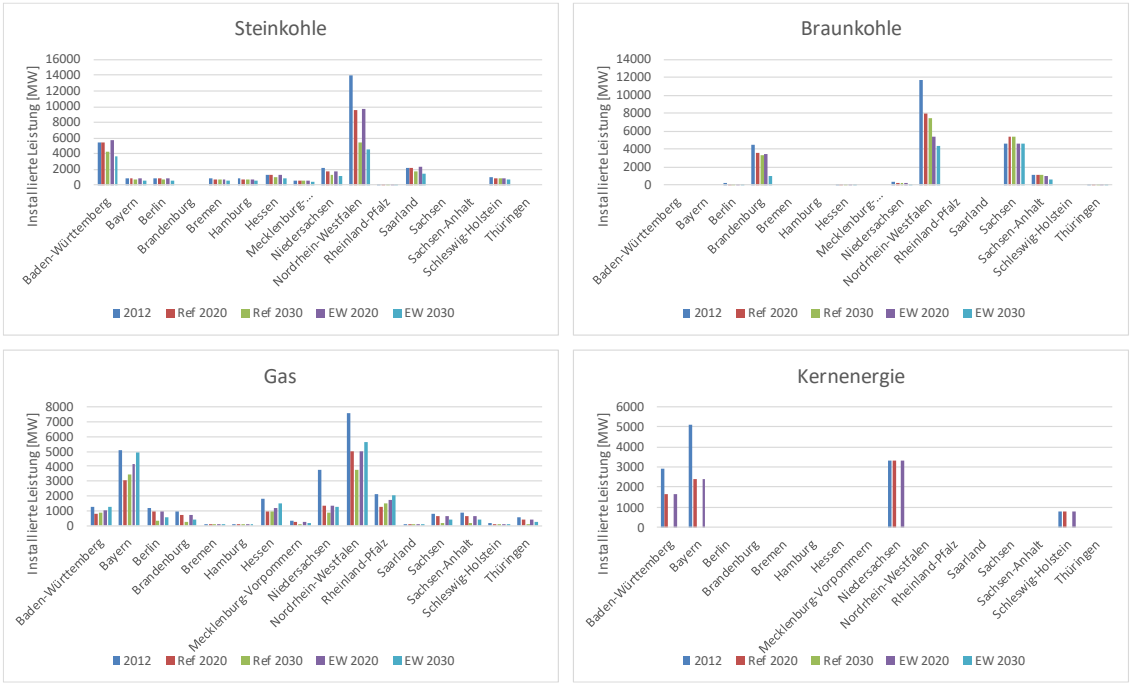



Abbildung 2.10.: Installierte Stromerzeugungskapazität aus fossilen Energieträgern und Kernenergie in MW nach Bundesländern für das Basisjahr 2012, sowie für die Jahre 2020 und 2030 des Referenz- und des Energiewendeszenarios. Quelle: Installierte Kapazität je Technologie für sechs Netzknotenebenen nach Pfluger et al., 2017c, eigene Berechnung der regionalen Verteilung basierend auf Bundesnetzagentur, 2015. Vgl. auch Abschnitt 2.3.1.

Abbildung 2.11.: Installierte Stromerzeugungskapazität aus erneuerbaren Energien in MW nach Bundesländern für das Basisjahr 2012, sowie für die Jahre 2020 und 2030 des Referenz- und des Energiewendeszenarios. Quelle: Installierte Kapazität zur Stromerzeugung aus Biomasse und Wasserkraft und Offshore-Wind nach sechs Netzknotenebenen von Pfluger et al., 2017c, eigene Berechnung der regionalen Verteilung basierend auf Bundesnetzagentur, 2015 für Biomasse und Wasserkraft bzw. Stiftung Offshore, 2019 für Offshore-Wind. Installierte Kapazität zur Stromerzeugung aus Photovoltaik und Onshore-Wind nach NUTS2-Regionen von Pfluger et al., 2017c. Vgl. auch Abschnitt 2.3.1.

Die **erzeugten Strommengen** ergeben sich als Produkt aus installierter Kapazität und Volllaststunden. In beiden Szenarien sind die Kernkraftwerke, so lange sie am Netz sind, voll ausgelastet. Die Auslastung der Braunkohlekraftwerke ist in beiden Szenarien bis 2030 etwas höher als in 2013 und sinkt erst danach im Energiewendeszenario deutlich ab. Die Auslastung der Steinkohlekraftwerke liegt in 2030 im Energiewendeszenario deutlich unter dem Referenzszenario, aber immer noch höher als in 2013. Gaskraftwerke sind in beiden Szenarien nur sehr gering ausgelastet, da sie nur Spitzenbedarfe abdecken, die Auslastung steigt zwischen 2020 und 2030 an, im Energiewendeszenario etwas stärker. Die Volllaststunden der Offshore-Windenergieanlagen steigen in beiden Szenarien aufgrund technischer Entwicklungen deutlich an. Photovoltaik verzeichnet nur einen geringen Anstieg der Auslastung, der sich zwischen den Szenarien kaum unterscheidet. Die Volllaststunden der Onshore-Windenergieanlagen nehmen in beiden Szenarien ähnlich stark zu. Die Auslastung der Biomasse-Stromerzeugungsanlagen geht in beiden Szenarien gleichermaßen zurück. Die erzeugten Strommengen sind in Abbildung 2.12 nach Technologien für das Jahr 2013, sowie für die Jahre 2020 und 2030 des Referenz- und des Energiewendeszenarios dargestellt. Die regionale Verteilung der Stromerzeugung je Technologie wird für die Zwecke dieser Arbeit mit der der Kapazität gleich gesetzt und daher nicht nochmals differenziert dargestellt. Dies ist eine vereinfachende Annahme, da die Auslastung natürlich auch durch regionale abweichende Faktoren (Windprofile, Sonneneinstrahlung, etc.) bestimmt wird.

Der **Netzausbau** im Referenzszenario und im Energiewendeszenario ist bis 2020 gleich und basiert auf EnLAG, BBPIG und TYNDP. Nach 2020 findet in beiden Szenarien weiterer Ausbau statt, im Energiewendeszenario ist er jedoch höher. Der stärkere Ausbau und höhere Anteil an Erdverkabelung im Energiewendeszenario führen zu einem Investitionsdelta von circa 16 Milliarden Euro bis 2030 (Pfluger et al., 2017c).

Der **Wärmebedarf** steigt zunächst noch an und sinkt erst nach 2020 aufgrund steigender Energieeffizienz des Gebäudebestands. Im Energiewendeszenario wirkt sich dies stärker aus als im Referenzszenario, sodass der Energieverbrauch 2030 wieder auf dem Niveau von 2010 liegt. Das Energiewendeszenario zeichnet sich durch einen höheren Anteil an Gas, Strom und Erneuerbare Energien im Vergleich zum Referenzszenario aus. Der Verlauf in beiden Szenarien ist in Abbildung 2.13 dargestellt.

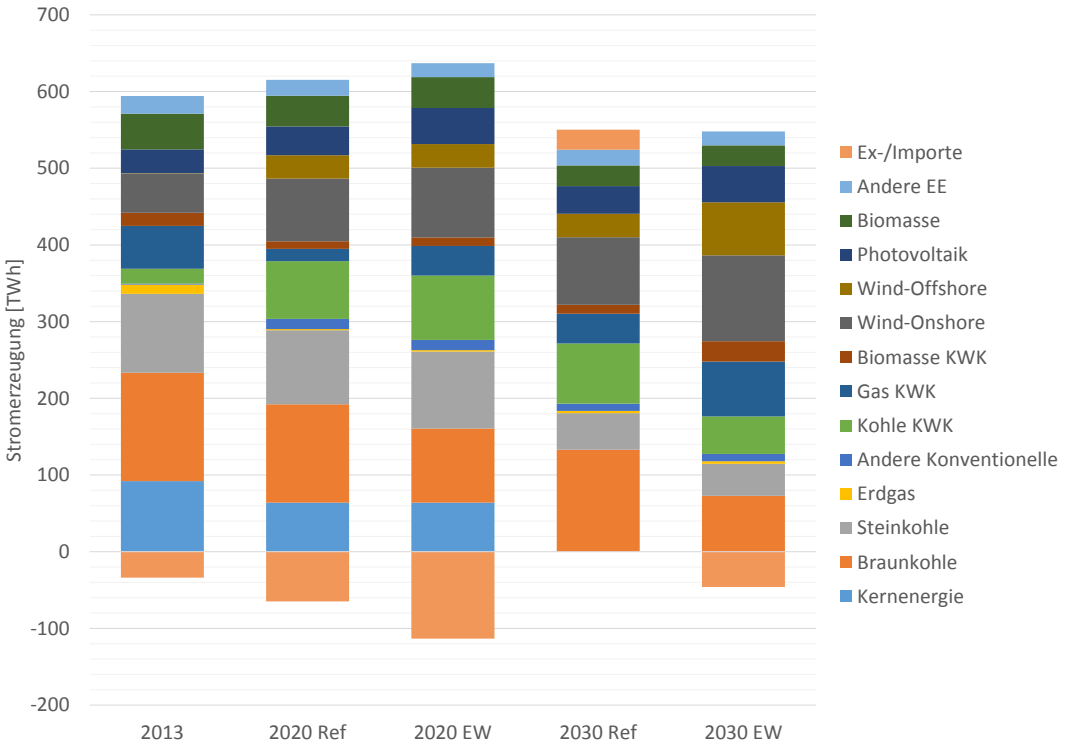



Abbildung 2.12.: Stromerzeugung in TWh nach Technologien für das Jahr 2013, sowie für die Jahre 2020 und 2030 des Referenz- und des Energiewendeszenarios. Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Pfluger et al., 2017c

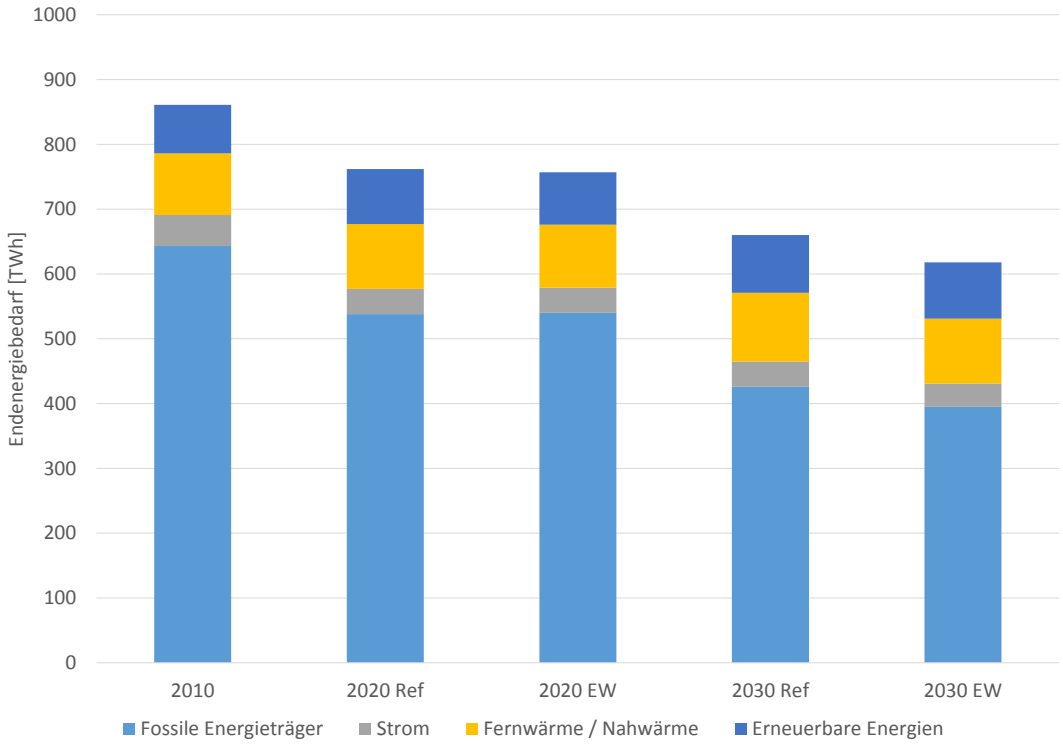



Abbildung 2.13.: Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser von Haushalten und GHD in TWh von 2010 bis 2030 in Referenz- und Energiewendeszenario differenziert nach Energieträgern. Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Pfluger et al., 2017c

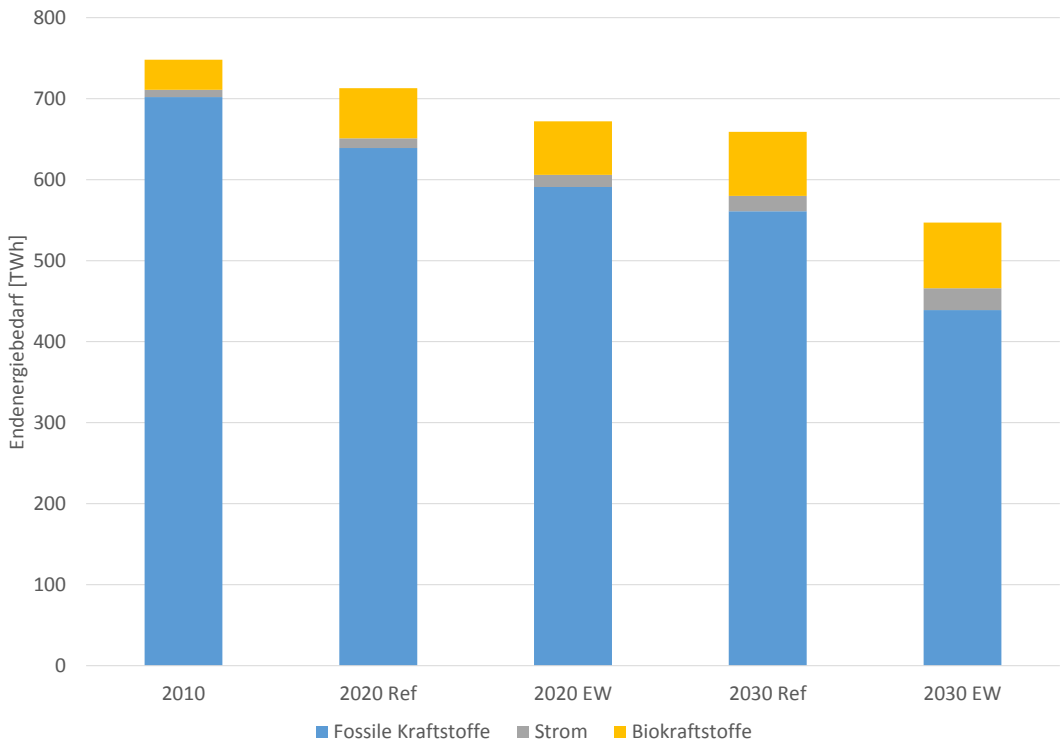



Abbildung 2.14.: Energiebedarf im Verkehr in TWh von 2010 bis 2030 in Referenz- und Energiewendeszenario. Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Pfluger et al., 2017c

Die Energiewende im **Verkehr** ist geprägt durch eine Verschiebung der Modalwahl hin zu emissionsärmeren Fortbewegungsformen einschließlich öffentlichem Verkehr, zunehmende Elektrifizierung und zunehmende Effizienz beim Antriebsstrang. Energiebedarf und Energieversorgung sind in Abbildung 2.14 für beide Szenarien dargestellt. Das Energiewendeszenario zeichnet sich durch einen geringeren Energiebedarf, einen geringeren Anteil fossiler Kraftstoffe und einen höheren Anteil von Strom im Vergleich zum Referenzszenario aus.

## 2.4. Einordnung des Energiewendeszenarios vor dem Hintergrund tatsächlicher Entwicklungen und aktueller politischer Beschlüsse

Wie zuvor beschrieben ist das Energiewendeszenario so ausgestaltet, dass ausgehend vom Basisjahr 2010 die zentralen politischen Ziele in Bezug auf Energieeffizienz, erneuerbare Energien und Treibhausgaseinsparungen erreicht werden. Die aktuellsten Beschlüsse zu konkreten politischen Maßnahmen für die Zielerreichung, das Ende 2019 beschlossene Klimaschutzpaket sowie das Anfang 2020 beschlossene Kohleausstiegsgesetz, sind in dieser expliziten Form nicht im Energiewendeszenario enthalten. Da es sich um ein Szenario handelt, sprich um eine Möglichkeit unter vielen, kann auch nicht der Anspruch erhoben werden, dass die tatsächliche Entwicklung von 2010 bis 2020 derjenigen des Energiewendeszenarios entspricht. Ein Vergleich einiger zentraler Indikatoren des Szenarios mit der tatsächlichen Entwicklung kann jedoch helfen, das Szenario besser einzuschätzen.

Die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen liefert Daten zur tatsächliche Entwicklung der Energienachfrage, die Entwicklung von installierten Stromerzeugungskapazitäten und erzeugten Mengen basiert auf Daten der Bundesnetzagentur. Der Endenergieverbrauch im Verkehr ist von 2010 bis 2018 gestiegen, während er im Energiewendeszenario sinkt. Dadurch entsteht eine Abweichung von ca. 20 Prozent im Jahr 2018. Auch die Energienachfrage der Industrie stieg in diesem Zeitraum marginal, wohingegen die Modellergebnisse des Energiewendeszenario einen Rückgang zeigen. Dies führt zu einer Abweichung von ca. 9 Prozent im Jahr 2018. Der Endenergieverbrauch privater Haushalte und GHD (ohne Strom) ging von 2010 bis 2018 deutlich zurück. Diese Entwicklung passt sehr gut zu dem im Energiewendeszenario modellierten Rückgang der Endenergienachfrage für Gebäudewärme und Warmwasser. Die Stromnachfrage geht im Energiewendeszenario etwas stärker zurück als tatsächlich beobachtet, die Abweichung ist mit ca. 3 Prozent jedoch minimal. Die tatsächlich erzeugte Strommenge stimmt ebenfalls relativ gut mit den modellierten Werten überein. Die tatsächlich installierte Kapazität im Jahr 2020 in Höhe von 220 GW liegt hingegen 19 Prozent über der mit EnerTile modellierten Kapazität von 185 GW im Jahr 2020 des Energiewendeszenarios. Für Photovoltaik, Offshore-Wind, Wasserkraft, Kernenergie und Steinkohle kommt das Energiewendeszenario mit Abweichungen unter 10 Prozent der tatsächlichen Entwicklung sehr nahe. Dagegen liegen die tatsächlich installierten Kapazitäten bei Biomasse um 30 Prozent, bei Onshore-Wind um 32 Prozent sowie bei Braunkohle um 42 Prozent höher als die für das Energiewendeszenario modellierten Werte. Am stärksten ist die relative Abweichung bei Erdgas mit tatsächlich 62 Prozent mehr installierter Kapazität als im Energiewendeszenario.

Es handelt sich beim Energiewendeszenario um ein Zielerreichungsszenario mit normativem Charakter. Es ist nicht Ziel des Szenarios, die Wirkung von einzelnen Politikmaßnahmen [9] zu analysieren, sondern vielmehr einen Entwicklungspfad aufzuzeigen. Daher ist ein direkter Vergleich der im Klimaschutzpaket enthaltenen Maßnahmen mit dem Energiewendeszenario nicht möglich. Beispielsweise kann die für die Senkung der Energienachfrage benötigte stärkere Diffusion von energieeffizienten Technologien durch unterschiedliche Bündel an Politikmaßnahmen erreicht werden. Energienachfragemodelle bilden das höhere Ambitionsniveau der Politik in der Simulation daher häufig durch generische Modellparameter (z.B. einem $CO_2$-Preis) ab, die nicht unbedingt mit einer konkreten Maßnahme verknüpft sind. Im Energiewendeszenario liegt der $CO_2$-Preis im Jahr 2020 bei 20 $Euro_{2010}$ pro Tonne und im Jahr 2030 bei 35 $Euro_{2010}$ pro Tonne. Die im Klimaschutzpaket beschlossene $CO_2$-Bepreisung soll bereits im Jahr 2025 bei 55 Euro je Tonne und damit deutlich höher liegen. Auch wenn für die Erreichung der Sektorziele noch weitere Instrumente (finanzielle Förderung, ordnungsrechtliche Maßnahmen) eingesetzt werden, zeigt dieser Vergleich zumindest auf, dass die zu erwartende Entwicklung tendenziell näher am Energiewendeszenario als am Referenzszenario liegt.

Für die Stromsystemmodellierung werden im Energiewendeszenario bereits konkrete Ziele vorgegeben, die dann als Randbedingung in die Kostenoptimierung eingehen. Beispielsweise wurde für Offshore-Wind ein Ausbauziel von 15GW vorgegeben, der Ausbau von Photovoltaik wird auf 52GW gedeckelt. Beide Ziele entsprechen derzeit geltender Politik, allerdings könnte mit der geplanten EEG-Novelle der Ausbaudeckel für Photovoltaik aufgehoben und das Ausbauziel für Offshore-Wind auf 20GW erhöht werden. Andererseits wird auch die Einführung einer Mindestabstandsregel von 1000 Meter für Onshore-Windenergieanlagen diskutiert. Im Vergleich zum Energiewendeszenario könnte der Ausbau von Onshore-Wind somit etwas geringer, der von Offshore-Wind und Photovoltaik etwas stärker ausfallen. Dennoch wird die Entwicklung wesentlich näher am Energiewendeszenario liegen als am Referenzszenario.

Nach der Gesetzgebung zum Kohleausstieg endet die Kohleverstromung spätestens im Jahr 2038, mit einem Zwischenziel zur installierten Kapazität im Jahr 2030 von 9 GW für Braunkohle und 8 GW für Steinkohle. Im Energiewendeszenario, welches vor diesen konkreten Beschlüssen erstellt wurde, liegt die installierte Kapazität im Jahr 2030 bei 10 GW für Braunkohle und 14 GW für Steinkohle, es fällt somit insbesondere in Bezug auf den Ausstieg aus der Steinkohleverstromung weniger ambitioniert aus. Nach den Beschlüs-

[9] Mönnig, Schneemann, Weber und Zika (2020) analysieren mit einem makroökonometrischen und Input-Output-basierten Modellierungsansatz die Wirkung einzelner Maßnahmen des Klimaschutzprogramms 2030.

sen zum Braunkohleausstieg liegt mit etwa 5 GW der größte Teil der zwischen 2020 und 2030 stillgelegten Kapazität in Nordrhein-Westfalen (beliefert aus dem Rheinländischen Revier), gefolgt von etwa 2 GW in Brandenburg und 1 GW in Sachsen (jeweils beliefert aus der Lausitz). Dies passt grundsätzlich gut zur regionalen Verteilung der Stilllegung im Energiewendeszenario zusammen, mit dem Unterschied, dass im Szenario diese Entwicklung bereits vor 2020 beginnt.

# 3. Impulse

## 3.1. Übersicht

Basierend auf den Szenarien werden ökonomische Impulse abgeleitet, die in den makroökonomischen Kern des Modellinstrumentariums zur Berechnung der ökonomischen Effekte einfließen. Sie entfalten dort direkte, indirekte und induzierte Wirkung. Der makroökonomische Kern (ISI-Macro) und die Wirkung der Impulse werden im folgenden Kapitel beschrieben. Dieses Kapitel widmet sich den Impulsen selbst.

Tabelle 3.1.: Inputs aus den Energiemodellen und transformierter ökonomischer Impuls

| Nr. | Modell Sektor | Input | Ökonomischer Impuls in Euro | Regional |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Enertile Strom | zusätzliche Stromerzeugungskapazität je Technologie und Region in kW | Investitionen in Stromerzeugungstechnologien je Wirtschaftsbereich | ja |
| 2 | Enertile Strom | installierte Stromerzeugungskapazität je Technologie und Region in kW | a) Stromerzeugung: bezogene Vorleistungen je Wirtschaftsbereich | ja |
| | | | b) Wertschöpfung der Stromerzeugung: Abschreibungen, Gewinne, Löhne | ja |
| 3 | Enertile Strom | Zusätzliche Investitionen in Netze in Euro | Zusätzliche Investitionen in Netze je Wirtschaftsbereich | nein |
| 4 | Forecast Strom | Strompreise in Euro/kWh | Stromerzeugung: gelieferte Vorleistungen je Wirtschaftsbereich | nein |
| 5 | Forecast Strom | Stromnachfrage in TWh | Konsumnachfrage Stromerzeugung | nein |

Tabelle 3.1.: Inputs aus den Energiemodellen und transformierter ökonomischer Impuls (Fortsetzung)

| Nr. | Modell Sektor | Input | Ökonomischer Impuls in Euro | Regional |
|---|---|---|---|---|
| 6 | Forecast Energie | Energienachfrage Industrie nach Energieträger in TWh | Veränderung bezogener Vorleistungen je Wirtschaftsbereich | nein |
| 7 | Forecast Strom | zusätzliche Ausgaben für energieeffiziente Technologien in Euro: Haushalte | energieeffiziente Technologien: zusätzlicher Konsum je Wirtschaftsbereich | nein |
| 8 | Forecast Energie | zusätzliche Ausgaben für energieeffiziente Technologien in Euro: Industrie und Dienstleistungsbereiche | energieeffiziente Technologien: zusätzliche Investitionen je Wirtschaftsbereich | nein |
| 9 | Invert Wärme | zusätzliche Ausgaben für Gebäude und Heizsysteme in Euro | a) zusätzliche Investitionen im Baugewerbe | nein |
| | | | b) zusätzlicher Konsum von Dienstleistungen des Grundstücks- und Wohnungswesens | nein |
| 10 | Invert Wärme | Ausgaben der Haushalte für Heizung nach Energieträgern in Euro | Konsum je Wirtschaftsbereich für Heizung | nein |
| 11 | ASTRA Verkehr | Energienachfrage des Verkehrs nach Energieträgern in TWh | a) Konsum je Wirtschaftsbereich für privaten Verkehr | nein |
| | | | b) Vorleistungen je Wirtschaftsbereich für gewerblichen Verkehr | nein |
| 12 | ASTRA Verkehr | zusätzliche Ausgaben für Fahrzeuge in Euro: Haushalte | zusätzlicher Konsum von Fahrzeugen | nein |
| 13 | ASTRA Verkehr | zusätzliche Ausgaben für Fahrzeuge in Euro: Industrie und Dienstleistungsbereiche | zusätzliche Investitionen in Fahrzeuge | nein |
| 14 | ASTRA Verkehr | zusätzliche Investitionen in Verkehrsinfrastruktur in Euro | zusätzliche Investionen in Infrastruktur je Wirtschaftsbereich | nein |

Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über die Impulse. Im linken Teil der Tabelle sind die szenarienbezogenen Inputs dargestellt. Sie wurden entweder direkt aus Pfluger et al. (2017c) entnommen oder (falls sie dort nicht im nötigen Detailgrad beschrieben waren) aus den zugrunde gelegten Energiemodellen zur Verfügung gestellt. Die Ordnung der Inputs bezieht sich dabei auf die Energiemodelle. Sie liegen in unterschiedlichen Einheiten und für unterschiedliche Zeitpunkte oder Zeitabschnitte vor. Daraus lassen sich über unterschiedliche Transformationsschritte Impulse für den makroökonomischen Kern des Modells ableiten. Diese sind im rechten Teil der Tabelle dargestellt. Für das ökonomische Modell müssen sie auf jährlicher Basis vorliegen. Die Impulse betreffen Endnachfrage (Konsum, Staatskonsum, Investitionen, Exporte), sekundäre Inputs (Vorleistungen), primäre Inputs (Wertschöpfung) und Beschäftigung. Hierzu werden 72 Wirtschaftsbereiche (Gütergruppen und Produktionsbereiche) differenziert und nach inländischer Produktion und Importen unterschieden. Wenn möglich, erfolgt zudem eine regionale Zuweisung. Die Transformation der Impulse geschieht teilweise innerhalb und teilweise außerhalb des Modells. Im nachfolgenden Teil des Kapitels werden jeweils die Inputs aus den Energiemodellen, Methodik und Datenbasis der Transformation und die abgeleiteten ökonomischen Impulse detailliert beschrieben. Die zur formellen Beschreibung der Transformation verwendeten Variablen werden jeweils eingeführt und sind zur Erhöhung der Übersichtlichkeit zusätzlich in Tabelle 3.2 zusammengefasst.

Tabelle 3.2.: Zusammenfassung der Variablen zur Beschreibung der Transformation der Inputs aus den Energiemodellen in ökonomische Impulse

| Variable | Erläuterung |
|---|---|
| $i$ | Gütergruppe |
| $j$ | Produktionsbereich (Spalten) |
| $t$ | Zeitindex |
| $\Delta t$ | Zeitschritt |
| $T$ | Stromerzeugungstechnologie |
| $TK$ | Komponente der Technologie T (variiert für Investitionen und Vorleistungen) |
| $b$ | Investitionen |
| $\beta$ | Kostendegressionsfaktor |
| $u$ | Verteilung auf Komponenten |
| $v$ | Verteilung je Komponente auf Gütergruppen |
| $w$ | Verteilung je Komponente auf regionale Wirkungskategorien |
| $rtyp$ | Regionale Wirkungskategorie |
| | $rtyp = 1$ Standort der Energieerzeugungsanlage |
| | $rtyp = 2$ Standort des Komponentenherstellers |
| | $rtyp = 3$ ohne regionale Zuordnung |
| | $rtyp = 4$ Ausland |
| | $rtyp = 5$ Inland ohne regionale Zuordnung |
| $Kap$ | Stromerzeugungskapazität |
| spez | spezifisch, hier: auf Leistung bezogen |
| bu | bottom up |
| $\phi$ | Anteil heimischer Produktion |
| $r$ | NUTS2-Regionen |
| $\alpha$ | Regionale Verteilung auf NUTS2-Ebene |
| $VL$ | Vorleistungen für die Stromerzeugung |
| $z_{ij}$ | Vorleistungen von Gütergruppe i an Produktionsbereich j |
| $v$ | Wertschöpfung |
| $w$ | Arbeitnehmerentgelte |
| $k$ | Abschreibungen |
| $p$ | Nettobetriebsüberschüsse |
| $i$ | Verzinsung |
| $\tau$ | Lebensdauer |
| $\gamma$ | regionale Verteilung der Betreiber von Offshore-Windenergieanlagen |
| inl | inländisch |
| imp | importiert |
| $l$ | Arbeitskräftebedarf |
| $con$ | Stromintensität |
| $p$ | Strompreis |
| $z_{ij}$ | Vorleistung von Gütergruppe i an Produktionsbereich j |
| $a_{ij}$ | Input von Gütergruppe i je Output des Produktionsbereich j |
| $x$ | Produktionswert |

## 3.2. Nationale Impulse mit regionaler Zuweisung

Ein Teil der ökonomischen Impulse können auch regional zugewiesen werden. Dies betrifft die Investitionen in Stromerzeugungsanlagen (Nr. 1 in Tabelle 3.1), sowie die sekundären und primären Inputs für deren Betrieb (Nr. 2a bzw. 2b in Tabelle 3.1). Diese Impulse werden aus physischen Inputs aus dem Modell EnerTile abgeleitet. Hierbei wird zwischen den in Tabelle 3.3 aufgeführten erneuerbaren, nuklear und fossil basierten Technologien unterschieden.

### 3.2.1. Stromerzeugung: Investitionen

Der Zubau von Stromerzeugungsanlagen ist mit Investitionen verbunden. In den folgenden Abschnitten werden das methodische Vorgehen und die zugrunde liegende Datenbasis für die Transformation der physischen Inputs zu einem sektoral und (teilweise) regional zugewiesenen Investitionsimpuls erläutert.

#### 3.2.1.1. Transformation: Methodisches Vorgehen

Die zugebaute Kapazität (inklusive Ersatz bestehender Kapazitäten) in kW je Technologie wird aggregiert für die Zeitspanne 2012 bis 2020 und 2020 bis 2030 aus dem Modell EnerTile zur Verfügung gestellt. Die Inputs liegen für Wind und Photovoltaik bereits in der gewünschten regionalen Auflösung (NUTS2-Ebene) vor. Für weitere erneuerbare und konventionelle Energiequellen sind sie nur für die 6 Netzknotenebenen verfügbar und werden in einem ersten Transformationsschritt jeweils auf die zugehörigen NUTS2-Regionen verteilt.[1] Für eine jährliche Auflösung der Inputs wird die aggregierte Zubaumenge für die Zeitabschnitte 2012 bis 2020 und 2020 bis 2030 jeweils gleichmäßig auf einzelne Jahre in diesem Zeitraum verteilt, da keine anderen Informationen über die zeitliche Verteilung

Tabelle 3.3.: Stromerzeugungstechnologien im makroökonomischen Modell

| Erneuerbare Energien | Konventionelle Energien |
|---|---|
| PV-Aufdachanlage | Erdgas |
| PV-Freiflächenanlage | Steinkohle |
| Onshore-Wind | Braunkohle |
| Offshore-Wind | Kernkraft |
| Biomasse | |
| Wasserkraft | |

[1] Hierzu sei auf die Ausführungen in Kapitel 2 Abschnitt 2.3.1 verwiesen.

vorliegen. Detaillierte, nach Technologien differenzierte Tabellen der zusätzlichen Kapazitäten je Region befinden sich im Anhang (Tabellen A.3 bis A.9). Kernenergie, Wasserkraft und Biomasse sind nicht dargestellt, da hier kein Ausbau stattfindet (vgl. auch Abschnitt 3.2.1.2).

Zur Ableitung des Investitionsimpulses wird jeder der betrachteten Technologien ein spezifischer (d.h. auf die Leistung bezogener) monetärer Wert zugewiesen. Die entsprechenden Werte und dazugehörigen Quellen sind ebenso wie die Datenbasis für die folgenden Schritte zur sektoralen und regionalen Zuweisung in Abschnitt 3.2.1.2 beschrieben. Somit wird die gesamte Summe an Investitionen nicht nur bestimmt durch das Niveau des Ausbaus sondern darüber hinaus durch den Technologiemix.

Die Technologien unterscheiden sich nicht nur bezüglich des Niveaus ihrer spezifischen Investitionen, sondern auch im Hinblick auf die Struktur der benötigten Güter und Dienstleistungen. Idealerweise wären die einzelnen Energieerzeugungsanlagen als Gut bzw. Produktionsbereich in der im Modell verwandten Input-Output-Tabelle abgebildet. Die für den Zubau nötigen Investitionen würden dann die jeweilige Nachfrage erhöhen und die voneinander abweichenden Vorleistungsstrukturen würden die indirekten Effekte präzise abbilden. Da eine solche detaillierte Input-Output-Tabelle jedoch nicht verfügbar ist, müsste der Nachfrageimpuls in der jeweiligen Gütergruppe erfolgen, welcher die Energieerzeugungsanlage enthält. Dies ist jedoch schwierig, da meist nur einzelne Komponenten der Anlage einer Gütergruppe zugeordnet sind, bei einer Photovoltaik-Anlage beispielsweise die Solarzellen als Teil der Gütergruppe 32 Nachrichtentechnik, Rundfunk- und Fernsehgeräte, elektronische Bauelemente (Destatis, 2008). Diese machen jedoch weniger als ein Fünftel der Investitionen aus (Hirschl et al., 2010). Und selbst wenn sich die gesamte Energieerzeugungsanlage einer einzigen Gütergruppe zuordnen ließe, würde die für den entsprechenden Produktionsbereich gegebene durchschnittliche Vorleistungsstruktur unter Umständen erheblich von der für die Herstellung der Anlage nötigen d.h. anlagenspezifischen Vorleistungsstruktur abweichen. Daher wurde für die vorliegende Arbeit ein techno-ökonomischer Ansatz gewählt, welcher in Abbildung 3.1 schematisch dargestellt ist und nachfolgend formal beschrieben wird.

Für jede betrachtete Technologie $T$ werden die spezifischen Investitionen $b_T^{\text{spez}}$ auf einzelne Bestandteile bzw. Komponenten $TK$ verteilt, die sich den Bereichen Herstellung der Anlagenkomponenten, Planung und Projektierung sowie Installation zuordnen lassen. Die Verteilung (Variable $u$ in Gleichung 3.1) basiert auf der Literatur entnommenen Kostenstrukturen, die in Abschnitt 3.2.1.2 dargestellt sind. Da für bestimmte Technologien bzw. für einzelne ihrer Elemente noch von starken Kostensenkungspotenzialen ausgegangen wird, werden Degressionsfaktoren hinterlegt (Variable $\beta$ in Gleichung 3.1). Jedes Kosten-

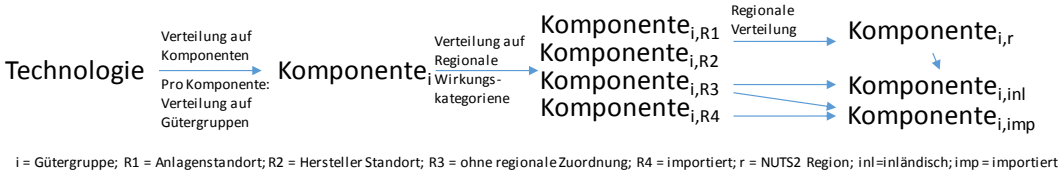



Abbildung 3.1.: Transformation der Impulse

element wird nun wenn möglich einer einzelnen, ansonsten anteilig mehreren Gütergruppen zugeordnet (Variable $v$ in Gleichung 3.1). Diese Verteilungsschritte sind im linken Teil der Abbildung 3.1 dargestellt.

Zusätzlich wird für jedes Kostenelement definiert, wo die Investitionen wirksam werden (mittlerer Teil der Abbildung 3.1). Hierfür erfolgt eine anteilige Zuordnung zu regionalen Wirkungskategorien $rtyp$ (Variable $w$ in Gleichung 3.1):

- Standort der Energieerzeugungsanlage ($rtyp = 1$)
- Standort des Komponentenherstellers ($rtyp = 2$, nur für Onshore-Wind, Offshore-Wind und Photovoltaik)
- Ohne regionale Zuordnung ($rtyp = 3$)
- Im Ausland ($rtyp = 4$)

$$b^{\text{spez}}_{T,i,\text{rtyp},t} = b^{\text{spez}}_{T,2012} \sum_{\text{TK}} u^{inv}_{\text{TK}} \beta_{TK,t} v^{inv}_{\text{TK,i}} w^{inv}_{\text{TK, rtyp}} \tag{3.1}$$

Der gesamte durch Investitionen in Stromerzeugungstechnologien erzeugte Impuls je Gütergruppe $b^{bu}_i$ ergibt sich durch Multiplikation der spezifischen Investitionen je Technologie, Gütergruppe und regionaler Wirkungskategorie mit der jährlich zugebauten Erzeugungskapazität pro Technologie $\Delta\text{Kap}_T$ und Aggregation der regionalen Wirkungskategorien:

$$b^{bu}_{i,t} = \sum_{\text{rtyp}=1}^{4} \sum_{T} \Delta\text{Kap}_{T,t} b^{\text{spez}}_{T,i,\text{rtyp},t} \tag{3.2}$$

Die ersten beiden Wirkungskategorien lassen sich direkt deutschen NUTS2-Regionen und somit inländischer Produktion zuordnen (3.3). Die letzte Kategorie umfasst importierte Investitionsgüter (3.4). Die Verteilung der Investitionen ohne regionale Zuordnung

auf inländisch hergestellte bzw. importierte Investitionsgüter basiert auf den Anteilen $\phi_i^b$ (inländische Herstellung) bzw. $1 - \phi_i^b$ (Importe) der jeweiligen Gütergruppe in den Daten der Input-Output-Tabelle von 2012.[2]

$$b_{i,inl,t}^{bu} = \sum_{\text{rtyp}=1}^{2} \sum_{T} \Delta\text{Kap}_{T,t} b_{T,i,\text{rtyp},t}^{\text{spez}} + \sum_{T} \Delta\text{Kap}_{T,t} b_{T,i,\text{rtyp}=3,t}^{\text{spez}} \phi_i^b \tag{3.3}$$

$$b_{i,imp,t}^{bu} = \sum_{T} \Delta\text{Kap}_{T,t} b_{T,i,\text{rtyp}=4,t}^{\text{spez}} + \sum_{T} \Delta\text{Kap}_{T,t} b_{T,i,\text{rtyp}=3,t}^{\text{spez}} (1 - \phi_i^b) \tag{3.4}$$

Den beiden zuerst genannten Wirkungskategorien liegt jeweils eine regionale Verteilung $\alpha$ auf die 38 NUTS2-Regionen $r$ zugrunde, die spezifisch für eine Technologie bzw. Komponente ist:

$$\alpha_{\text{TK,rtyp,r,t}}^{inv} = \begin{cases} \frac{\Delta\text{Kap}_{T,r,t}}{\sum_r \Delta\text{Kap}_{T,r,t}} & \text{für rtyp} = 1 \\ \alpha_{\text{TK,rtyp,r,2012}} & \text{für rtyp} = 2 \end{cases} \tag{3.5}$$

Diese Allokation ist im rechten Teil von Abbildung 3.1 dargestellt. Die Investitionen, die am Standort der Energieerzeugungsanlagen wirksam werden, werden basierend auf den regionalen Ausbaupfaden verteilt, die exogener szenariobezogener Input sind. Zur Ermittlung der regionalen Verteilung der relevanten Komponentenhersteller wurden für die Technologien Offshore-Wind und Onshore-Wind und Photovoltaik diverse Quellen ausgewertet (siehe Abschnitt 3.2.1.2). Soweit verfügbar wurde basierend auf den Marktanteilen gewichtet. Waren diese nicht verfügbar, wurden Mitarbeiterzahlen als Proxy genutzt. Diese regionale Zuordnung ist statisch. Dies bedeutet, dass zusätzliche oder wegfallende Wertschöpfung basierend auf der derzeitigen Herstellerstruktur verteilt wird und die Szenarien keine entsprechende Veränderungen enthalten. Diese Annahme ist angreifbar, insbesondere da sich der Markt der Technologien zur erneuerbaren Energieerzeugung in den letzten Jahren sehr dynamisch entwickelt hat. Andererseits wäre eine Einschätzung zu zukünftigen Marktanteilen der Unternehmen höchst spekulativ.

Basierend auf den mit dieser Verteilung ermittelten spezifischen Investitionen pro Technologie, Gütergruppe und Region (3.6), können durch Multiplikation mit der jährlich zugebauten Erzeugungskapazität pro Technologie und Region die absoluten Investitionen pro Technologie, Gütergruppe und Region berechnet werden (3.7). Durch die Aggregation aller Technologien ergibt sich dann der direkt regional zugeordnete Investitionsimpuls je

[2] Analog zum Vorgehen bei den endogen ermittelten Investitionen in Kapitel 4.

Gütergruppe (3.8). Die überregionalen Effekte werden erst mit der Top-down-Verteilung regional zugeordnet.

$$b^{\text{spez}}_{T,i,r,t} = b^{\text{spez}}_{T,2012} \cdot \sum_{\text{TK}} \sum_{\text{rtyp}=1}^{2} u^{inv}_{\text{TK}} \beta_{TK,t} v^{inv}_{\text{TK,i}} w^{inv}_{\text{TK, rtyp}} \alpha^{inv}_{\text{TK,rtyp,r,t}} \tag{3.6}$$

$$b^{bu}_{T,i,r,t} = b^{\text{spez}}_{T,i,r,t} \sum_{r} \Delta\text{Kap}^{bu}_{T,r,t} \tag{3.7}$$

$$b^{bu}_{i,r,t} = \sum_{T} b^{bu}_{T,i,r,t} \tag{3.8}$$

#### 3.2.1.2. Transformation: Datenbasis

Im folgenden Abschnitt wird die Datenbasis für die zuvor beschriebene Transformation für die einzelnen Technologien dargestellt. Er enthält Informationen zur Höhe der spezifischen Investitionen, zu ihrer Entwicklung (Kostendegression) und zu ihrer Struktur, das heißt zu ihrer Verteilung auf einzelne Komponenten.[3] Die Zuordnung der einzelnen Komponenten bzw. Kostenbestandteile zu Gütergruppen kann ebenfalls den Tabellen des folgenden Abschnitts entnommen werden. Sie erfolgt für alle Technologien auf Basis des Güterverzeichnis für Produktionsstatistiken des statistischen Bundesamts (Destatis, 2008) und wurde mit einer im Rahmen des Projekts EmployRES (Duscha et al., 2016; Duscha et al., 2014) erstellten Datenbasis, die für die Klassifikation der Wirtschaftszweige 2003 vorliegt, abgeglichen. Für alle Technologiekomponenten wird zudem die Zuordnung zu regionalen Wirkungskategorien angegeben.

**Photovoltaik** Die Höhe der spezifischen Investition basiert auf Pfluger et al. (2017b). Die Verteilung auf die einzelnen Komponenten orientiert sich an Kelm et al. (2014), und, Hirschl et al. (2010). Die Kostenentwicklung für die einzelnen Komponenten stammt aus Pfluger et al. (2017b): Für Module und deren vorgelagerten Wertschöpfungsstufen wird von 2014 bis 2020 eine Degression von 7% p.a. angenommen, von 2020 bis 2030 von 6% p.a.. Für alle anderen Komponenten wird nur noch eine geringe Kostensenkung von 0,5% p.a. prognostiziert. Für die regionale Zuordnung wurde folgendes Vorgehen gewählt und durch Expertengespräche[4] validiert: Für Dienstleistungen rund um Planung, Beschaffung

[3] Die Tabellen enthalten die spezifischen Investitionen je Komponente $I^{\text{spez}}$ sowie (als Summe) die gesamte spezifische Investition $b^{\text{spez}}$. Ihre Verteilung $u$ auf die einzelnen Komponenten kann daraus berechnet werden.

[4] Gespräche wurden mit Dr. Benjamin Pfluger (Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Projektleiter im Competence Center Energiepolitik und Energiemärkte des Fraunhofer ISI) und Prof. Dr. Martin Pudlik (Professor für Regenerative Energiewirtschaft an der TH Bingen) geführt.

und Installation der Anlagen wurde angenommen, dass sie am Standort der Anlage selbst erbracht werden. Für die weiteren Komponenten konnten, basierend auf Kelm et al. (2014) und Duscha et al. (2016), Importanteile angegeben werden und die inländischen Anteile wurden den Hauptherstellern zugeordnet. Komponenten, für die weder aus Branchenanalysen Informationen zu Hauptherstellern entnommen werden konnten, noch Daten zu Importanteilen verfügbar waren, wurden in die Kategorie 3 (ohne regionale Zuordnung) eingeordnet. Im Fall von Photovoltaik betrifft dies die metallischen Rohstoffe. Die zur Bestimmung der Haupthersteller herangezogenen Branchenanalysen sind in der Tabelle selbst angegeben. Dort ist auch der jeweilige Parameter aufgeführt, der zur Berechnung der Marktanteile verwendet wurde. Die Zuordnung der Hersteller zu NUTS2-Regionen ist Ergebnis eigener Recherchen.

Tabelle 3.4.: Investitionsstruktur PV-Aufdachanlagen

| Komponente | $I^{spez}$ | rtyp (Anteil) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | [$Euro_{2010}$/kW] | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Silizium | 39 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Wafer | 59 | 0 | 0,3 | 0 | 0,7 |
| Solarzellen | 174 | 0 | 0,2 | 0 | 0,8 |
| Module | 96 | 0 | 0,4 | 0 | 0,6 |
| Metallische Rohstoffe | 105 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Wechselrichter | 110 | 0 | 0,9 | 0 | 0,1 |
| Kabel | 5 | 0 | 0,85 | 0 | 0,15 |
| Steckverbinder | 5 | 0 | 0,85 | 0 | 0,15 |
| Montage System | 96 | 0 | 0,85 | 0 | 0,15 |
| Montage | 192 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Netzanschluss | 76 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Planung | 163 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Handel Module | 101 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Handel Wechselrichter | 28 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Handel Installationsmaterial | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Summe | 1250 | 0,45 | 0,25 | 0,08 | 0,21 |

Tabelle 3.5.: Investitionsstruktur PV-Freiflächenanlagen

| Komponente | $I^{spez}$ | rtyp (Anteil) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | [$Euro_{2010}$/kW] | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Silizium | 34 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Wafer | 52 | 0 | 0,15 | 0 | 0,85 |
| Solarzellen | 153 | 0 | 0,1 | 0 | 0,9 |
| Module | 85 | 0 | 0,15 | 0 | 0,85 |
| Metallische Rohstoffe | 93 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Wechselrichter | 96 | 0 | 0,9 | 0 | 0,1 |
| Kabel | 12 | 0 | 0,85 | 0 | 0,15 |
| Steckverbinder | 12 | 0 | 0,85 | 0 | 0,15 |
| Montage System | 50 | 0 | 0,85 | 0 | 0,15 |
| Montage | 100 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Netzanschluss | 80 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Planung | 35 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Handel Module | 89 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Handel Wechselrichter | 24 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Handel Installationsmaterial | 6 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Summe | 920 | 0,36 | 0,24 | 0,10 | 0,30 |

Tabelle 3.6.: Zuordnung der Investitionen in PV-Anlagen zu Gütergruppen

| Komponente | Gütergruppe (Anteil) |
|---|---|
| Silizium | Chemische Erzeugnisse |
| Wafer | Chemische Erzeugnisse |
| Solarzellen | Glas und Glaswaren (0,1) |
| | DV-Geräte, elektron. u. optische Erzeugnisse (0,9) |
| Module | DV-Geräte, elektron. u. optische Erzeugnisse (0,9) |
| | Elektrische Ausrüstungen (0,1) |
| Metallische Rohstoffe | Metallerzeugnisse |
| Wechselrichter | Elektrische Ausrüstungen |
| Kabel | Elektrische Ausrüstungen |
| Steckverbinder | Elektrische Ausrüstungen |
| Montage System | Metallerzeugnisse |
| Montage | Hochbauarbeiten |
| Netzanschluss | Elektrische Ausrüstungen |
| Planung | DL v. Architektur- u. Ingenieurbüros |
| Handel Module | Großhandelsleistungen |
| Handel Wechselrichter | Großhandelsleistungen |
| Handel Installationsmaterial | Großhandelsleistungen |

Tabelle 3.7.: Hersteller von Komponenten für PV-Anlagen

| Komponente Verteilung nach Quelle | Hauptthersteller | NUTS2 | Anteil |
|---|---|---|---|
| Silizium Marktanteil Kelm et al., 2014 | Wacker Chemie | Oberbayern | 1,00 |
| Wafer Produktion 2014 Photon, 2014 | PV Crystalox Solar Silicon GmbH | Thüringen | 0,23 |
| | Solarworld AG | Chemnitz | 0,77 |
| Solarzellen Produktion 2014 Photon, 2014 | Solar World AG (vormals Bosch) | Thüringen | 0,42 |
| | Solar World AG | Chemnitz | 0,37 |
| | Hanwha Q Cells GmbH | Chemnitz | 0,21 |
| Module Produktion 2014 Photon, 2014 | Aleo Solar AG (seit 2014 SCP Solar) | Brandenburg | 0,09 |
| | Alfasolar GmbH | Hannover | 0,01 |
| | Axun Solar GmbH & Co KG | Tübingen | 0,02 |
| | Solar World AG (vormals Bosch) | Thüringen | 0,11 |
| | Conergy (Übernahme aus China 2013) | Brandenburg | 0,11 |
| | Hanwha Q Cells GmbH | Chemnitz | 0,09 |
| | Heckert Solar AG | Chemnitz | 0,07 |
| | Jurawatt GmbH | Oberpfalz | 0,01 |
| | ML&S Manufacturing, Logistics and Services GmbH & Co KG | Mecklenburg-Vorpommern | 0,01 |
| | SI Module GmbH | Freiburg | 0,01 |
| | Solarnova Produktions- und Vertriebsgesellschaft mbH | Schleswig-Holstein | 0,01 |
| | Solarwattt GmbH | Dresden | 0,06 |
| | Solarworld AG | Chemnitz | 0,36 |
| | Solon Modules GmbH (Übernahme duch Micorsol, Indien) | Berlin | 0,02 |
| Wechselrichter Marktanteile Kelm et al., 2014 | SMA Solar Technology | Kassel | 0,63 |
| | KACO new energy | Stuttgart | 0,19 |
| | Kostal | Arnsberg | 0,19 |
| Kabel Beschäftigte GTAI, 2013 | bedea | Gießen | 0,04 |
| | Draka Cable Wuppertal | Düsseldorf | 0,07 |
| | HELUKABEL | Mittelfranken | 0,06 |
| | HEW-KABEL | Köln | 0,04 |
| | HI Kabelkonfektionierung | Darmstadt | 0,02 |
| | HUBER+SUHNER | Oberbayern | 0,02 |
| | KBE Elektrotechnik | Berlin | 0,03 |
| | Klasing Kabel | Oberbayern | 0,02 |

Tabelle 3.7.: Hersteller von Komponenten für PV Anlagen (Fortsetzung)

| Komponente Verteilung nach Quelle | Haupthersteller | NUTS2 | Anteil |
|---|---|---|---|
| | KWV Kabelwerke | Freiburg | 0,01 |
| | Lumberg Connect | Arnsberg, Weser-Ems | 0,13 |
| | Multi-Contact | Freiburg | 0,02 |
| | Nexans | Hannover | 0,05 |
| | PRYSMIAN | Köln, Mecklenburg-Vorpommern | 0,01 |
| | Sykonec | Oberfranken | 0,01 |
| | Tyco Electronics | Darmstadt | 0,26 |
| | U.I. Lapp | Stuttgart | 0,11 |
| | VOKA | Chemnitz | 0,07 |
| | XBK-Kabel | Freiburg | 0,03 |
| | Yamaichi Electronics | Brandenburg | 0,02 |
| Steckverbinder Beschäftigte GTAI, 2013 | Amphenol-Tuchel | Stuttgart | 0,07 |
| | Büschel | Tübingen | 0,01 |
| | Citel | Arnsberg | 0,03 |
| | HI Kabelkonfektionierung | Darmstadt | 0,03 |
| | Hirschmann | Stuttgart, Karlsruhe, Arnsberg | 0,08 |
| | Huber + Suhner | Oberbayern | 0,04 |
| | Huonker | Freiburg | 0,02 |
| | Lumberg Connect | Arnsberg, Weser-Ems | 0,18 |
| | Molex | Karlsruhe | 0,02 |
| | Multi-Contact | Freiburg | 0,03 |
| | Pöppelmann Kunststoff-Technik | Weser-Ems | 0,08 |
| | U.I.Lapp GmbH | Stuttgart | 0,18 |
| | Wieland Electric | Oberfranken | 0,22 |
| | Yamaichi Electronics | Brandenburg | 0,03 |
| Montage System Beschäftigte GTAI, 2013 | ALTEC Solartechnik | Thüringen | 0,05 |
| | EQ-SYS | Brandenburg | 0,01 |
| | Fath Solar | Mittelfranken | 0,03 |
| | Grammer Solar | Oberpfalz | 0,01 |
| | Metall Josten | Düsseldorf | 0,01 |
| | Mounting Systems (Conergy) | Brandenburg | 0,07 |
| | mp-tec | Brandenburg | 0,02 |
| | Niemetz Metall | Oberfranken | 0,01 |
| | PV-Eiwa | Niederbayern | 0,03 |
| | RegTec | Schwaben, Unterfranken, Thüringen | 0,01 |
| | Schletter | Oberbayern | 0,11 |
| | Solarpark Rodenäs | Schleswig-Holstein | 0,01 |
| | TS-Aluminium | Weser-Ems, Chemnitz | 0,02 |

Tabelle 3.7.: Hersteller von Komponenten für PV Anlagen (Fortsetzung)

| Komponente Verteilung nach Quelle | Hauptthersteller | NUTS2 | Anteil |
|---|---|---|---|
| | VM Edelstahltechnik | Arnsberg | 0,01 |
| | Wagener & Simon | Düsseldorf | 0,05 |
| | Wagner & Co. Solartechnik | Gießen | 0,11 |
| | Wilhelm Flender | Arnsberg | 0,02 |
| | Zambelli | Niederbayern | 0,18 |
| | Zentralsolar | Münster | 0,01 |
| | Zinco | Stuttgart | 0,02 |
| | alfasolar | Hannover | 0,01 |
| | E.u.r.o Tec | Arnsberg | 0,01 |
| | Energiebau Solarstromsysteme | Köln | 0,09 |
| | HABDANK PV-Montagesysteme | Stuttgart | 0,01 |
| | HELTRON | Freiburg | 0,01 |
| | K2 Systems | Stuttgart | 0,01 |
| | PanelClaw | Düsseldorf | 0,01 |
| | Renusol | Köln | 0,03 |
| | RWenergy | Oberpfalz | 0,01 |

**Onshore-Wind** Für Onshore-Windenergieanlagen wurde die Höhe der spezifischen Investition und die unterstellte Degression von 0,5% p.a. bis zum Jahr 2030 aus Pfluger et al. (2017b) entnommen. Die Verteilung auf die einzelnen Komponenten basiert auf Pfluger et al. (2017b) und Falkenberg, Weiß und Nehls (2014). Im Hinblick auf die Zuordnung zu regionalen Wirkungskategorien wurde angenommen, dass die Herstellung der Anlagen selbst sowie Dienstleistung rund um die Installation, die eine hohe Spezialisierung erfordern (Montage, Logistik und Verkabelung des Windparks) von den Herstellern selbst erbracht werden, wohingegen weitere Dienstleistungen rund um Planung und Installation dem Standort der Anlage zugewiesen wurden. Analog zu Photovoltaik wurde dieses Vorgehen durch Expertengespräche validiert. Die Marktanteile der Hauptthersteller basieren auf der installierten Leistung im Jahr 2014 (Falkenberg et al., 2014) und die regionale Zuordnung auf der anteiligen Verteilung der Mitarbeiter auf die einzelnen Standorte (eigene Recherche).

Tabelle 3.8.: Investitionsstruktur Onshore-Windenergieanlagen

| Komponente | $I^{spez}$ [$Euro_{2010}$/kW] | rtyp | Gütergruppe |
|---|---|---|---|
| Nabe und Hauptwelle | 66 | 2 | Maschinen |
| Gondel | 89 | 2 | Maschinen |
| Generator | 110 | 2 | Elektrische Ausrüstungen |
| Turm | 265 | 2 | Metallerzeugnisse |
| Blätter | 265 | 2 | Gummi- und Kunststoffwaren |
| Getriebe | 199 | 2 | Maschinen |
| Azimutsystem WEA | 22 | 2 | Elektrische Ausrüstungen |
| Hydraulik WEA | 22 | 2 | Maschinen |
| Kabel und Sensorik WEA | 34 | 2 | Elektron. u. optische Erzeugnisse |
| Montage | 78 | 2 | Maschinen |
| Logistik | 52 | 2 | Landverkehr |
| Erschließung | 63 | 1 | Hochbauarbeiten |
| Netzanbindung | 79 | 1 | Elektrische Ausrüstungen |
| Kompensationsmaßnahmen | 33 | 1 | Landwirtschaft |
| Planung und Genehmigung | 44 | 1 | Technische Dienstleistungen |
| Fundament | 58 | 1 | Hochbauarbeiten |
| Finanzierung | 24 | 1 | Finanzdienstleistungen |
| Verkabelung Windpark | 24 | 2 | Elektrische Ausrüstungen |
| Summe | 1525 | 20% 1 | |
| | | 80% 2 | |

Tabelle 3.9.: Hersteller Onshore-Windenergieanlagen

| Hersteller | Standort | NUTS2 | Anteil |
|---|---|---|---|
| Enercon | Aurich | Weser-Ems | 0,04 |
| | Emden | Weser-Ems | 0,03 |
| | Haren | Weser-Ems | 0,04 |
| | Magdeburg | Sachsen-Anhalt | 0,33 |
| | Südbrookmerland | Weser-Ems | 0,01 |
| Vestas | Lauchhammer | Brandenburg | 0,13 |
| | Lübeck | Schleswig-Holstein | 0,09 |
| | Magdeburg | Sachsen-Anhalt | 0,03 |
| Senvion | Trampe | Brandenburg | 0,02 |
| | Husum | Schleswig-Holstein | 0,03 |
| | Bremerhaven | Bremen | 0,03 |
| | Hamburg | Hamburg | 0,04 |
| | Osterrönfeld | Schleswig-Holstein | 0,04 |
| Nordex | Rostock | Mecklenburg-Vorpommern | 0,09 |
| GE | Salzbergen | Weser-Ems | 0,05 |

**Offshore-Wind** Die Höhe der spezifischen Investition und die unterstellte Degression bis zum Jahr 2030 von 0,5% p.a. für die Anlagen und 2% p.a. für die Nebenkosten basieren auf Pfluger et al. (2017b). Die Verteilung auf die einzelnen Komponenten lehnt sich an Smart et al. (2016) an. Für die regionale Zuordnung liegen keine Quellen vor, sie beruht daher auf durch Expertengespräche validierte eigene Annahmen. Analog zu Onshore-Windenergieanlagen werden die Herstellung der Anlage, Montage und Logistik den Regionen der Hauptthersteller zugeordnet, wohingegen Projektmanagement, Gründung und elektrische Infrastruktur dem Anlagenstandort (bzw. der Region des Versorgungshafens) zugewiesen werden. Die Marktanteile der Hauptthersteller basieren auf der Leistung der installierten Anlagen im Jahr 2016 (IWES, 2016).

Tabelle 3.10.: Investitionsstruktur Offshore-Windenergieanlagen

| Komponente | $I^{spez}$ [$Euro_{2010}$/kW] | rtyp | Gütergruppe (Anteil) |
|---|---|---|---|
| Nabe und Hauptwelle | 64 | 2 | Maschinen |
| Gondel | 86 | 2 | Maschinen |
| Generator | 107 | 2 | Elektrische Ausrüstungen |
| Turm | 256 | 2 | Metallerzeugnisse |
| Blätter | 256 | 2 | Gummi- und Kunststoffwaren |
| Getriebe | 192 | 2 | Maschinen |
| Azimutsystem WEA | 21 | 2 | Elektrische Ausrüstungen |
| Hydraulik WEA | 21 | 2 | Maschinen |
| Kabel und Sensorik WEA | 32 | 2 | Elektron. u. optische Erzeugnisse |
| Montage | 75 | 2 | Maschinen |
| Logistik | 49 | 2 | Landverkehr |
| Gründungen | 864 | 1 | Hochbauarbeiten |
| Elektrische Infrastruktur | 674 | 1 | Elektrische Ausrüstungen (0.7) |
| | | | Hochbauarbeiten (0.3) |
| Versicherung | 48 | 3 | Versicherung |
| Projektmanagement | 247 | 1 | Technische DL |
| Rücklagen* | 321 | | *kein Impuls |
| Summe | 3314 | 54% 1 | |
| | | 35% 2 | |
| | | 11% 3 | |

Tabelle 3.11.: Hersteller Offshore-Windenergieanlagen

| Hersteller | Standort | NUTS2 | Anteil |
|---|---|---|---|
| Siemens | Hamburg | Hamburg | 0,67 |
| Areva Wind | Bremerhaven | Bremen | 0,15 |
| BARD Engineering | Emden | Weser-Ems | 0,10 |
| REpower Systems SE | Hamburg | Hamburg | 0,08 |

**Wasserkraft** Pfluger et al. (2017c) postulieren, dass die Potenziale für Wasserkraft bereits ausgeschöpft sind. Entsprechend wird auch nicht in neue Wasserkraftanlagen investiert.

**Biomasse** Pfluger et al. (2017c) unterstellen, dass kein weiterer Ausbau der Stromerzeugung aus Biomasse erfolgt und entsprechend kein Investitionsimpuls entsteht. Dies wird

unter anderem damit begründet, dass die energetische Verwendung der Biomasse in anderen Bereichen mit weniger Möglichkeiten zur Substitution von fossilen Kraftstoffen z.B. Flug- und Schiffsverkehr, Vorrang hat.

**Fossile Energiequellen** Die Höhe der spezifischen Investitionen basiert auf dem von Pfluger et al. (2017b) angegebenen Werten für Erdgas (Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerk), Steinkohle und Braunkohle. Für Erdgas wurde eine Degression der spezifischen Investition von 0,5% p.a. bis 2020 und 0,2% p.a. bis 2030 unterstellt, wohingegen für die spezifischen Investitionen von Stein- und Braunkohlekraftwerken keine Degression angenommen wurde (analog zu Pfluger et al., 2017b). Die Verteilung auf die einzelnen Komponenten basiert mangels anderer Daten auf der in Hirschl et al. (2010) gegebenen Struktur für Stromerzeugung aus fester Biomasse und wurde entsprechend skaliert. Dies entspricht auch dem Vorgehen von Duscha et al. (2016). Für die regionale Zuordnung liegen keine Quellen vor. Vereinfachend wurden angenommen, dass die Dienstleistungen rund um Planung und Installation der Anlage am Standort der Energieerzeugungsanlage wirksam werden. Die Komponenten, die die Herstellung der Anlage betreffen, werden nicht regional zugewiesen, sodass die Verteilung zwischen importierten und heimischen Effekten durch die Anteile des liefernden Wirtschaftsbereichs bestimmt werden. Die heimischen Effekte werden mittels der regionalen Verteilung der Wertschöpfung des liefernden Wirtschaftsbereichs heruntergebrochen.

Tabelle 3.12.: Investitionsstruktur Stromerzeugung aus fossilen Energiequellen

| Komponente | $I^{spez}$ [$Euro_{2010}$/kW] | | | rtyp | Gütergruppe |
|---|---|---|---|---|---|
| | Erdgas | Steinkohle | Braunkohle | | |
| Bauteile | 142 | 254 | 284 | 3 | Hochbau |
| Nebenanlagen | 26 | 46 | 51 | 3 | Hochbau |
| Verbrennung | 288 | 515 | 576 | 3 | Maschinenbau |
| Steuerung | 83 | 148 | 166 | 3 | Elektron. u. opt. Erzeugnisse |
| Abgasreinigung | 75 | 133 | 149 | 3 | Maschinenbau |
| Energieerzeugung | 205 | 366 | 409 | 3 | Elektrische Ausrüstungen |
| Montage | 67 | 121 | 135 | 1 | Hochbau |
| Planung | 45 | 80 | 90 | 1 | Technische DL |
| Gebühren | 11 | 20 | 22 | 1 | Öff. Verwaltung |
| Grundstückskauf | 9 | 16 | 17 | 1 | Grundstücks- u. Wohnungswesen |
| Summe | 950 | 1700 | 1900 | 1 | 14% |
| | | | | 3 | 86% |

**Kernkraft** Da Pfluger et al. (2017a) sowohl im Referenz- als auch im Basisszenario den Ausstieg aus der Kernenergie unterstellen, findet kein weiterer Ausbau und somit entfällt auch die Transformation zu einem Investitionsimpuls. Der Rückbau der Anlagen und die mögliche Einrichtung eines Endlagers für radioaktive Abfälle benötigen Investitionen. Da diese Investitionen jedoch in beiden Szenarien getätigt werden müssen, und somit kein Nettoimpuls entsteht, werden sie im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

#### 3.2.1.3. Ökonomischer Impuls

Basierend auf der oben beschriebenen Methodik und Datenbasis werden als Impuls für ISI-Macro die Investitionen in Stromerzeugungstechnologien je Wirtschaftsbereich abgeleitet. Ein Teil dieser Investitionen ist direkt einer inländischen NUTS2-Region zugeteilt, in der das Gut hergestellt bzw. die Dienstleistung erbracht wird. Ein weiterer Teil wird importiert. Der verbleibende Teil ohne regionale Zuordnung wird modellendogen auf inländische Herstellung bzw. Importe aufgeteilt. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 3.13 für Referenzszenario und Energiewendeszenario für die Jahre 2020 und 2030 zusammengefasst. Zusätzlich sind in Tabelle 3.14 die direkt regional zugewiesenen Investitionen je NUTS2-Region aggregiert über alle Wirtschaftsbereiche dargestellt. Die in Tabelle 3.14 enthaltenen Informationen werden zusätzlich im Anhang nach Technologien aufgeschlüsselt (Tabellen A.27 bis A.33). Kernenergie, Wasserkraft und Biomasse sind nicht dargestellt, da hier wie zuvor beschrieben kein Ausbau stattfindet.

Tabelle 3.13.: Investitionen in Stromerzeugungstechnologien nach Wirtschaftsbereichen

| WB* | Ref 2020 | | | | Ref 2030 | | | | EW 2020 | | | | EW 2030 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| rtyp | 1,2 | 3 | 4 | Σ | 1,2 | 3 | 4 | Σ | 1,2 | 3 | 4 | Σ | 1,2 | 3 | 4 | Σ |
| 1 | 34 | 0 | 0 | 34 | 25 | 0 | 0 | 25 | 46 | 0 | 0 | 46 | 41 | 0 | 0 | 41 |
| 13 | 50 | 0 | 37 | 88 | 1 | 0 | 0 | 1 | 94 | 0 | 72 | 167 | 4 | 0 | 3 | 6 |
| 15 | 471 | 0 | 0 | 471 | 201 | 0 | 0 | 201 | 571 | 0 | 0 | 571 | 526 | 0 | 0 | 526 |
| 16 | 3 | 0 | 13 | 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 24 | 30 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 21 | 577 | 94 | 19 | 690 | 203 | 1 | 0 | 205 | 765 | 180 | 34 | 979 | 540 | 7 | 2 | 549 |
| 22 | 116 | 164 | 165 | 446 | 26 | 141 | 2 | 169 | 175 | 124 | 319 | 617 | 71 | 61 | 12 | 144 |
| 23 | 924 | 406 | 30 | 1360 | 184 | 349 | 1 | 533 | 1246 | 306 | 58 | 1610 | 705 | 151 | 4 | 860 |
| 24 | 805 | 720 | 0 | 1526 | 344 | 618 | 0 | 962 | 976 | 543 | 0 | 1518 | 900 | 268 | 0 | 1167 |
| 33 | 1261 | 334 | 0 | 1594 | 212 | 286 | 0 | 499 | 1481 | 251 | 0 | 1732 | 873 | 124 | 0 | 997 |
| 37 | 131 | 0 | 0 | 131 | 2 | 0 | 0 | 2 | 251 | 0 | 0 | 251 | 12 | 0 | 0 | 12 |
| 39 | 92 | 0 | 0 | 92 | 39 | 0 | 0 | 39 | 111 | 0 | 0 | 111 | 102 | 0 | 0 | 102 |
| 49 | 24 | 0 | 0 | 24 | 18 | 0 | 0 | 18 | 33 | 0 | 0 | 33 | 30 | 0 | 0 | 30 |
| 50 | 0 | 34 | 0 | 34 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 34 | 0 | 34 | 0 | 29 | 0 | 29 |
| 52 | 17 | 0 | 0 | 17 | 15 | 0 | 0 | 15 | 13 | 0 | 0 | 13 | 6 | 0 | 0 | 6 |
| 54 | 516 | 0 | 0 | 516 | 114 | 0 | 0 | 114 | 670 | 0 | 0 | 670 | 263 | 0 | 0 | 263 |
| 62 | 22 | 0 | 0 | 22 | 19 | 0 | 0 | 19 | 17 | 0 | 0 | 17 | 8 | 0 | 0 | 8 |
| Σ | 5043 | 1753 | 263 | 7060 | 1403 | 1396 | 4 | 2803 | 6454 | 1438 | 508 | 8399 | 4080 | 640 | 22 | 4742 |

*nicht aufgeführte Wirtschaftsbereiche erhalten keinen Impuls

Tabelle 3.14.: Investitionen in Stromerzeugungsanlagen nach Regionen in Mio Euro (direkt zugewiesener Impuls)

| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 75 | 11 | 82 | 11 |
| Karlsruhe | 55 | 19 | 37 | 6 |
| Freiburg | 64 | 2 | 45 | 10 |
| Tübingen | 87 | 1 | 70 | 9 |
| Oberbayern | 283 | 18 | 311 | 43 |
| Niederbayern | 36 | 2 | 62 | 6 |
| Oberpfalz | 17 | 1 | 17 | 2 |
| Oberfranken | 4 | 0 | 9 | 5 |
| Mittelfranken | 3 | 5 | 11 | 6 |
| Unterfranken | 4 | 2 | 3 | 3 |
| Schwaben | 80 | 1 | 73 | 7 |
| Berlin | 6 | 8 | 38 | 5 |
| Brandenburg | 203 | 206 | 360 | 229 |
| Bremen | 414 | 29 | 429 | 279 |
| Hamburg | 975 | 43 | 995 | 839 |
| Darmstadt | 67 | 10 | 19 | 7 |
| Gießen | 12 | 1 | 30 | 3 |
| Kassel | 83 | 5 | 161 | 14 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 256 | 133 | 325 | 792 |
| Braunschweig | 10 | 15 | 27 | 5 |
| Hannover | 5 | 29 | 43 | 33 |
| Lüneburg | 267 | 36 | 285 | 157 |
| Weser-Ems | 613 | 208 | 755 | 527 |
| Düsseldorf | 70 | 8 | 153 | 10 |
| Köln | 68 | 1 | 133 | 12 |
| Münster | 13 | 7 | 84 | 3 |
| Detmold | 4 | 10 | 26 | 9 |
| Arnsberg | 48 | 16 | 164 | 16 |
| Koblenz | 3 | 1 | 19 | 3 |
| Trier | 7 | 0 | 1 | 3 |
| Rheinhessen-Pfalz | 37 | 8 | 15 | 10 |
| Saarland | 32 | 11 | 17 | 1 |
| Dresden | 16 | 4 | 30 | 22 |
| Chemnitz | 49 | 1 | 128 | 12 |
| Leipzig | 10 | 1 | 18 | 1 |
| Sachsen-Anhalt | 454 | 349 | 694 | 552 |
| Schleswig-Holstein | 587 | 195 | 688 | 410 |
| Thüringen | 26 | 4 | 97 | 19 |
| Summe | 5043 | 1403 | 6454 | 4080 |

### 3.2.2. Stromerzeugung: bezogene Vorleistungen, Wertschöpfung und Arbeitskräftebedarf

Der Erzeugung von Strom ist mit Betriebs- und Instandhaltungskosten verbunden. Sie stellen einen Teil der Vorleistungen des Produktionsbereichs Elektrizitätsversorgung dar. Das methodische Vorgehen zur Berechnung ist im nächsten Abschnitt dargelegt, gefolgt von der Beschreibung der zugrunde gelegte Datenbasis.

#### 3.2.2.1. Transformation: Methodisches Vorgehen Vorleistungen

Basis der Berechnungen sind die folgenden Inputs, die aus dem Modell EnerTile für die im makroökonomischen Modell unterschiedenen Stromerzeugungstechnologien (vgl. Tabelle 3.3) zur Verfügung gestellt werden: zugebaute Kapazität (inklusive Ersatz bestehender Kapazitäten) und rückgebaute Kapazität in kW aggregiert für die Zeitspanne 2012 bis 2020 und 2020 bis 2030, ebenso wie der Bestand in 2012. Die Inputs liegen für Wind und Photovoltaik bereits in der gewünschten regionalen Auflösung (NUTS2-Ebene) vor. Für weitere erneuerbare und konventionelle Energiequellen sind sie nur für die 6 Netzknotenebenen verfügbar und werden in einem ersten Transformationsschritt jeweils auf die zugehörigen NUTS2-Regionen verteilt.[5] Für eine jährliche Auflösung der Impulse werden die aggregierte Zu- und Rückbaumengen für die Zeitabschnitte 2012 bis 2020 und 2020 bis 2030 jeweils gleichmäßig auf einzelne Jahre in diesem Zeitraum verteilt, da keine anderen Informationen über die zeitliche Verteilung vorliegen. Die installierte Kapazität je Technologie und Region ist im Modell eine Bestandsvariable. Sie wird ausschließlich durch die oben beschriebenen exogenen Inputs bestimmt: der Bestand von 2012 bildet den Anfangswert und die als Flussvariablen dargestellten zu- und rückgebauten Kapazitäten bestimmen die zeitliche Entwicklung. Die installierte Kapazität je Technologie und Region kann den Tabellen im Anhang A.6 entnommen werden, nach Technologien und Bundesländern differenzierte Abbildungen (2.10 und 2.11) befinden sich im vorangegangen Kapitel. Bei der Auslastung der Erzeugungskapazitäten wird nicht regional unterschieden, sondern mit Durchschnittswerten für die Volllaststunden gearbeitet, die ebenfalls aus EnerTile-Modellergebnissen berechnet werden.

Analog zum Vorgehen bei den Investitionen wird jeder Technologie ein spezifischer (auf die Leistung bezogener) jährlicher Wert an bezogenen Vorleistungen $VL_T$ zugewiesen. Die spezifischen Vorleistungen werden auf einzelne Komponenten $TK$ verteilt (Faktor $u$ in Gleichung 3.9), welche anteilig Gütergruppen (Faktor $v$ in Gleichung 3.9) sowie regionalen Wirkungskategorien (Faktor $w$ in Gleichung 3.9) zugewiesen werden.

[5] Hierzu sei auf die Ausführungen in Abschnitt 2.3.1 verwiesen.

$$VL^{\text{spez}}_{T,i,\text{rtyp},t} = VL_{T,2012} \sum_{\text{TK}} u^{VL}_{\text{TK}} \beta_{TK,t} v^{VL}_{\text{TK,i}} w^{VL}_{\text{TK, rtyp}} \tag{3.9}$$

Höhe und Struktur der Vorleistungen für die Stromerzeugung verändern sich über die Zeit. Die Auslastung der Anlage sowie sich verändernde Brennstoff- und $CO_2$-Preise sind relevant für die variablen Betriebskosten. Teile der Betriebskosten sind von der Höhe der getätigten Investitionen abhängig. Durch Kostendegression sinken diese im Zeitverlauf. Daher ist es nötig die Altersstruktur des Kraftwerksbestandes zu berücksichtigen. Praktisch ist dies im Modell so umgesetzt, dass sich, wie oben beschrieben, der regionale Kraftwerksbestand durch Zu- und Rückbau ändert und davon abhängig auch die Vorleistungen. Zur Vereinfachung wurde dies im obigen Gleichungssystem nicht dargestellt und nur durch den Faktor $\beta$ reflektiert. Diese Darstellung ist gegenüber dem Modell dahin gehend vereinfacht, dass dort auch die regionalen Unterschiede in der Altersstruktur berücksichtigt werden und sich somit die spezifischen Vorleistungen regional differenziert über die Zeit entwickeln.

**Überregional wirksamer Impuls** Im Gegensatz zu den Investitionen wird bei Betriebs- und Instandhaltungskosten auf die regionalen Wirkungskategorie „Standort der Hersteller“ (rtyp=2) und „ohne regionale Zuordnung“ (rtyp=3) verzichtet. Die spezifischen Investitionen, die den regionalen Wirkungskategorien „Standort der Energieerzeugungsanlage“ rtyp=1 und „Inland ohne regionale Zuordnung“ rtyp=5 zugewiesen werden, summieren sich zu den inländischen spezifischen Vorleistungen (3.10). Die importierten spezifischen Investitionen ergeben sich durch die entsprechende regionale Wirkungskategorie (3.11).

$$VL^{\text{spez}}_{T,i,inl,t} = VL^{\text{spez}}_{T,i,\text{rtyp=1},t} + VL^{\text{spez}}_{T,i,\text{rtyp=5},t} \tag{3.10}$$

$$VL^{\text{spez}}_{T,i,imp,t} = VL^{\text{spez}}_{T,i,\text{rtyp=4},t} \tag{3.11}$$

Da im Produktionsbereich Elektrizitätsversorgung diverse Stromerzeugungstechnologien integriert sind, die sich jeweils in ihrer Vorleistungsstruktur unterscheiden, ist die Vorleistung dieses Bereichs vom Strommix, das heißt von den jeweiligen Anteilen der Technologien an der Stromerzeugung, abhängig. Da sich der Strommix in den Szenarien im Zeitverlauf ändert und sich zwischen den Szenarien unterscheidet, bleibt die Vorleistungsstruktur nicht auf dem Stand von 2012, wie dies für die anderen Produktionsbereiche der Fall und für

die Fragestellung dieser Arbeit auch ausreichend ist. Stattdessen ändert sie sich basierend auf den Szenarien.

Zur Bestimmung der Vorleistungen je Gütergruppe für die Stromerzeugung wird je Technologie das Produkt der spezifischen Vorleistungen und der installierten Leistung $Kap$ gebildet und dann für alle Technologien aggregiert. Es wird zwischen inländischen und importierten Vorleistungen unterschieden wird:

$$VL_{i,inl,t} = \sum_{T}(VL^{\text{spez}}_{T,i,inl,t} \cdot Kap^{bu}_{T,t}) \tag{3.12}$$

$$VL_{i,imp,t} = \sum_{T}(VL^{\text{spez}}_{T,i,imp,t} \cdot Kap^{bu}_{T,t}) \tag{3.13}$$

Sie sind jedoch nicht mit den Vorleistungen $z_i$ des Produktionsbereichs Elektrizitätsversorgung (j=29) identisch, denn der Produktionsbereich Elektrizitätsversorgung umfasst nicht nur die Erzeugung von elektrischem Strom, sondern auch seine Übertragung, Verteilung und den Handel damit. Diese Dienstleistungen benötigen ihrerseits Vorleistungen. Daher wird die Vorleistungsstruktur des Produktionsbereichs Elektrizitätsversorgung nicht komplett durch die oben beschriebene Vorleistungsstruktur der Stromerzeugung ersetzt, sondern nur durch folgende Bottom-up-Impulse an die Abweichungen im Vergleich zum vorherigen Zeitpunkt $t - \Delta t$ angepasst:

$$z^{\text{bu}}_{ij,inl,t} = VL_{i,inl,t} - VL_{i,inl,t-\Delta t} - a_{ij,t}\frac{dx}{dt} \qquad \text{für } j = 29 \tag{3.14}$$

Der letzte Teil des obigen Ausdrucks bezieht sich auf die Vorleistungen, die sich aus der veränderten Produktionsmenge $x$ ergeben und die mittels der Inputkoeffizienten $a_{ij}$ berechnet werden können. Sie werden abgezogen, um Doppelzählung zu vermeiden und lediglich die strukturellen Änderungen bei der Integration der Bottom-up-Impulse abzubilden (vgl. Kapitel 4).

Bei den importierten Vorleistungen bezieht sich der Bottom-up-Impuls nicht auf die Veränderung zum vorherigen Zeitschritt, sondern auf die Veränderung im Vergleich zu 2012.

$$z^{\text{bu}}_{ij,imp,t} = VL_{i,imp,t} - VL_{i,imp,2012} \qquad \text{für } j = 29 \tag{3.15}$$

**Regional zugeordneter Impuls** Die Vorleistungsgüter, die durch die Region des Standorts der Energieerzeugungsanlagen geliefert werden, lassen sich basierend auf der regionalen Verteilung der installierten Kapazität einer Stromerzeugungstechnologie den NUTS2-Regionen zuordnen (3.16), durch Aggregation der Technologien ergeben sich dann die direkt zugewiesenen Vorleistungen je Gütergruppe und Region (3.17).

$$VL^{ges}_{T,i,r,t} = VL_{T,i,\mathrm{rtyp},t}\mathrm{Kap}^{bu}_{T,r,t} \qquad \text{mit rtyp} = 1 \tag{3.16}$$

$$VL^{ges}_{i,r,t} = \sum_{T} VL^{ges}_{T,i,r,t} \tag{3.17}$$

#### 3.2.2.2. Transformation: Methodisches Vorgehen Wertschöpfung und Arbeitskräftebedarf

Die Wertschöpfung $v$ durch die Stromerzeugung beinhaltet Arbeitnehmerentgelte $w$, Abschreibungen $k$ und Gewinne $p$ der Betreibergesellschaft. Ebenso wie für die Vorleistungen werden auch für die einzelnen Wertschöpfungselemente aus der Literatur[6] abgeleitete spezifische Werte je installierter Kapazität einer Technologie $T$ genutzt.

$$v^{\mathrm{spez}}_{T,t} = w^{\mathrm{spez}}_{T,t} + k^{\mathrm{spez}}_{T,t} + p^{\mathrm{spez}}_{T,t} \tag{3.18}$$

Basierend auf einem Arbeitnehmerentgelt je Erwerbstätigen von 100.000 Euro (Konstantin, 2013) kann aus Arbeitnehmerentgelten der spezifischen Arbeitskräftebedarf ermittelt werden und umgekehrt. Abschreibungen und Gewinne leiten sich aus der Höhe der Investitionen $b$, der Verzinsung $i$ und der Lebensdauer $\tau$ ab: abgeschrieben wird linear über die Lebensdauer (3.19), Nettobetriebsüberschüsse ergeben sich mit der Annuitätenmethode nach Abzug der Abschreibungen (3.20).

$$k^{\mathrm{spez}}_{T,t} = \frac{b^{\mathrm{spez}}_{T}\beta_{T,t}}{\tau_T} \tag{3.19}$$

$$p^{\mathrm{spez}}_{T,t} = b^{\mathrm{spez}}_{T}\beta_{T,t}\frac{(1+i)^{\tau_T} i}{(1+i)^{\tau_T}-1} - k^{\mathrm{spez}}_{T,t} \tag{3.20}$$

Die Investitionen hängen vom Jahr der Installation ab, weshalb Gewinne und Abschreibungen von der Altersstruktur des Kraftwerksbestandes abhängen. Dies wird im Modell berücksichtigt, das methodische Vorgehen wurde bereits im Zusammenhang mit den Vor-

[6] Für spezifische Quellenangabe je Technologie siehe Tabelle 3.15 auf Seite 74

leistungen beschrieben. Im obigen Gleichungssystem ist dieser Effekt lediglich durch den Faktor $\beta$ reflektiert. Diese vereinfachende Darstellung spiegelt nicht wieder, dass im Modell auch die regionalen Unterschiede in der Altersstruktur berücksichtigt werden und sich somit die spezifischen Werte der Wertschöpfungselemente in den Regionen unterschiedlich über die Zeit entwickelt.

Basierend auf der Wertschöpfung je installierter Kapazität einer Stromerzeugungstechnologie wird durch Multiplikation mit der installierten Kapazität und Aggregation aller Technologien die Wertschöpfung (unterschieden nach den Elementen Abschreibung, Arbeitnehmerentgelt und Nettobetriebsüberschüssen) aus der Stromerzeugung ermittelt. Hierbei wird angenommen, dass diese am Standort der Stromerzeugungsanlage entsteht. Eine Ausnahme bildet die Wertschöpfung aus dem Betrieb von Offshore-Windenergieanlagen, für welche die regionale Struktur der Betreiber $\gamma$ basierend auf Daten der Bundesnetzagentur (2015) hinterlegt wird.[7]

$$v_{r,t}^{\text{Stromerzeugung}} = \sum_{T \text{ außer Offshore-Wind}} \text{Kap}_{T,r,t} v_{T,t}^{spez} + \gamma_r \sum_{r} \text{Kap}_{T=\text{Offshore-Wind},r,t} v_{T,t}^{spez} \tag{3.21}$$

Die so ermittelte Wertschöpfung aus der Stromerzeugung ist nur ein Teil der Wertschöpfung des Produktionsbereichs Elektrizitätsversorgung, da dieser neben der Stromerzeugung auch Verteilung und Vertrieb beinhaltet. Die auf diese Bereiche entfallende Wertschöpfung wird den Regionen mittels einer Top-down-Verteilung (vgl. Kapitel 5) zugewiesen.

Der Arbeitskräftebedarf $l$ wird im ökonomischen Modell endogen als Quotient aus Wertschöpfung und Arbeitsproduktivität ermittelt, wobei letztere regional variiert (vgl. Abschnitt 4.6 in Kapitel 4 bzw. Abschnitt 5.5 in Kapitel 5). Mit diesem Vorgehen wird auch der Arbeitskräftebedarf für die Verteilung und den Vertrieb von Strom berechnet. Der Arbeitskräftebedarf für die Stromerzeugung basiert hingegen auf spezifischen Werten je installierter Kapazität einer Technologie. Seine regionale Verteilung hängt somit von der Verteilung der Anlagenstandorte ab:

$$l_{r,t}^{\text{Stromerzeugung}} = \sum_{T} \text{Kap}_{T,r,t} l_{T}^{spez} \tag{3.22}$$

[7] Eine geringe Unschärfe entsteht dadurch dass die Wertschöpfung auch die Löhne des Personals für den Betrieb der Anlage enthält. Diese entfallen auch bei Offshore-Wind zumindest zum Teil auf den Standort der Energieanlage. Allerdings liegt der Anteil der Löhne an der Wertschöpfung aus dem Betrieb von Offshore-Windenergieanlagen unter zehn Prozent (vgl. Tabelle 3.15).

#### 3.2.2.3. Transformation: Datenbasis

In Tabelle 3.15 sind die fixen Betriebskosten (inkl. Lohnkosten), die Lohnkosten, der Arbeitskräftebedarf in Vollzeitäquivalenten (VZÄ), Abschreibungen, Gewinne und die Bruttowertschöpfung jeweils bezogen auf die installierte Leistung der unterschiedlichen Stromerzeugungstechnologien dargestellt. Die fixen Betriebskosten sind zusätzlich noch als Anteil an den Investitionen dargestellt. Im unteren Teil der Tabelle sind die jeweils herangezogenen Quellen angegeben. Die Werte beziehen sich auf das Jahr 2013 und ändern sich über die Zeit in Abhängigkeit von der Höhe der spezifischen Investitionen, wie in den vorherigen Abschnitt beschrieben. Die zugrunde gelegten Degressionsfaktoren für die Investitionen sind in Abschnitt 3.2.1 angegeben.

Die variablen Betriebskosten, Brennstoffkosten und $CO_2$-Kosten sind in Tabelle 3.16 bezogen auf die installierte Leistung der unterschiedlichen Stromerzeugungstechnologien dargestellt. Da sich die variablen Betriebskosten auf die erzeugte Strommenge beziehen, ist in der Tabelle zudem die Auslastung in Volllaststunden angegeben. Die Werte beziehen sich auf das Jahr 2013 und ändern sich im Zeitverlauf, der jeweilige Trend bei Volllaststunden, Brennstoffpreisen und $CO_2$-Preis ist in der Tabelle mitangegeben und (für die Preise) in Abbildung 2.6 dargestellt. Dem unteren Teil der Tabelle können die jeweils herangezogenen Quellen entnommen werden.

Die fixen und variablen Betriebskosten, Brennstoffkosten und Fremdkapitalkosten wurden wie zuvor beschrieben für jede Stromerzeugungstechnologie einzelnen Komponenten zugewiesen. Hierfür wurden die in Tabellen 3.15 und 3.16 genannten Quellen ausgewertet und zudem eine im Projekt EmployRES (Duscha et al., 2016) genutzte Datenbasis ergänzend hinzugezogen. Letztere liefert auch Hinweise bezüglich der Gütergruppen, denen die einzelnen Komponenten zuzuordnen sind, wobei auch die Verteilung auf mehrere Gütergruppen je Komponente möglich ist. Zur regionalen Zuordnung liegen keine Quellen vor, sie basiert auf eigenen Schätzungen: Es wurde angenommen, dass die Energieträger Steinkohle, Erdgas und Kernbrennstoffe importiert werden, wohingegen Biomasse und Braunkohle aus der Region des Anlagenstandorts stammen. Die Hälfte der Ersatzteile von PV-Anlagen stammt aus dem Ausland, die andere Hälfte aus inländischer Erzeugung. Die Pacht wurde der Region des Anlagenstandorts zugeordnet, ebenso Verwaltungstätigkeiten. Finanzdienstleistungen werden inländisch erbracht und wurden zur Hälfte der Region des Anlagenstandorts selbst zugeordnet. Auch Versicherungsdienstleistungen werden inländisch erbracht, jedoch ohne regionalen Bezug zum Anlagenstandort. Die Instandhaltung der Firmen wurde je nach Technologie teilweise der Region des Anlagenstandorts und teilweise überregional dem Inland zugeordnet.

Die Verteilung der (Kosten)Komponenten je Technologie auf Gütergruppen und die jeweilige Zuordnung zu regionalen Wirkungskategorien ist für Photovoltaik-Aufdachanlagen in Tabelle 3.17, für Photovoltaik-Freiflächenanlagen in Tabelle 3.18, für Onshore-Wind in Tabelle 3.19, für Offshore-Wind in Tabelle 3.20, für Wasserkraft in Tabelle 3.21, für Biomasse in Tabelle 3.22, für Braunkohle in Tabelle 3.23, für Steinkohle in Tabelle 3.24, für Erdgas in Tabelle 3.25 und für Kernenergie in Tabelle 3.26 dargestellt. Sofern die einzelnen Komponenten mehreren Gütergruppen oder mehreren regionalen Wirkungskategorien zugeordnet wurden, ist in Klammern der entsprechende Anteil angegeben. In den Tabellen sind die Gütergruppen nur mit ihrer laufenden Nummer angegeben, die ausführliche Bezeichnung kann Tabelle A.2 im Anhang entnommen werden.

Tabelle 3.15.: Fixe Betriebskosten, Arbeitskräftebedarf und Wertschöpfung nach Stromerzeugungstechnologien

| | Lebens-dauer Jahre | Investitionen Euro / kW | Betriebskosten fix % | Betriebskosten fix Euro / kW | Lohnkosten Euro / kW | Arbeitskräfte-bedarf VZÄ / GW | Fremd-kapitalkosten Euro / kW | Abschrei-bungen Euro / kW | Gewinne Euro / kW | Bruttowert-schöpfung Euro / kW |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PV-Aufdachanlage | 20 | 1250 | 1,5 | 18,8 | 3,0 | 30 | 20,6 | 62,5 | 34,6 | 100,2 |
| PV-Freiflächenanlage | 20 | 920 | 1,5 | 13,8 | 2,2 | 22 | 15,2 | 46,0 | 25,5 | 73,7 |
| Onshore-Wind | 20 | 1525 | 4,0 | 60,0 | 4,0 | 40 | 25,2 | 76,3 | 42,3 | 122,5 |
| Offshore-Wind | 20 | 3314 | 4,0 | 133 | 16,4 | 164 | 54,7 | 165,7 | 91,8 | 273,9 |
| Wasser | 50 | 4000 | 4,0 | 120 | 19,4 | 194 | 74,3 | 80,0 | 132,3 | 231,8 |
| Biomasse | 20 | 3950 | | 302 | 104 | 1040 | 65,2 | 197,4 | 109,4 | 410,8 |
| Steinkohle | 40 | 1700 | 2,5 | 42,5 | 10,0 | 100 | 30,4 | 42,5 | 54,1 | 106,6 |
| Braunkohle | 40 | 1900 | 3,0 | 57,0 | 7,3 | 73 | 33,9 | 47,5 | 60,4 | 115,2 |
| Erdgas | 30 | 950 | | 11,3 | 7,5 | 75 | 16,3 | 31,7 | 28,5 | 67,7 |
| Kernenergie | 40 | 3000 | | 122 | 12,5 | 125 | 53,6 | 75 | 95,4 | 31,8 |
| | | | | | | | | | | |
| Quellen | | | | | | | | | | |
| PV-Aufdachanlage | [1] | [1] | [1] | [1] | * | * | * | * | * | * |
| PV-Freiflächenanlage | [1] | [1] | [1] | [1] | * | * | * | * | * | * |
| Onshore-Wind | [1] | [1],[4] | [1] | [1] | [6] | [6] | * | * | * | * |
| Offshore-Wind | [1] | [1] | [1] | [1] | [5]* | [5]* | * | * | * | * |
| Wasser | [2] | [2]* | [2] | [2]* | * | * | * | * | * | * |
| Biomasse | [3] | [3]* | | [3]* | [3]* | [3] | * | * | * | * |
| Steinkohle | [1] | [1] | [1]* | [1] | [6] | [6] | * | * | * | * |
| Braunkohle | [1] | [1] | [1]* | [1] | [6] | [6] | * | * | * | * |
| Erdgas | [1] | [1] | | [1] | [6] | [6] | * | * | * | * |
| Erdgas Turbine | [1] | [1] | | [1] | [6] | [6] | * | * | * | * |
| Kernenergie | | | | [6] | [6] | [6] | * | * | * | * |

* eigene Berechnungen; [1] Pfluger et al. (2017b); [2] Keuneke et al. (2014); [3] Scheftelowitz et al. (2014); [4] Falkenberg et al. (2014); [5] Smart et al. (2016); [6] Konstantin (2013)

Tabelle 3.16.: Auslastung, variable Betriebskosten, Brennstoffkosten und $CO_2$-Kosten nach Stromerzeugungstechnologien

| | Volllaststunden | Trend | Betriebskosten variabel Euro / kW | Brennstoffkosten Euro / kW | Brennstoffpreise | $CO_2$-Kosten Euro / kW | $CO_2$-Preis |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PV-Aufdachanlage | 860 | ↗ | | | | | |
| PV-Freiflächenanlage | 860 | ↗ | | | | | |
| Onshore-Wind | 1500 | ↗ | | | | | |
| Offshore-Wind | 830 | ↑ | | | | | |
| Wasser | 4000 | → | | | | | |
| Biomasse | 6300 | ↘ | | 276,3 | ↗ | | |
| Steinkohle | 4200 | ↗ | 6,3 | 118,4 | ↗ | 15,6 | ↗ |
| Braunkohle | 6100 | ↗ | 9,2 | 54,3 | → | 27,9 | ↗ |
| Erdgas | 2500 | ↗ | 9,0 | 160,3 | ↗ | 5,4 | ↗ |
| Kernenergie | 7250 | ↗ | 10,8 | 19,2 | → | | |
| Quellen | | | | | | | |
| PV-Aufdachanlage | [1] | [1] | | | | | |
| PV-Freiflächenanlage | [1] | [1] | | | | | |
| Onshore-Wind | [1] | [1] | | | | | |
| Offshore-Wind | [1] | [1] | | | | | |
| Wasser | [1] | [1] | | | | | |
| Biomasse | [1] | [1] | | [1],[3]* | [1] | | |
| Steinkohle | [1] | [1] | [1] | [1]* | [1] | [6]* | [1] |
| Braunkohle | [1] | [1] | [1] | [1]* | [1] | [6]* | [1] |
| Erdgas | [1] | [1] | [1] | [1]* | [1] | [6]* | [1] |
| Erdgas Turbine | [1] | [1] | [1] | [1],[4]* | [1] | [1],[4]* | |
| Kernenergie | [1] | [1] | [6] | [6] | [1] | | |

* eigene Berechnungen; [1] Pfluger et al. (2017b); [2] Keuneke et al. (2014); [3] Scheftelowitz et al. (2014); [4] Falkenberg et al. (2014); [5] Smart et al. (2016); [6] Konstantin (2013)

Tabelle 3.17.: Vorleistungen für die Stromerzeugung mit PV-Aufdachanlagen

| | Wartung | Versicherung | Fremdkapital | Ersatzteile |
|---|---|---|---|---|
| Euro/kW | 9 | 2 | 21 | 4 |
| Gütergruppe | 35 | 50 | 49 | 22 (0,5) |
| (Anteil) | | | | 23 (0,5) |
| rtyp (Anteil) | 1 | 5 | 1 (0,5) | 5 (0,5) |
| | | | 5 (0,5) | 4 (0,5) |

Tabelle 3.18.: Vorleistungen für die Stromerzeugung mit PV-Freiflächenanlagen

| | Wartung | Versicherung | Pacht | Fremdkapital | Ersatzteile |
|---|---|---|---|---|---|
| Euro/kW | 6 | 1 | 1 | 15 | 3 |
| Gütergruppe | 35 | 50 | 52 | 49 | 22 (0,5) |
| (Anteil) | | | | | 23 (0,5) |
| rtyp (Anteil) | 1 | 5 | 1 | 1 (0,5) | 5 (0,5) |
| | | | | 5 (0,5) | 4 (0,5) |

Tabelle 3.19.: Vorleistungen für die Stromerzeugung aus Onshore-Wind

| | Instandhaltung | Strom | Versicherung | Sonstiges | Pacht | Fremdkapital |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Euro/kW | 18 | 3 | 9 | 12 | 14 | 25 |
| Gütergruppe | 24 | 29 | 50 | 57 | 52 | 49 |
| rtyp (Anteil) | 1 (0,5) | 5 | 5 | 1 (0,5) | 1 | 1 (0,5) |
| | 5 (0,5) | | | 5 (0,5) | | 5 (0,5) |

Tabelle 3.20.: Vorleistungen für die Stromerzeugung aus Offshore-Wind

| | Instandhaltung | Strom | Versicherung | Sonstiges | Fremdkapital |
|---|---|---|---|---|---|
| Euro/kW | 52 | 3 | 26 | 35 | 55 |
| Gütergruppe | 24 | 29 | 50 | 57 | 49 |
| rtyp (Anteil) | 1 (0,5) | 5 | 5 | 1 (0,5) | 1 (0,5) |
| | 5 (0,5) | | | 5 (0,5) | 5 (0,5) |

Tabelle 3.21.: Vorleistungen für die Stromerzeugung aus Wasserkraft

| | Instandhaltung | Verwaltung | Versicherung | Pacht | Fremdkapital |
|---|---|---|---|---|---|
| Euro / kW | 76 | 8 | 8 | 8 | 74 |
| Gütergruppe | 21 (0,4) | 57 | 50 | 52 | 49 |
| (Anteil) | 23 (0,1) | | | | |
| | 24 (0,4) | | | | |
| | 35 (0,1) | | | | |
| rtyp (Anteil) | 5 | 1 | 5 | 1 | 1 (0,5) |
| | | | | | 5 (0,5) |

Tabelle 3.22.: Vorleistungen für die Stromerzeugung aus Biomasse

| | Instand-haltung | Ver-waltung | Ver-sicherung | Pacht | Fremd-kapital | Brennstoff | Trans-port | Asche-entsorgung |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Euro / kW | 150 | 16 | 16 | 16 | 65 | 157 | 116 | 4 |
| Gütergruppe | 21 (0,4) | 57 | 50 | 52 | 49 | 1 (0,5) | 39 | 32 |
| (Anteil) | 23 (0,1) | | | | | 2 (0,5) | | |
| | 24 (0,4) | | | | | | | |
| | 35 (0,1) | | | | | | | |
| rtyp (Anteil) | 5 | 1 | 5 | 1 | 1 (0,5) | 1 (0,5) | 1 | 1 |
| | | | | | 5 (0,5) | 4 (0,5) | | |

Tabelle 3.23.: Vorleistungen für die Stromerzeugung aus Braunkohle

| | Instandhaltung | Verwaltung | Versicherung | Pacht | Fremdkapital | Brennstoff |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Euro / kW | 45 | 5 | 5 | 5 | 34 | 54 |
| Gütergruppe | 21 (0,4) | 57 | 50 | 52 | 49 | 4 |
| (Anteil) | 23 (0,1) | | | | | |
| | 24 (0,4) | | | | | |
| | 35 (0,1) | | | | | |
| rtyp (Anteil) | 5 | 1 | 5 | 1 | 1 (0,5) | 1 |
| | | | | | 5 (0,5) | |

Tabelle 3.24.: Vorleistungen für die Stromerzeugung aus Steinkohle

| | Instandhaltung | Verwaltung | Versicherung | Pacht | Fremdkapital | Brennstoff |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Euro / kW | 29 | 3 | 3 | 3 | 30 | 118 |
| Gütergruppe | 21 (0,4) | 57 | 50 | 52 | 49 | 4 |
| (Anteil) | 23 (0,1) | | | | | |
| | 24 (0,4) | | | | | |
| | 35 (0,1) | | | | | |
| rtyp (Anteil) | 5 | 1 | 5 | 1 | 1 (0,5) | 4 |
| | | | | | 5 (0,5) | |

Tabelle 3.25.: Vorleistungen für die Stromerzeugung aus Erdgas

| | Instandhaltung | Verwaltung | Versicherung | Pacht | Fremdkapital | Brennstoff |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Euro / kW | 10 | 1 | 1 | 1 | 16 | 160 |
| Gütergruppe | 21 (0,4) | 57 | 50 | 52 | 49 | 5 |
| (Anteil) | 23 (0,1) | | | | | |
| | 24 (0,4) | | | | | |
| | 35 (0,1) | | | | | |
| rtyp (Anteil) | 5 | 1 | 5 | 1 | 1 (0,5) | 4 |
| | | | | | 5 (0,5) | |

Tabelle 3.26.: Vorleistungen für die Stromerzeugung aus Kernenergie

| | Instandhaltung | Verwaltung | Versicherung | Pacht | Fremdkapital | Brennstoff |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Euro / kW | 91 | 10 | 10 | 10 | 54 | 19 |
| Gütergruppe (Anteil) | 21 (0,4)<br>23 (0,1)<br>24 (0,4)<br>35 (0,1) | 57 | 50 | 52 | 49 | 13 |
| rtyp (Anteil) | 5 | 1 | 5 | 1 | 1 (0,5)<br>5 (0,5) | 4 |

#### 3.2.2.4. Ökonomischer Impuls

Basierend auf der oben beschriebenen Methodik und Datenbasis werden als Impuls für ISI-Macro die Vorleistungen nach Gütergruppen, die Bruttowertschöpfung und ihre Elemente Abschreibungen, Gewinne und Löhne, sowie der Arbeitskräftebedarf für die Stromerzeugung abgeleitet. Ein Teil ist direkt einer inländischen NUTS2-Region zugeteilt, ein Teil dem Inland aber ohne regionale Zuordnung und ein weiterer Teil wird importiert. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 3.27 für Referenzszenario und Energiewendeszenario für die Jahre 2020 und 2030 zusammengefasst. Zusätzlich zeigt Tabelle 3.28 die direkt regional zugewiesenen Werte je NUTS2-Region, aggregiert über alle Wirtschaftsbereiche. Tabellen mit der gleichen Struktur wurden auch für die einzelnen Technologien erstellt. Sie befinden sich im Anhang A.8 dieser Arbeit.

Tabelle 3.27.: Inputs für die Stromerzeugung nach Gütergruppen und Wertschöpfungselementen

| Vorleistungen in Mio Euro | Ref 2020 | | | | | Ref 2030 | | | | | EW 2020 | | | | | EW 2030 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | rtyp | | | | rtyp | | | | | rtyp | | | | | rtyp | | | |
| Gütergruppe | 1 | 4 | 5 | Gesamt | | 1 | 4 | 5 | Gesamt | | 1 | 4 | 5 | Gesamt | | 1 | 4 | 5 | Gesamt | |
| 1 | 250 | 250 | 0 | 500 | | 196 | 196 | 0 | 391 | | 250 | 250 | 0 | 500 | | 196 | 196 | 0 | 391 | |
| 2 | 250 | 250 | 0 | 500 | | 196 | 196 | 0 | 391 | | 250 | 250 | 0 | 500 | | 196 | 196 | 0 | 391 | |
| 4 | 1268 | 5480 | 0 | 6748 | | 1226 | 3969 | 0 | 5195 | | 1028 | 5382 | 0 | 6410 | | 731 | 3733 | 0 | 4464 | |
| 5 | 0 | 1196 | 0 | 1196 | | 0 | 2746 | 0 | 2746 | | 0 | 3053 | 0 | 3053 | | 0 | 5880 | 0 | 5880 | |
| 13 | 0 | 169 | 0 | 169 | | 0 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 169 | 0 | 169 | | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 21 | 0 | 0 | 1506 | 1506 | | 0 | 0 | 1012 | 1012 | | 0 | 0 | 1463 | 1463 | | 0 | 0 | 876 | 876 | |
| 22 | 0 | 31 | 31 | 62 | | 0 | 31 | 31 | 62 | | 0 | 39 | 39 | 78 | | 0 | 41 | 41 | 82 | |
| 23 | 0 | 31 | 408 | 439 | | 0 | 31 | 284 | 315 | | 0 | 39 | 405 | 443 | | 0 | 41 | 260 | 301 | |
| 24 | 480 | 0 | 1986 | 2467 | | 434 | 0 | 1446 | 1881 | | 505 | 0 | 1968 | 2473 | | 670 | 0 | 1546 | 2216 | |
| 29 | 0 | 0 | 128 | 128 | | 0 | 0 | 109 | 109 | | 0 | 0 | 136 | 136 | | 0 | 0 | 150 | 150 | |
| 32 | 23 | 0 | 0 | 23 | | 18 | 0 | 0 | 18 | | 23 | 0 | 0 | 23 | | 18 | 0 | 0 | 18 | |
| 35 | 226 | 0 | 377 | 603 | | 228 | 0 | 253 | 481 | | 285 | 0 | 366 | 651 | | 306 | 0 | 219 | 525 | |
| 39 | 741 | 0 | 0 | 741 | | 580 | 0 | 0 | 580 | | 741 | 0 | 0 | 741 | | 580 | 0 | 0 | 580 | |
| 49 | 2289 | 0 | 2289 | 4579 | | 1813 | 0 | 1813 | 3626 | | 2368 | 0 | 2368 | 4736 | | 2072 | 0 | 2072 | 4144 | |
| 50 | 935 | 0 | 0 | 935 | | 759 | 0 | 0 | 759 | | 963 | 0 | 0 | 963 | | 978 | 0 | 0 | 978 | |
| 52 | 398 | 0 | 0 | 398 | | 268 | 0 | 0 | 268 | | 387 | 0 | 0 | 387 | | 232 | 0 | 0 | 232 | |
| 57 | 718 | 0 | 320 | 1038 | | 557 | 0 | 290 | 847 | | 723 | 0 | 336 | 1060 | | 679 | 0 | 447 | 1125 | |
| Gesamt | 7580 | 7407 | 7046 | 22032 | | 6276 | 7168 | 5237 | 18680 | | 7523 | 9182 | 7081 | 23786 | | 6658 | 10086 | 5609 | 22353 | |
| Abschreibungen in Mio Euro | | | | 10573 | | | | | 8794 | | | | | 11230 | | | | | 10823 | |
| Löhne in Mio Euro | | | | 1688 | | | | | 1329 | | | | | 1725 | | | | | 1492 | |
| Gewinne in Mio Euro | | | | 8167 | | | | | 6476 | | | | | 8461 | | | | | 7348 | |
| Bruttowertschöpfung in Mio Euro | | | | 20427 | | | | | 16599 | | | | | 21415 | | | | | 19663 | |
| Arbeitskräftebedarf in VZÄ | | | | 15421 | | | | | 10073 | | | | | 15756 | | | | | 11305 | |

Tabelle 3.28.: Inputs für die Stromerzeugung nach Regionen

| | Vorleistungen in Mio Euro | | | | Bruttowertschöpfung in Mio Euro | | | | Arbeitskräftebedarf in Vollzeitäquivalenten | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
| Stuttgart | 165 | 105 | 161 | 98 | 641 | 425 | 610 | 372 | 499 | 281 | 501 | 266 |
| Karlsruhe | 241 | 166 | 242 | 155 | 996 | 743 | 994 | 805 | 832 | 499 | 851 | 473 |
| Freiburg | 84 | 74 | 81 | 72 | 324 | 306 | 301 | 291 | 247 | 182 | 242 | 180 |
| Tübingen | 87 | 78 | 86 | 78 | 340 | 325 | 325 | 319 | 246 | 177 | 242 | 177 |
| Oberbayern | 220 | 212 | 225 | 222 | 1214 | 1237 | 1236 | 1506 | 720 | 571 | 764 | 622 |
| Niederbayern | 145 | 95 | 146 | 97 | 575 | 392 | 570 | 389 | 419 | 236 | 420 | 238 |
| Oberpfalz | 77 | 65 | 76 | 64 | 233 | 208 | 221 | 195 | 234 | 160 | 231 | 158 |
| Oberfranken | 67 | 54 | 67 | 61 | 168 | 143 | 167 | 157 | 200 | 134 | 200 | 138 |
| Mittelfranken | 79 | 67 | 81 | 69 | 245 | 222 | 254 | 235 | 257 | 186 | 272 | 202 |
| Unterfranken | 79 | 67 | 79 | 67 | 224 | 200 | 219 | 197 | 236 | 164 | 238 | 168 |
| Schwaben | 175 | 94 | 176 | 96 | 690 | 390 | 686 | 394 | 473 | 216 | 472 | 218 |
| Berlin | 52 | 39 | 58 | 36 | 304 | 256 | 343 | 419 | 192 | 105 | 202 | 112 |
| Brandenburg | 705 | 556 | 713 | 350 | 1333 | 984 | 1431 | 843 | 872 | 555 | 898 | 463 |
| Bremen | 122 | 135 | 123 | 191 | 329 | 360 | 333 | 628 | 234 | 211 | 235 | 293 |
| Hamburg | 121 | 132 | 121 | 187 | 554 | 613 | 554 | 1149 | 245 | 216 | 245 | 296 |
| Darmstadt | 89 | 77 | 82 | 66 | 378 | 341 | 329 | 274 | 306 | 220 | 309 | 214 |
| Gießen | 33 | 25 | 35 | 28 | 91 | 73 | 105 | 89 | 74 | 49 | 78 | 53 |
| Kassel | 43 | 33 | 45 | 34 | 134 | 108 | 149 | 128 | 95 | 63 | 100 | 72 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 305 | 310 | 313 | 678 | 651 | 653 | 693 | 799 | 569 | 423 | 581 | 967 |
| Braunschweig | 136 | 105 | 141 | 86 | 324 | 243 | 353 | 234 | 326 | 208 | 337 | 195 |
| Hannover | 233 | 133 | 269 | 177 | 684 | 316 | 780 | 437 | 545 | 228 | 574 | 261 |
| Lüneburg | 337 | 341 | 352 | 453 | 561 | 554 | 604 | 710 | 608 | 470 | 621 | 593 |
| Weser-Ems | 548 | 458 | 594 | 617 | 1474 | 1140 | 1621 | 1663 | 1044 | 647 | 1088 | 814 |
| Düsseldorf | 506 | 437 | 408 | 322 | 982 | 776 | 996 | 794 | 747 | 476 | 711 | 450 |
| Köln | 464 | 414 | 363 | 302 | 815 | 721 | 804 | 817 | 535 | 378 | 489 | 366 |
| Münster | 145 | 89 | 166 | 110 | 519 | 333 | 625 | 435 | 417 | 229 | 451 | 248 |
| Detmold | 97 | 69 | 105 | 74 | 318 | 224 | 357 | 261 | 248 | 144 | 263 | 157 |
| Arnsberg | 179 | 118 | 201 | 137 | 687 | 445 | 817 | 577 | 638 | 352 | 682 | 390 |
| Koblenz | 64 | 50 | 69 | 60 | 192 | 159 | 219 | 200 | 121 | 84 | 129 | 95 |
| Trier | 54 | 35 | 54 | 39 | 154 | 112 | 150 | 116 | 92 | 60 | 91 | 61 |
| Rheinhessen-Pfalz | 71 | 60 | 72 | 62 | 285 | 265 | 282 | 272 | 191 | 153 | 212 | 179 |
| Saarland | 70 | 56 | 69 | 47 | 315 | 260 | 306 | 212 | 242 | 162 | 249 | 141 |
| Dresden | 338 | 326 | 311 | 316 | 495 | 449 | 492 | 511 | 323 | 236 | 310 | 245 |
| Chemnitz | 59 | 45 | 65 | 64 | 125 | 91 | 177 | 180 | 110 | 68 | 125 | 92 |
| Leipzig | 260 | 245 | 237 | 216 | 382 | 339 | 375 | 332 | 285 | 204 | 274 | 196 |
| Sachsen-Anhalt | 417 | 294 | 426 | 271 | 890 | 591 | 983 | 670 | 635 | 380 | 661 | 396 |
| Schleswig-Holstein | 650 | 623 | 673 | 751 | 1501 | 1383 | 1581 | 1707 | 1080 | 771 | 1103 | 904 |
| Thüringen | 125 | 91 | 136 | 121 | 303 | 219 | 373 | 348 | 287 | 174 | 307 | 214 |
| Summe | 7643 | 6372 | 7625 | 6877 | 20427 | 16599 | 21415 | 19663 | 15421 | 10073 | 15756 | 11305 |

## 3.3. Nationale Impulse ohne regionale Zuweisung

### 3.3.1. Stromerzeugung: Investitionen in Netze

Pfluger et al. (2017c) geben für die Zeiträume 2013 bis 2020 und 2020 bis 2030 für die Szenarien Referenz und Basis die Investitionen in Übertragungsnetze an. Die Investitionen in Verteilernetze sind nicht direkt angegeben, lediglich das Delta der annuisierten Kosten zwischen den Szenarien ist veröffentlicht. Die Höhe des zugehörigen absoluten Deltas der Investitionen in Verteilernetze für die genannten Zeiträume geht auf eine persönliche Mitteilung von Alexander Ladermann (2018) zurück. Die Werte liegen nicht in regionaler Auflösung vor. Sie sind im oberen Teil von Tabelle 3.29 dargestellt.

Das Investitionsdelta wird innerhalb der Zeiträume gleichmäßig auf einzelne Jahre verteilt, da keine genauen Informationen zur zeitlichen Verteilung vorliegen. Die Aufteilung auf Gütergruppen basiert auf Löckener et al. (2016). Da weder zum inländischen und importierten Anteil, noch zur regionalen Verteilung innerhalb Deutschlands Informationen vorliegen (entspricht rtyp=3) erfolgt die regionale Zuordnung der Impulse modellendogen. Sie werden hierfür wie ein durchschnittliches Investitionsgut aus der gleichen Gütergruppe behandelt. Im unteren Teil von Tabelle 3.29 ist der ökonomische Impuls, das Investitionsdelta nach Gütergruppen, dargestellt.

Tabelle 3.29.: Investitionen in Stromnetze: Abweichungen zwischen Energiewendeszenario und Referenzszenario. Oben: Kumuliertes Delta in Mio Euro. Quelle: Ladermann (2018), Pfluger et al. (2017c). Unten: Jährliches Delta in Mio Euro nach Gütergruppen. Quelle: Eigene Berechnungen basierend auf Ladermann (2018), Löckener et al. (2016), Pfluger et al. (2017c)

| | bis 2020 | 2020 bis 2030 |
|---|---|---|
| Übertragungsnetz | 1500 | 14700 |
| Verteilernetz | 2500 | 1200 |
| Summe | 4000 | 15900 |

.

| Gütergruppe | 2020 | 2030 |
|---|---|---|
| 23 | 200 | 636 |
| 34 | 200 | 636 |
| 54 | 100 | 318 |

### 3.3.2. Stromerzeugung: gelieferte Vorleistungen

Als Input fließt von 2010 bis 2030 jährlich der Strompreis $p$, unterteilt nach stromintensiver und sonstiger Industrie und Dienstleistungsbereichen, ein. Ab 2013 unterscheiden sich dabei die Szenarien (vgl. auch Abbildung 2.7 in Kapitel 2). Weiterhin fließen die mit dem Modell Forecast ermittelte Stromnachfrage und die für die Stromnachfragemodellierung zugrunde gelegte Bruttowertschöpfung für die Jahre 2010, 2020 und 2030 ein, jeweils unterteilt nach Industrie und Dienstleistungsbereichen. Für das Referenzszenario wird dabei auf die Werte des Szenarios Referenz der Langfristszenarien zurückgegriffen, für das Energiewendeszenario entsprechend auf die Werte des Szenarios Basis (Pfluger et al., 2017c).

Aus den Zeitreihen für Stromverbrauch und Bruttowertschöpfung wird für die beiden Szenarien die Stromintensität *con*, das heißt der Stromverbrauch je Wertschöpfung berechnet. Darauf aufbauend lässt sich die relative Veränderung pro Jahr ermitteln (3.23). Gleichermaßen wird die jährliche relative Veränderung der Strompreise berechnet (3.24). Relative Veränderung von Stromintensität und Strompreis werden im Input-Output-Modul zur Berechnung des Bottom-up-Impuls benutzt, der sich auf die vom Bereich Elektrizitätsversorgung gelieferten Vorleistungen bezieht (3.25).

$$\Delta con_t = \frac{con_t - con_{t-\Delta t}}{con_{t-\Delta t}} \tag{3.23}$$

$$\Delta p_t = \frac{p_t - p_{t-\Delta t}}{p_{t-\Delta t}} \tag{3.24}$$

$$z^{\text{bu}}_{ij,t} = z_{ij,t}(\Delta p_t + \Delta con_t + \Delta p_t \Delta con_t) \qquad \text{für } i = 29 \tag{3.25}$$

Die Produktionsbereiche mit laufender Nummer 1 bis 35 in Tabelle A.2 im Anhang wurden als industriell klassifiziert, die Produktionsbereich ab der laufenden Nummer 36 als Dienstleistungsbereiche. Nur einige wenige Produktionsbereiche enthalten zudem stromintensive Industrie, die entsprechenden Anteile sind in Tabelle 3.30 aufgeführt. Gleichung 3.25 wird dann durch eine entsprechende Gewichtung ergänzt.

### 3.3.3. Stromerzeugung: Konsum

Das Modell Forecast liefert den Strompreis für und den Stromverbrauch der Haushalte. Strompreise liegen hierbei jährlich vor, der Stromverbrauch nur für die Jahre 2010, 2020 und 2030. Für die Zwischenzeiträume erfolgt eine lineare Interpolation. Aus Stromverbrauch und Strompreis werden die Stromausgaben der Haushalte berechnet. Der Strompreis ist im Energiewendeszenario zwar höher als im Referenzszenario, für den Strom-

Tabelle 3.30.: Produktionsbereiche mit stromintensiver Produktion: Der angegebene Anteil bezieht sich auf die vom Bereich Elektrizitätsversorgung an den Produktionsbereich gelieferten Vorleistungen, die auf die stromintensive Produktion entfallen. Quelle: Eigene Berechnungen basierend auf Grave et al. (2015)

| Nr. | Produktionsbereich | Anteil |
|---|---|---|
| 10 | Papier | 0,285 |
| 13 | Chemische Erzeugnisse | 0,76 |
| 18 | Eisenmetalle | 0,225 |
| 19 | Nichteisenmetalle | 0,1625 |

verbrauch ist aufgrund der höheren Energieeffizienz im Energiewendeszenario jedoch das Gegenteil der Fall. Die Stromausgaben der Haushalte werden von letzterem Effekt dominiert und liegen im Jahr 2030 im Energiewendeszenario unter dem Referenzszenario. Im Modell werden die Stromausgaben ebenso wie die in den folgenden Abschnitten beschriebenen weiteren Energieausgaben der Haushalte den entsprechenden Gütergruppen zugeteilt (Tabelle 3.31). Die Überleitung von Anschaffungspreisen zu Herstellungspreisen [8] erfolgt mittels eines Faktors, der mithilfe der Verwendungstabelle zu Anschaffungspreisen und der Input-Output-Tabelle zu Herstellungspreisen (Destatis, 2015b) berechnet wurde (Tabelle 3.31). Der Konsum in den aufgeführten Gütergruppen wird durch die Szenarien komplett exogen vorgegeben.

### 3.3.4. Energie: gelieferte Vorleistungen

Die mit dem Modell Forecast ermittelte Energienachfrage der Industrie in den Jahren 2010, 2020 und 2030 unterteilt nach den Energieträgern Kohle, Öl, Gas und Biomasse wird Pfluger et al. (2017c) entnommen (vgl. Abbildung 2.8 in Kapitel 2).[9] Die Aufbereitung in jährliche Inputs erfolgt durch lineare Interpolation. Die Energiepreisentwicklung basiert auf den Rahmendaten der Langfristszenarien (vgl. Abbildung 2.6 in Kapitel 2). Veränderungen der industriellen Energienachfrage bewirken eine Veränderung der Vorleistungsmatrix der Input-Output-Tabelle. Hierfür werden die Energieträger den entsprechenden Gütergruppen $i$ zugeordnet. Die sich ergebende Abweichung der gelieferten Vorleistungen an die Industrie zwischen Energiewendeszenario und Referenz ist in Tabelle 3.32 dargestellt. Für

[8] Der Anschaffungspreis ist der Preis, den der Käufer für die Güter zum Zeitpunkt des Kaufes bezahlt. Der Herstellungspreis ist der Betrag, den der Produzent je Einheit der von ihm produzierten Waren und Dienstleistungen vom Käufer erhält ohne die auf die produzierten oder verkauften Güter zu zahlenden Steuern und zuzüglich aller empfangenen Subventionen, die auf die produzierten oder verkauften Güter gewährt werden.(Europäische Kommission, 2014)

[9] Die industrielle Stromnachfrage wurde bereits in Abschnitt 3.3.2 behandelt.

Tabelle 3.31.: Zuordnung zu Gütergruppen und Überleitung von Anschaffung zu Herstellungspreisen. Der angegeben Anteil bezieht sich auf die Zuordnung zu Gütergruppen, der angegebene Faktor bezieht sich auf die Überleitung von Anschaffungs- zu Herstellungspreisen. Quelle: Eigene Berechnungen basierend auf Destatis, 2015b

| Ausgaben | Gütergruppe | Anteil | Faktor |
|---|---|---|---|
| Strom | Elektrizitätsversorgung | 1 | 0,78 |
| Öl | Kokerei und Mineralölerzeugnisse | 1 | 0,49 |
| Gas | Erdöl und Erdgas | 0,44 | 0,47 |
| | Gasversorgung | 0,56 | 1 |
| Kraftstoffe | Kokerei und Mineralölerzeugnisse | 1 | 0,49 |
| Verkehrsdienstleistungen | Landverkehrsleistungen | 0,66 | 1,08 |
| | Schifffahrtsleistungen | 0,03 | 0,96 |
| | Luftverkehrsleistungen | 0,31 | 0,92 |

die Verteilung der gelieferten Vorleistungen auf die nachfragenden Produktionsbereiche $j$ wurde, unter der vereinfachenden Annahme einheitlicher Energiepreise für alle Produktionsbereiche, die gleiche Verteilung wie für die nachgefragten Energiemengen genutzt. Letztere basiert auf Rohde (2018), wobei eine Zuordnung der dort verwendeten Branchen-einteilung zu den Produktionsbereichen der Input-Output-Tabelle vorgenommen wurde. Sie ist in Tabelle 3.33 dargestellt. Durch Unterscheidung zwischen inländischen und importierten Vorleistungen ergibt sich dann die Impulse $z_{ij}^{\text{bu}}$ bzw. $z_{ij}^{\text{imp, bu}}$.

Tabelle 3.32.: Energie (ohne Strom): Delta der gelieferten Vorleistungen an die Industrie zwischen Energiewendeszenario und Referenz nach Energieträger in Mio Euro zu Herstellungskosten. Quelle: Eigene Berechnung basierend auf Pfluger et al., 2017c

| | Gütergruppe | 2020 | 2030 |
|---|---|---|---|
| Kohle | 4 | 0 | -680 |
| Gas | 5 | -450 | -1840 |
| Öl | 19 | 0 | 0 |
| Biomasse | 1, 2 | 494 | 609 |

Tabelle 3.33.: Anteile der einzelnen Produktionsbereiche an industrieller Energienachfrage in TWh (ohne Strom). Quelle: Eigene Berechnungen basierend auf Rohde, 2018

| Produktionsbereich | Nr. | Anteil |
|---|---|---|
| Erze, Steine u. Erden, sonst. Bergbauerzeugn. u. Dienstleistg | 6 | 0,09 |
| Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerzeugnisse | 7 | 0,09 |
| Textilien, Bekleidung, Leder- und Lederwaren | 8 | 0,0025 |
| Holz, Holz-, Flecht-, Korb- und Korkwaren (ohne Möbel) | 9 | 0,0025 |
| Papier, Pappe und Waren daraus | 10 | 0,09 |
| Druckereileistungen, bespielte Ton-, Bild- und Datenträger | 11 | 0,003 |
| Kokerei- und Mineralölerzeugnisse | 12 | 0,001 |
| Chemische Erzeugnisse | 13 | 0,24 |
| Pharmazeutische Erzeugnisse | 14 | 0,0065 |
| Gummi- und Kunststoffwaren | 15 | 0,01 |
| Glas und Glaswaren | 16 | 0,01 |
| Keramik, bearbeitete Steine und Erden | 17 | 0,03 |
| Roheisen, Stahl, Erzeugn. der ersten Bearbeitung von Eisen und Stahl | 18 | 0,2565 |
| NE-Metalle und Halbzeug daraus | 19 | 0,0135 |
| Gießereierzeugnisse | 20 | 0,03 |
| Metallerzeugnisse | 21 | 0,03 |
| DV-Geräte, elektron. u. optische Erzeugnisse | 22 | 0,01 |
| Elektrische Ausrüstungen | 23 | 0,013 |
| Maschinen | 24 | 0,02 |
| Kraftwagen und Kraftwagenteile | 25 | 0,04 |
| Sonstige Fahrzeuge | 26 | 0,004 |
| Herstellung von Möbeln und sonstigen Waren | 27 | 0,0075 |

### 3.3.5. Energieeffiziente Technologien: zusätzlicher Konsum

Im Energiewendeszenario werden effizientere Haushaltsgeräte, Beleuchtung etc. eingesetzt als im Referenzszenario. Dies ist für die privaten Haushalte mit höheren Ausgaben für die Anschaffung (aber geringerer Energienachfrage vgl. Abschnitt 3.3.3) verbunden.[10] Die Mehrausgaben für energieeffiziente Technologien werden in Fünfjahreszeiträumen (2010 bis 2015, 2015 bis 2020, usw.) zusammengefasst und stellen den Input aus dem Energienachfragemodell Forecast dar. Für die Weiterverwendung im ökonomischen Modell werden durch gleichmäßige Verteilung innerhalb des Zeitraums jährliche Werte berechnet. Die einzelnen Technologiegruppen werden den Gütergruppen des ökonomischen Modells zugeordnet. Als ökonomischer Impuls fließt das jährliche Delta des Konsums nach Wirtschaftsbereichen ein.

### 3.3.6. Energieeffiziente Technologien: zusätzliche Investitionen

Auch im gewerblichen bzw. industriellen Bereich werden Effizienzverbesserungen durch zusätzliche Investitionen erzielt. Das Investitionsdelta zwischen den Szenarien stellt jeweils kumuliert für Fünfjahreszeiträume den Input aus dem Energienachfragemodell Forecast dar. Zur Weiterverwendung im ökonomischen Modell werden daraus jährliche Werte berechnet und die einzelnen Technologiegruppen werden den produzierenden Wirtschaftsbereichen zugeordnet. Als ökonomischer Impuls fließt das jährliche Delta der Investitionen nach Wirtschaftsbereichen ein.

### 3.3.7. Baugewerbe: zusätzliche Investitionen

Die Erreichung der Klimaziele im Gebäudebereich erfordert hohe Investitionen in energieeffiziente Gebäudehüllen und Wärmeerzeugungsanlagen. Das jährliche Delta zwischen Referenz und Energiewendeszenario wird als Input aus dem Modell Invert weitergegeben und fließt als Investitionsimpuls im Baugewerbe (Hochbau) ein.

### 3.3.8. Grundstücks- und Wohnungswesen: zusätzlicher Konsum

Die im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Zusatzinvestitionen im Gebäudebereich bewirken ein Erhöhung von tatsächlichen und unterstellten Mieten.[11] Konkret erfolgt eine Umlage von 11 Prozent auf die jährliche Miete. Die zusätzlichen Mietausgaben (entspricht

[10] Ausgaben der privaten Haushalte für die Anschaffung von langfristigen Konsumgütern wie Haushaltsgeräte oder Autos zählen im Sinne der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung zum Konsum, die Ausgaben für Bau oder Kauf von Gebäuden werden hingegen zu den Investitionen gezählt, auch wenn sie von privaten Haushalten getätigt werden.

[11] In der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung wird der ökonomische Wert vom Wohnen im Eigentum als unterstellte Mieten abgebildet (Europäische Kommission, 2014, S. 77; Destatis, 2016, S. 204).

dem zusätzlichen Konsum von Dienstleistungen des Grundstücks- und Wohnungswesens) hängen somit vom kumulierten Delta der Investitionen im Baugewerbe ab.[12] Ob in der Praxis tatsächlich eine Umlage in dieser Höhe möglich ist, hängt von regionalen Wohnungsmärkten ab und wurde bisher noch nicht untersucht. Der Wert ist daher eher als obere Grenze anzusehen.[13]

### 3.3.9. Grundstücks- und Wohnungswesen: bezogene Vorleistungen

Der zuvor beschriebene zusätzliche Konsum von Dienstleistungen des Grundstücks- und Wohnungswesens (Produktionsbereich Nr. 52) aufgrund von Umlage der Energieeffizienzinvestitionen auf die Miete soll nicht zu einer Erhöhung der bezogenen Vorleistungen dieses Bereichs führen. Dies wäre ohne Anpassung durch die im ökonomischen Kern implementierten Mechanismen jedoch der Fall (vgl. Kapitel 4). Daher ist ein entsprechender negativer Impuls nötig:

$$z_{ij,t}^{\mathrm{bu}} = -a_{ij,t} \left. \frac{dx_j^{bu}}{dt} \right|_t \qquad \text{für } j = 52 \tag{3.26}$$

mit $z_{i,j}$ Vorleistung der Gütergruppe i=1...72 an Bereich j=52
$a_{i,j}$ Input der Gütergruppe i=1...72 je Output des Bereichs j=52
$x$ Produktionswert

### 3.3.10. Grundstücks- und Wohnungswesen: Arbeitskräftebedarf

Der erhöhte Konsum von Dienstleistungen des Grundstücks- und Wohnungswesens bei unverändertem Bezug von sekundären Inputs wirkt positiv auf die Wertschöpfung dieses Produktionsbereichs (relativer Anteil an Produktionswert steigt, vgl. Kapitel 4). Der Arbeitskräftebedarf ist davon jedoch nicht betroffen. Aus diesem Grund erfolgt im Modell eine entsprechende Korrektur des Arbeitskräftebedarf des Grundstücks- und Wohnungswesens:[14]

[12] Auf eine formelle Beschreibung wird aufgrund des einfachen linearen Zusammenhangs an dieser Stelle verzichtet.

[13] Ab 2019 liegt die Obergrenze bei 8 Prozent, da dies zum Zeitpunkt der Berechnungen jedoch kein geltendes Recht war, ist dies hier nicht mit berücksichtigt

[14] Aufgrund der wegfallenden Vorleistungen für die zusätzlichen Mietausgaben (Gleichung 3.27) kann an dieser Stelle vereinfachend das Konsumdelta statt des Wertschöpfungsdeltas genutzt werden.

$$l_{j,t}^{\text{bu}} = -\iota_{j,t} c_j^{bu} \qquad \text{für } j = 52 \tag{3.27}$$

mit $l$ Arbeitskräftebedarf
$\iota$ Arbeitsproduktivität
$c$ Konsum

### 3.3.11. Heizenergie: Konsum

Aus dem Modell Invert werden die jährlichen Heizenergieausgaben der Haushalte nach Energieträgern in den Szenarien als Input bereitgestellt. Diese werden dann den entsprechenden Gütergruppen zugeordnet und von Anschaffungspreisen in Herstellerpreise überführt (vgl. Tabelle 3.31). Der Konsum in den betroffenen Wirtschaftsbereichen stellt dann den ökonomischen Impuls dar. Teilweise betreffen Heizenergieausgaben, Kraftstoffausgaben und Stromausgaben die gleichen Gütergruppen, sodass sich der ökonomische Impuls aus unterschiedlichen Inputs speist. Die Energienachfrage für Raumwärme und Warmwasser geht in beiden Szenarien zurück, im Energiewendeszenario jedoch etwas stärker als in der Referenz (vgl. Abbildung 2.13 in Kapitel 2).

### 3.3.12. Kraftstoffe: Konsum

Die mit dem ASTRA-Modell berechnete Nachfrage nach fossilen Kraftstoffen für den Verkehr wird Pfluger et al. (2017b) entnommen. Fossile Kraftstoffe werden der Gütergruppe Mineralölprodukte zugeordnet. Der auf den Verkehr entfallende Konsum in dieser Gütergruppe aus der Input-Output-Tabelle wird mit der jährlichen Änderungsrate der Kraftstoffnachfrage in den Szenarien fortgeschrieben und auf diese Weise der ökonomische Impuls berechnet. Teilweise betreffen Heizenergieausgaben, Kraftstoffausgaben und Stromausgaben die gleichen Gütergruppen, sodass sich der ökonomische Impuls aus unterschiedlichen Inputs speist.

### 3.3.13. Kraftstoffe: gelieferte Vorleistungen

Die Energienachfrage unterteilt nach Verkehrsträgern wird Pfluger et al. (2017b) entnommen und wurde mit dem ASTRA-Modell berechnet. Die Kraftstoffnachfrage (fossil und Biokraftstoffe) von gewerblichen PKW, LKW, Bus und Bahn wird dem Produktionsbereich Landverkehr zugewiesen, die von Flugzeugen und Schiffen entsprechen den Dienstleistungsbereichen Flugverkehr und Schifffahrt. Veränderungen der Kraftstoffnachfrage be-

wirken eine Veränderung der Vorleistungsmatrix der Input-Output-Tabelle. Die entsprechenden Matrixelemente werden mit der jährlichen Änderungsrate der Energienachfrage für die Szenarien fortgeschrieben, woraus sich der ökonomische Impuls ergibt.

### 3.3.14. Fahrzeuge: zusätzlicher Konsum

Die Ausgaben für die Anschaffung von Fahrzeugen durch private Haushalte variieren zwischen den Szenarien, da sich Menge und Art der Fahrzeuge unterscheiden. Das Energiewendeszenario zeichnet sich durch eine stärkere Elektrifizierung sowie durch eine höhere Effizienz der Fahrzeuge aus. Dies wirkt sich auch auf die Anschaffungskosten der Fahrzeuge aus: Die höheren Anforderungen an die Effizienz der kraftstoffbetriebenen Fahrzeuge im Vergleich zur Referenz steigern die Anschaffungskosten um 30 bis 60 Prozent bis zum Jahr 2050 (Pfluger et al., 2017b, S. 78). Elektrifizierte Fahrzeuge sind zunächst in der Anschaffung teurer als konventionell angetriebene, ab ca. 2025 ist jedoch mit einer Kostenparität zu rechnen.[15]

Das Delta beim Konsum von Produkten des Bereichs Kfz-Herstellung zwischen den Szenarien wurde wie folgt ermittelt: Basierend auf den Modellierungen mit ASTRA geben Pfluger et al. (2017c) das Delta der annualisierten Investitionen (der Begriff beinhaltet hier sowohl Investitionen als auch langfristige Konsumgüter) in Pkws und Busse für die Jahre 2020 und 2030 an. Zusätzlich wird für die Lebensdauer der Wert von 18 Jahren genannt. Basierend auf diesen beiden Inputs werden zunächst die kumulierten Investitionen in Pkws und Busse von 2010 bis 2020 und von 2020 bis 2030 berechnet, und dann gleichmäßig auf die entsprechenden Zeiträume verteilt. In einem weiteren Schritt werden sie im Verhältnis 0,9 zu 0,1 auf private Haushalte (Konsum) und gewerbliche Nutzer (Investitionen) verteilt.

Ein höherer Anteil von elektrifizierten Fahrzeugen wirkt sich auch auf die Vorleistungsstruktur des Produktionsbereichs Kfz-Herstellung aus und idealerweise wird sie entsprechend angepasst (Repenning et al., 2018; Sievers, Grimm & Doll, 2019). Hierfür werden jedoch Daten zur Verteilung der Ausgaben auf Antriebstypen benötigt, die für diese Arbeit nicht vorliegen. Tendenziell fällt somit der Effekt auf die Kfz-Herstellung und vorgelagerte Produktionsbereiche etwas zu positiv aus. Gleichzeitig fehlt ein entsprechend positiver Effekt auf den Bereich Elektrische Ausrüstungen und vorgelagerte Produktionsbereiche.

### 3.3.15. Fahrzeuge: zusätzliche Investitionen

Zusätzliche Investitionen in Fahrzeuge beinhalten zum einen gewerblich genutzte Pkws und Busse, darüber hinaus umfassen sie auch Lkws, Schiffe und Bahnen. Das Vorgehen

[15] Basierend auf einer Vollkostenrechnung ist die Anschaffung eines Elektroautos schon früher attraktiv.

für Pkws und Busse wurde im vorangehenden Abschnitt bereits beschrieben, für die weiteren Fahrzeuge gestaltet es sich analog jeweils mit Abweichungen in der unterstellten Lebensdauer und im zugewiesenen Herstellungsbereich.

### 3.3.16. Verkehrsinfrastruktur: zusätzliche Investitionen

Die Szenarien unterscheiden sich hinsichtlich der Verkehrsinfrastruktur: im Energiewendeszenario findet ein deutlich stärkerer Ausbau statt. Wie für die Investitionen in Fahrzeuge liegen auch für die Verkehrsinfrastruktur nur das Delta der annualisierten Investitionen für das Jahr 2050 und eine mit 40 Jahren angegebene Lebensdauer vor (Pfluger et al., 2017c). Hieraus können die kumulierten Investitionen bis 2050 berechnet werden, die dann gleichmäßig über den gesamten Zeitraum verteilt werden. Von den kumulierten Investitionen in Infrastruktur bis 2050 entfallen ca. 38 Mrd. auf Netze und sonstige Infrastruktur (ohne neue Technologien), was zu 80 Prozent dem Tiefbau und zu 20 Prozent dem Hochbau zugewiesen wird. 34 Mrd. Euro entfallen auf die Ladeinfrastruktur für Elektro-Fahrzeuge, was basierend auf Nationale Plattform Elektromobilität (2015) zu gleichen Teilen den Gütergruppen Tiefbau und Elektrischen Ausrüstungen zugewiesen wird. 17,4 Mrd. werden bis 2050 in Oberleitungsausbau (Lkws) investiert und analog zur Ladeinfrastruktur jeweils hälftig den Gütergruppen Tiefbau und Elektrische Ausrüstungen zugewiesen.

## 3.4. Zusammenfassung der ökonomischen Impulse

In Abbildung 3.2 sind die Impulse auf Konsum und Investitionen je Gütergruppe als Delta zwischen Energiewendeszenario und Referenz für die Jahre 2020 und 2030 dargestellt.

Das Investitionsdelta in 2030 beträgt 23,5 Milliarden Euro. Es betrifft vor allem das Baugewerbe (Energieeffizienz von Gebäuden, aber auch Infrastrukturinvestitionen und Aufbau neuer Energieerzeugungsanlagen) und in geringerem Maße Elektrische Ausrüstungen (Aufbau neuer Energieerzeugungsanlagen, Infrastrukturinvestitionen, Erhöhung der Energieeffizienz in der Industrie) und Maschinen (Aufbau neuer Energieerzeugungsanlagen, Erhöhung der Energieeffizienz in der Industrie). Die kumulierten Differenzinvestitionen von 2010 bis 2030 betragen 317 Milliarden Euro. Wie bereits in den Abschnitten 1.3 und 1.4 dargestellt und diskutiert, gibt es durchaus Investitionen des Referenzszenarios, die im Energiewendeszenario durch alternative Investitionen substituiert werden z.B. im Bereich der Stromerzeugungsanlagen. Insgesamt jedoch erhöht das Investitionsdelta das Investitionsniveau. Das Kapital für die zusätzlichen Investitionen stammt vom Finanzmarkt, die Verschuldung erhöht sich. Die Investitionen rentieren sich über die erzielten Einsparungen oder führen zu einer Erhöhung der Stückkosten. Höhere Stückkosten reduzieren im Fall

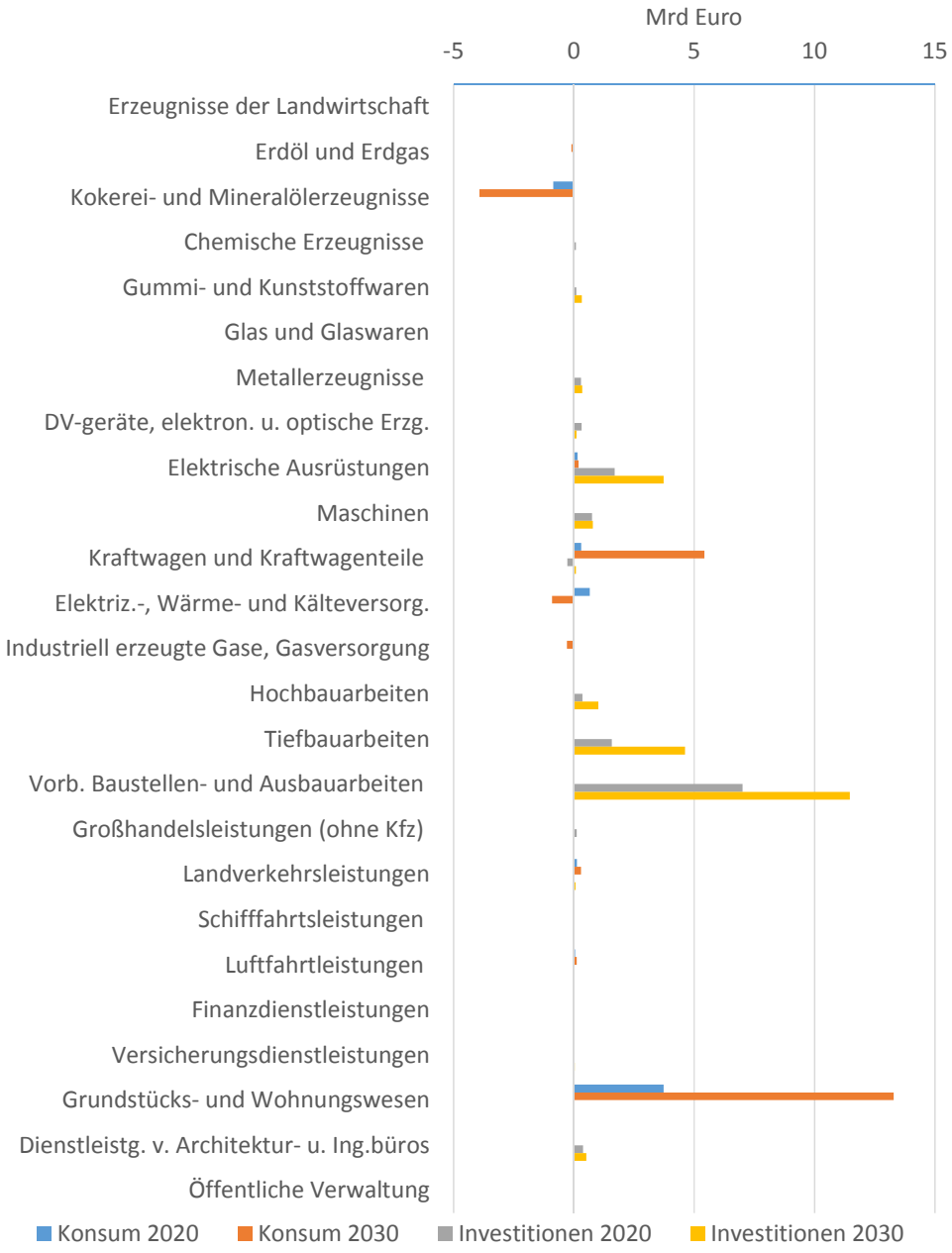



Abbildung 3.2.: Endnachfrageimpulse in Mio Euro: Abweichung zwischen Energiewendeszenario und Referenz unterteilt nach Konsum und Investitionen je Gütergruppe in 2020 und 2030. Nicht dargestellte Gütergruppen erhalten keinen Impuls.

von Zwischenprodukten die Wertschöpfung der nachfragenden Produktionsbereiche und somit letztlich die induzierte Endnachfrage.[16] Im Fall von Konsumgütern führen sie zu einer Verschiebung der Konsumstruktur. Diese Effekte wirken über die gesamte Lebensdauer des zusätzlichen Kapitals und auch über das Ende des betrachteten Szenarienzeitraums hinweg. Die Produktion der Investitionsgüter selbst ist hingegen ein kurzfristiger Effekt.

Die Impulse auf den Konsum umfassen insbesondere einen deutlichen Rückgang bei Kokerei- und Mineralölprodukten (Kraftstoffe und Heizöl) und deutliche Anstiege bei Kraftfahrzeugen (Elektromobilität) und beim Grundstücks- und Wohnungswesen (Umlage der erhöhten Investitionen). Über alle Gütergruppen aggregiert, liegt der Konsumimpuls im Energiewendeszenario in 2030 um 14,1 Milliarden Euro höher als in der Referenz. Im Gegensatz zu den Investitionen bewirkt der Impuls jedoch keine Erhöhung des Konsumniveaus, sondern führt lediglich zu einer strukturellen Verschiebung: das Budget, das für den Konsum von nicht direkt durch die Impulse betroffenen Güter und Dienstleistungen zur Verfügung steht, verringert sich (vgl. Abschnitt 1.4).

Das folgende Kapitel enthält eine detaillierte Beschreibung der Integration der Impulse in den makroökonomischen Kern des Modells.

[16] Der Reduktion der Wertschöpfung der nachfragenden Produktionsbereiche liegt zugrunde, dass außer den oben beschriebenen Effekten keine weiteren Mechanismen der Preisweitergabe unterstellt werden. Letztlich würden jedoch auch diese zu einer verminderten Endnachfrage führen.

# 4. Makroökonomischer Kern

Herzstück des Modellinstrumentariums ist das Simulationsmodell ISI-Macro (Sievers & Pfaff, 2019). Die in Abbildung 1.1 in Kapitel 1 gezeigte Grundstruktur des Modells ist in Abbildung 4.1 vergrößert dargestellt. ISI-Macro wurde zur ökonomischen Folgeabschätzung von mittel- und langfristigen Nachhaltigkeitsstrategien und -transformationen in Deutschland entwickelt. Es ist ist in seiner Grundstruktur bewusst flexibel gehalten, um auf diese Weise in integrierten Modellansätzen exogene Impulse aus verschiedenen Bottom-up-Modellen aufnehmen zu können. Beispiele sind die Energiewende (vorliegende Arbeit) oder die Steigerung der Materialeffizienz (Pfaff, 2019). Durch die Anwendung des Modells werden direkte, indirekte und induzierte Effekte erfasst. Die folgenden Abschnitte fassen die wichtigsten methodischen Grundlagen zusammen, gefolgt von einer formellen Beschreibung dieses Modellteils, die auch die Weiterverarbeitung der Impulse enthält.

## 4.1. Überblick

ISI-Macro orientiert sich an ASTRA (ASsessment of TRAnsport Strategies), einem in System Dynamics implementierten Simulationsmodell auf Europaebene, das auf Rothengatter et al. (2000) zurückgeht. ASTRA wurde ursprünglich für die Folgenabschätzung von Strategien im Verkehrssektor entwickelt und setzt sich somit aus detaillierten Verkehrsmodulen und einem makroökonomischen Kern zusammen. Dieser makroökonomische Kern folgt den Konventionen der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung und bildet die Nachfrageseite der Wirtschaft durch ein Input-Output-Modul ab, während die Angebotsseite durch eine aggregierte Cobb-Douglas-Produktionsfunktion dargestellt wird. Bei der Berechnung des BIP und anderer makroökonomischer Indikatoren werden Angebots- und Nachfrageseite zusammengeführt. Detaillierte Beschreibungen des ASTRA Modells können Schade (2005) und Krail (2009) entnommen werden.

Das vorliegende Modell unterscheidet sich in verschiedenen Aspekten von ASTRA. ISI-Macro enthält keine Verkehrsmodule. Stattdessen kann es leicht mit einer Vielzahl von Modellen kombiniert werden und so zur Beantwortung verschiedener Arten von Forschungsfragen verwendet werden. Der makroökonomische Kern entspricht den Konventionen der

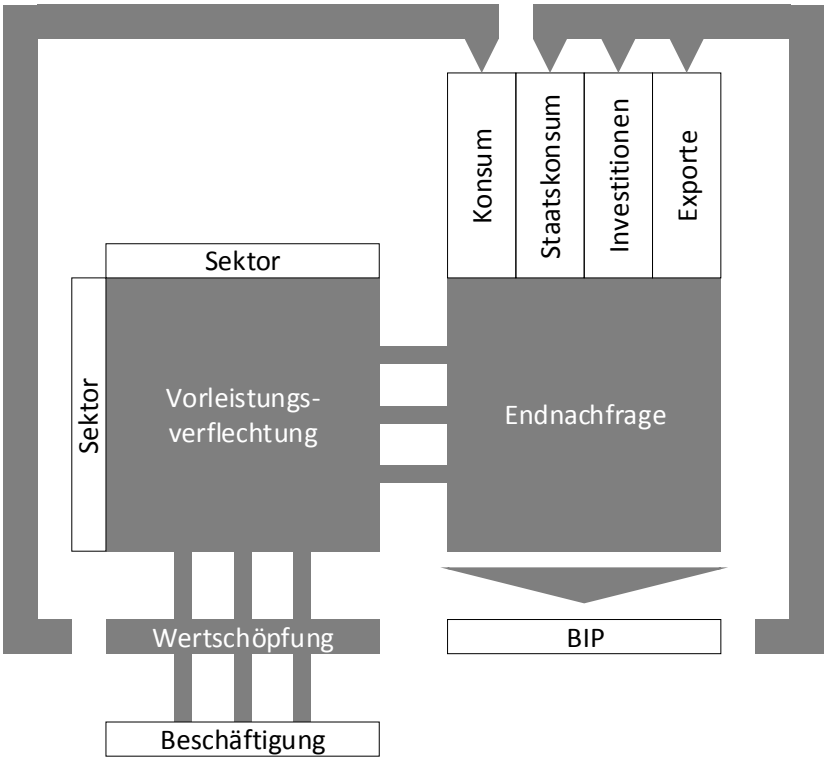



Abbildung 4.1.: Schema des makroökonomischen Kerns

Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen (VGR) und stellt die Lieferbeziehungen (Vorleistungsmatrix) zwischen den 72 Produktionsbereichen und den entsprechenden Gütergruppen dar (Input-Output-Rechnung 2012, in großen Teilen konsistent mit der Klassifikation der Wirtschaftszweige 2008). Dies ist detaillierter und aktueller als im ASTRA Modell.

Im Gegensatz zu offenen Input-Output-Mengenmodellen, ist die Endnachfrage nicht exogen, sondern wird endogen berechnet. Die Endnachfrage treibt die Produktion in den einzelnen Produktionsbereichen, aus der wiederum die Bruttowertschöpfung mit ihren Komponenten Arbeitnehmerentgelte, Steuern abzüglich Subventionen, Abschreibungen und Nettobetriebsüberschüsse bestimmt wird. Basierend auf der ökonomischen Kreislauflogik bestimmen diese Komponenten das Niveau der inländischen Endnachfrage, das heißt des privaten und staatlichen Konsums sowie der Investitionen. Exporte (als weiteres Endnachfrageelement) basieren auf Zeitreihen der Input-Output-Tabelle; ihre zukünftige Entwicklung ist an exogene Projektionen des Wirtschaftswachstums der OECD-Länder und China (und somit der wichtigsten Exportziele Deutschlands) gekoppelt (OECD, 2014).

Das Modell ist kalibriert, um den OECD-Langzeitprognosen des deutschen BIP bis zum Jahr 2060 (OECD, 2014) zu entsprechen. Dies impliziert einen exogenen inflationsbereinigten Wachstumstrend von etwa 1,1% p.a., der auch die Wachstumsrate der Endnachfrage bestimmt.

Der Schwerpunkt von ISI-Macro liegt auf der Ermittlung von ökonomischen Effekten in hoher sektoraler Auflösung, die sich aus Veränderungen auf der Nachfrageseite ergeben. Im Gegensatz zu ASTRA ist die Angebotsseite nicht explizit im Modell abgebildet. Produktivitätssteigerungen entstehen beispielsweise nicht endogen, sondern werden in Form von exogenen Daten in das Modell eingebracht. In dieser Hinsicht zeigt ISI-Macro Parallelen zu Input-Output-Modellen, die mit ihren linearen Produktionsfunktionen ebenfalls die Limitierung der Angebotsseite nicht berücksichtigen. In Bezug auf Arbeit bedeutet dies beispielsweise, dass das Modell eher den zukünftigen Arbeitskräftebedarf als das tatsächliche Beschäftigungsniveau abbildet. Produktionsstrukturen werden im Modell lediglich durch szenarienbezogene Impulse verändert. Offene Input-Output-Mengenmodelle und ihre Fortschreibung unter Nutzung keynesianischer Multiplikatoren bilden die theoretische Basis von ISI-Macro.

## 4.2. Methodische Grundlagen des Modells

ISI-Macro nutzt die Input-Output-Tabellen der Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung als Datenbasis und schreibt diese in einer System Dynamics Umgebung fort. In den folgenden Abschnitten werden kurz die entsprechenden Grundlagen dargestellt.

### 4.2.1. Input-Output-Rechnung

Die Input-Output-Tabellen als Teil der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung des statistischen Bundesamts für die Jahre 1995 bis 2012 bilden Datenbasis und Rechengerüst für den ökonomischen Kern des Modells. Die Input-Output-Rechnung spielt insbesondere bei Fragestellungen zum Strukturwandel eine wichtige Rolle. Aufgrund ihrer Relevanz für die vorliegende Arbeit folgt ein kurzer Überblick, weitere Details können den entsprechenden Lehrbüchern (z.B. Fleissner, 1993; Holub & Schnabl, 1994; Miller & Blair, 2009) entnommen werden.

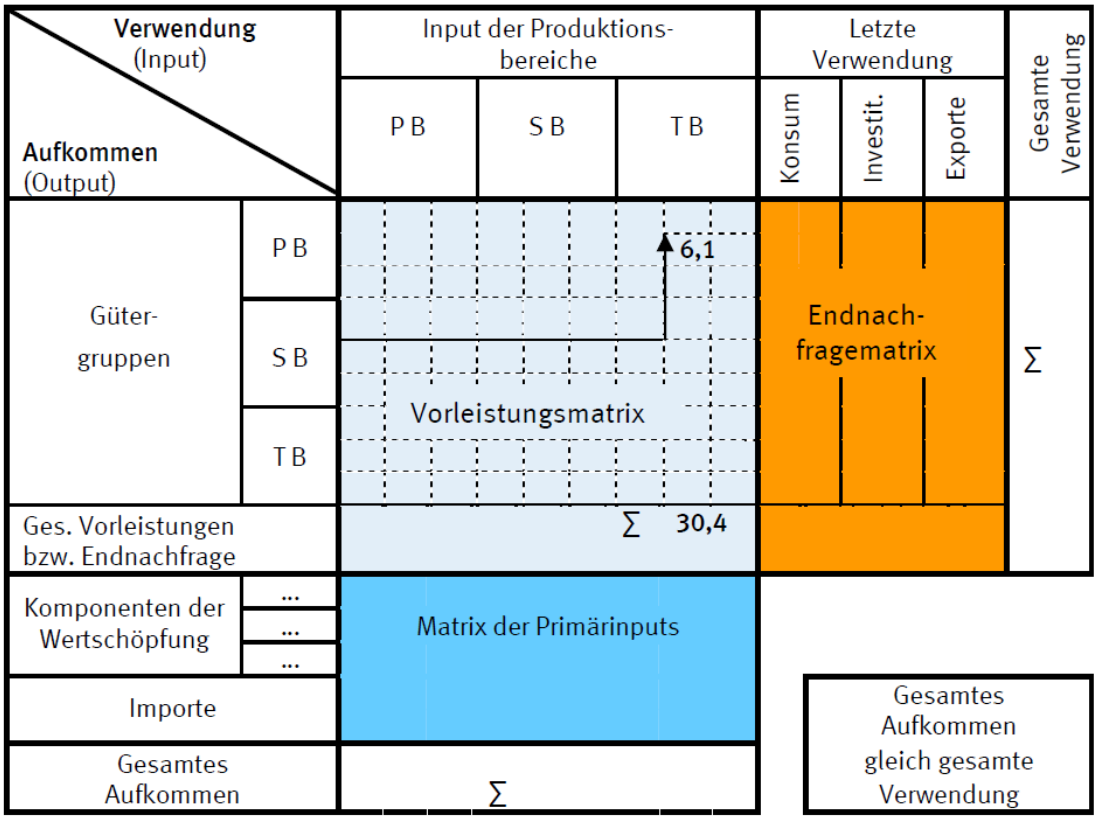
Input-Output-Tabellen dienen der Erfassung und Analyse von volkswirtschaftlichen Verflechtungsbeziehungen. Ein Produktionsbereich j bezieht von einem anderen Produktionsbereich i Güter (sekundäre Inputs $z_{ij}$) und fügt importierte Vorleistungen sowie Wertschöpfung (Arbeitnehmerentgelte, Gewinne, Abschreibungen, Steuern) hinzu (primäre Inputs $v_j$). Die produzierten Güter eines Produktionsbereichs i (Output $x_i$) werden von anderen Produktionsbereichen als Vorleistungen eingesetzt ($z_{ij}$) oder dienen der letzten Verwendung bzw. Endnachfrage ($y_i$ bestehend aus privatem und staatlichen Konsum, Investitionen, Export). Input und Output eines Produktionsbereichs sind gleich. Die Input-Output-Tabelle fasst diese Zusammenhänge in tabellarischer Form zusammen. Das Schema einer Input-Output-Tabelle findet sich in Abbildung 4.2.

Die Vorleistungsmatrix $Z$ wird dabei häufig als 1. Quadrant, die Endnachfragematrix $Y$ als 2. Quadrant und die Matrix der Primärinputs $V$ als 3. Quadrant bezeichnet. In der deutschen Input-Output-Tabelle wird zwischen 72 Gütergruppen bzw. Produktionsbereichen unterschieden, wobei eine funktionelle Produktionsstruktur genutzt wird.[1] Deutsche Input-Output-Tabellen werden jährlich erstellt, die aktuellste liegt für das Jahr 2015 vor. Die volkswirtschaftliche Verflechtung wird häufig in monetären Einheiten dargestellt, es existieren jedoch auch physische Input-Output-Tabellen und sogar Zeitverwendungstabellen.

Eine klassische Fragestellung, die mittels der vom Nobelpreisträger für Ökonomie Wassily Leontief (1936) entwickelten Input-Output-Analyse beantwortet werden kann, lautet wie folgt: Wie viele Güter müssen in allen Bereichen der Volkswirtschaft produziert werden, um die Endnachfrage nach einem bestimmten Gut zu befriedigen?

Die intermediären Input Koeffizienten $a_{ij} = \frac{z_{ij}}{x_j}$ bilden die technische Koeffizienten Matrix $A$. Für die Produktion der Endnachfrage $Y$ sind direkte Vorleistungen in Höhe von $AY$ nötig. Zur Produktion dieser Vorleistungen werden wiederum Vorleistungen in Höhe von $A(AY)$ nötig und so weiter. Daraus ergibt sich eine Gesamte Produktionsmenge von

[1] Funktionelle Input-Output-Tabellen orientieren sich an Gütergruppen und sind abzugrenzen von institutionellen Input-Output-Tabellen, die an Produktionsorganisationen ausgerichtet sind.




Abkürzungen:
PB = Primärer Bereich = Land- und Forstwirtschaft, Fischerei
SB = Sekundärer Bereich = Produzierendes Gewerbe
TB = Tertiärer Bereich = Private und öffentliche Dienstleistungen

Abbildung 4.2.: Schematische Darstellung einer Input-Output-Tabelle. Quelle: Kuhn, 2010, S. 6

$$X = Y + AY + A^2Y + A^3Y + ... = (1 + A + A^2 + A^3 + ...)Y \tag{4.1}$$

Wird berücksichtigt, dass dieser Ausdruck der Neumann-Reihe entspricht und die Leontief-Inverse als $L = (I - A)^{-1}$ definiert ist, so ergibt sich

$$X = (I - A)^{-1}Y = LY \tag{4.2}$$

### 4.2.2. System Dynamics

System Dynamics (SD) oder Systemdynamik ist eine Methode zur Analyse und Simulation von komplexen und dynamischen Systemen. Sie wurde in den 1950er Jahren von Forrester (1961, 1969) entwickelt. SD baut auf den folgenden Elementen auf: Bestandsgrößen (charakterisieren den aktuellen Zustand des Systems), Flussgrößen (verändern die Bestandsgrößen), kausale Feedbackbeziehungen (Informationen über den aktuellen Zustand des Systems fließen wieder in das System ein), Wirkungsverzögerungen und Nichtlinearitäten.

Einen umfassenden Einblick in Systemdynamik geben Sterman (2000) oder Bossel (2004a), eine Vielzahl an Anwendungsbeispielen liefert Bossel (2004b), als sehr bekanntes Anwendungsbeispiel ist „Limits to Growth“ (Meadows, 1972; Meadows, Randers & Meadows, 2006) zu nennen. Rothengatter und Schaffer (2006) zeigen auf, wie System Dynamics für die Untersuchung langfristiger ökonomischer Entwicklung unter Berücksichtigung der wichtigen Rückkopplung im wirtschaftlichen System eingesetzt werden kann.

## 4.3. Formelle Beschreibung des Modells

Die folgenden Abschnitten enthalten eine formelle Darstellung der wichtigsten Mechanismen zur Berechnung von Endnachfrage, Wertschöpfung und Beschäftigung.

Zuvor noch einige Anmerkungen zur Notation: Sofern nicht anders angegeben, haben die Vektoren und Matrizen, die wirtschaftliche Variablen im Modell beschreiben, immer 72 bzw. 72x72 Einträge. Die Notation folgt den Konventionen der Matrixalgebra, wobei Matrizen als fette Großbuchstaben, Vektoren als fette Kleinbuchstaben und Elemente als einfache Kleinbuchstaben mit Indizes bezeichnet werden. Die Indizes i und j werden verwendet, um Wirtschaftsbereiche entlang von Zeilen (Gütergruppen) bzw. Spalten (Produktionsbereiche) zu bezeichnen. Kleinbuchstaben ohne Index bezeichnen die Aggregation aller Wirtschaftsbereiche ($\boldsymbol{c}$ gibt z.B. den Konsumvektor an, $c_i$ ein Element dieses Vektors und $c$ das Konsumniveau). Zur besseren Lesbarkeit wird der Zeitindex t meist weggelas-

Tabelle 4.1.: Zusammenfassung der Variablen des Modells ISI-Macro

| Variable | Erläuterung |
|---|---|
| $i$ | Gütergruppe (Zeilen) |
| $j$ | Produktionsbereich (Spalten) |
| $t$ | Zeitindex |
| $\boldsymbol{y}$ | Endnachfrage |
| $\boldsymbol{c}$ | Privater Konsum |
| $\boldsymbol{b}$ | Investitionen |
| $\boldsymbol{g}$ | Staatskonsum |
| $\boldsymbol{m}$ | Exporte |
| $bp$ | Herstellungspreis |
| $y^h$ | Haushaltseinkommen |
| $s$ | Sparrate |
| $\delta$ | Umwandlungsfaktor von Anschaffungs- zu Herstellungspreisen (Konsum) |
| $\boldsymbol{\sigma}$ | Verteilung auf Gütergruppen |
| inl | inländisch |
| imp | importiert |
| $\boldsymbol{\phi}$ | Anteil heimischer Produktion |
| endog | endogen |
| bu | bottom-up |
| $\theta$ | Anteil der Investitionen an der Wertschöpfung |
| $v$ | Wertschöpfung |
| $\beta$ | Crowding-out-Faktor |
| $\gamma$ | Anteil des Staatskonsums an der Wertschöpfung |
| $n$ | Index des importierenden Landes |
| $N$ | Gesamtzahl importierender Länder |
| GDP | Bruttoinlandsprodukt |
| $\mu_n$ | Anteil der deutschen Exporte, die von Land n importiert werden |
| $\mathbf{x}$ | Produktionswert |
| $\mathbf{I}$ | Einheitsmatrix |
| $\mathbf{A}$ | inländische technische Koeffizientenmatrix |
| $\mathbf{Z}$ | inländische Vorleistungsmatrix |
| $\boldsymbol{w}$ | Arbeitnehmerentgelte |
| $\boldsymbol{p}$ | Nettobetriebsüberschüsse |
| $\boldsymbol{k}$ | Abschreibungen |
| $\boldsymbol{o}$ | Sonstige Produktionsabgaben abzüglich Subventionen |
| $\boldsymbol{\tau}$ | Anteil der Gütersteuern abzüglich Gütersubventionen am Produktionswert |
| $\boldsymbol{\rho}$ | Anteil sonstiger Produktionsabgaben abzüglich Subventionen am Produktionswert |
| $\boldsymbol{v^t}$ | Bruttowertschöpfung abzüglich Steuern |
| $\boldsymbol{\mu^w}$ | Anteil der Arbeitnehmerentgelte an der Bruttowertschöpfung abzüglich Steuern |
| $\boldsymbol{\mu^p}$ | Anteil der Nettobetriebsüberschüsse an der Bruttowertschöpfung abzüglich Steuern |
| $\boldsymbol{\mu^k}$ | Anteil der Abschreibungen an der Bruttowertschöpfung abzüglich Steuern |
| $w^h$ | Arbeitseinkünfte |
| $p^h$ | Vermögenseinkünfte |
| $r$ | Transferzahlungen |
| $u^y$ | Einkommenssteuern |
| $\boldsymbol{l}$ | Arbeitskräftebedarf |
| $\boldsymbol{\iota}$ | Arbeitsproduktivität |
| $\boldsymbol{q}$ | Importe |
| $\psi$ | Umwandlungsfaktor von Herstellungs- zu Anschaffungspreisen (Endnachfrage) |

sen, es sei denn, es ist wichtig, eine Unterscheidung zwischen verschiedenen Zeiträumen vorzunehmen. Wenn nicht anders vermerkt, werden die Variablen in monetären Einheiten angegeben, und zwar analog zur deutschen Input-Output-Rechnung in (inflationsbereinigten) Herstellerpreisen. Die Variablen werden jeweils eingeführt und sind zur Erhöhung der Übersicht zusätzlich in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

## 4.4. Endnachfrage

Die Endnachfrage $\boldsymbol{y}$ wird unterteilt in die Elemente Konsum $\boldsymbol{c}$, Investitionen $\boldsymbol{b}$, Staatskonsum $\boldsymbol{g}$ und Exporte $\boldsymbol{m}$. Bei der Deckung der Endnachfrage wird unterschieden zwischen inländischer Produktion (inl) und Importen (imp).

$$\begin{aligned} \boldsymbol{y}^{\text{inl}} &= \boldsymbol{c}^{\text{inl}} + \boldsymbol{b}^{\text{inl}} + \boldsymbol{g}^{\text{inl}} + \boldsymbol{m} \\ \boldsymbol{y}^{\text{imp}} &= \boldsymbol{c}^{\text{imp}} + \boldsymbol{b}^{\text{imp}} + \boldsymbol{g}^{\text{imp}} \end{aligned} \tag{4.3}$$

Die einzelnen Endnachfrageelemente werden in Herstellungspreisen und für jeweils 72 Gütergruppen in eigenen Modulen berechnet. Im Folgenden werden die wichtigsten funktionalen Zusammenhänge für die einzelnen Endnachfrageelemente dargestellt.

### 4.4.1. Privater Konsum

Der private Konsum je Gütergruppe hängt vom verfügbaren Einkommen der Haushalte und einer Verteilung auf die Gütergruppen ab:

$$c_i^{\text{bp}} = (y^h - sy^h) \cdot \delta \cdot \sigma_i^c \tag{4.4}$$

mit:
- $c_i^{\text{bp}}$ = Privater Konsum in Herstellerpreisen je Gütergruppe $i$
- $y^h$ = Haushaltseinkommen
- $s$ = Sparrate
- $\delta$ = Umwandlungsfaktor von Anschaffungspreisen zu Herstellerpreisen
- $\sigma_i^c$ = Verteilung des Konsums auf Gütergruppen

Die konstante Verteilung auf Gütergruppen impliziert eine Einkommenselastizität der Nachfrage von 1 für alle Gütergruppen. Dies scheint eine sinnvolle generelle Annahme zu sein, da "Einkommenselastizitäten der Nachfrage um 1 verteilt sind" (Varian, 2014, S. 315), das heißt die meisten Gütern kommen normalen Gütern recht nahe. Die Elastizi-

täten einzelner Güter einer Gütergruppe können sich unterscheiden. Zum Beispiel enthält die Gütergruppe Nahrungsmittel sowohl inferiore Güter, notwendige Güter und Luxusgüter (Einkommenselastizität der Nachfrage entsprechend negativ, positiv <1 und positiv > 1). Da im Modell jedoch keine einzelnen Güter sondern lediglich Gütergruppen abgebildet sind, ist dieses Modell der Elastizitäten wenig hilfreich. Darüber hinaus ist eine Zeitreihenanalyse der Einkommenselastizitäten der Nachfrage auf Gütergruppenebene problematisch, da es nicht möglich ist, zwischen Preis- und Mengenschwankungen zu unterscheiden (Pfaff, 2019). Zudem sind Preisentwicklungen im Gegensatz zu allgemeinen Gleichgewichtsmodellen nicht endogen modelliert, sodass eine entsprechende vereinfachende Annahme sinnvoll sein könnte. Es ist zu beachten, dass neben Preiseffekten auch soziokulturelle Entwicklungen und technologischer Wandel zu Veränderungen im Konsumverhalten führen können. Für die Anwendungsfälle des Modells können solche Änderungen als Bottom-up-Impulse umgesetzt werden. Der Anteil heimischer Produktion und Importe am Konsum je Gütergruppe wird mittels eines konstanten Faktors $\phi^c$ berechnet:

$$c_i^{\text{bp,inl}} = c_i^{\text{bp}} \cdot \phi_i^c \tag{4.5}$$

$$c_i^{\text{bp,imp}} = c_i^{\text{bp}} \cdot (1 - \phi_i^c) \tag{4.6}$$

Die Konstanz dieses Faktors könnte zu einer leichten Verzerrung der Inlandsproduktion führen, da der internationale Handel in der Vergangenheit in einigen Gütergruppen an Bedeutung gewonnen hat (Destatis, 2018). Andererseits ist unklar, wie lange dieser Trend noch anhält. Hinzu kommt, dass er für andere Gütergruppen und auch für den aggregierten Konsum nicht (mehr) beobachtet werden kann. Diese Einschränkungen gelten auch für Investitionen und den Staatskonsum.

#### Integration von Bottom-up-Impulsen

Das Konsumniveau wird durch die Bottom-up-Impulse nicht direkt, sondern nur durch induzierte Effekte beeinflusst. Die Bottom-up-Impulse wirken sich jedoch auf die Konsumstruktur aus. Hierbei sind zwei Wirkungsweisen zu unterscheiden: entweder sie ersetzen oder sie ergänzen den endogen ermittelten Konsum einer Gütergruppe (4.9). Der endogen ermittelte Konsum einer Gütergruppe (4.8) wird als fester Anteil $\sigma_i^{\text{c,endog}}$ des verfügbaren Einkommens, das nach Abzug des bottom-up bestimmten Konsums verbleibt, berechnet (4.7). Die Aufteilung des Konsums je Gütergruppe auf inländische Produktion und Importe bleibt, sofern nicht anders definiert, von den Bottom-up-Impulsen unberührt.

$$c^{\text{endog}} = c - c^{\text{bu}} \tag{4.7}$$

$$c_i^{\text{endog}} = \sigma_i^{\text{c,endog}} c^{\text{endog}} \tag{4.8}$$

$$c_i = \begin{cases} c_i^{\text{bu}} & \text{Bottom-up-Impulse ersetzen endogen Konsum} \\ c_i^{\text{endog}} + c_i^{\text{bu}} & \text{Bottom-up-Impulse ergänzen endogen Konsum} \end{cases} \tag{4.9}$$

Die vereinfachende Annahme einer festen Verteilung des verfügbaren Einkommens auf Gütergruppen für die grundsätzliche Modellstruktur gilt somit nicht mehr bei der Integration von Bottom-up-Impulsen. Im vorliegenden Anwendungsfall bauen die Energiemodelle zwar auf dem gleichen sozioökonomischen Rahmen (Bevölkerungsentwicklung, Wirtschaftswachstum, Energiepreise) wie ISI-Macro auf, darüber hinaus beziehen sie jedoch detaillierte Informationen aus dem entsprechenden Energiesektor mit ein. So wird beispielsweise der Stromverbrauch der Haushalte unter Berücksichtigung der Struktur des Stromverbrauchs, des Einflusses des demografischen und technologischen Wandels auf das Verbrauchsverhalten, der Einkommenselastizität und der Preiselastizität der Stromnachfrage bestimmt. Dies gilt natürlich auch für die Kombination von ISI-Macro mit Bottom-up-Modellen, die andere Bereiche abdecken.

Die Impulse für den vorliegenden Anwendungsfall sind in Kapitel 3 ausführlich beschrieben. Die Energie- und Verkehrsausgaben ersetzen den Konsum in den zugeteilten Gütergruppen. Die Ausgaben der privaten Haushalte für Fahrzeuge, Mieten und energieeffiziente Technologien, die im Energiewendeszenario im Vergleich zur Referenz zusätzlich anfallen, ergänzen hingegen lediglich den endogenen Konsum in den weiteren Gütergruppen. In Kapitel 3 ist das durch die jeweilige Bezeichnung der entsprechenden Abschnitte (zusätzlicher Konsum versus Konsum) bereits kenntlich gemacht.

### 4.4.2. Investitionen

Die Investitionen sind als fester Anteil $\theta$ an der aggregierten Wertschöpfung $v$ modelliert:

$$b = \theta \cdot v \tag{4.10}$$

$$v = \sum_{i=1}^{72} v_i \tag{4.11}$$

Die Investitionen pro Gütergruppe ergeben sich durch die Multiplikation mit dem Investitionssplit $\boldsymbol{\sigma}^b$, einem Vektor, der den jeweiligen Anteil einer Gütergruppe an den Investi-

tionen angibt, und der basierend auf einer Zeitreihe von Input-Output-Tabellen bis 2012 berechnet wurde und danach fix gehalten wird:

$$b_i = \sigma_i^b \cdot b \tag{4.12}$$

Die Top-down-Verteilung mit einem festen Split ist eine starke, aber notwendige Vereinfachung. Investitionsverflechtungstabellen zeigen auf, welche Investitionsgüter von den einzelnen Produktionsbereichen nachgefragt werden. Für Deutschland ist eine solche Tabelle jedoch nicht verfügbar, sodass eine Verknüpfung von sektoraler Produktion und Investitionen nicht möglich ist.

In einem weiteren Schritt werden die Investitionen aufgeteilt in Investitionen pro Gütergruppe aus inländischer Produktion (4.13) und Investitionen pro Gütergruppe aus Importen (4.14). Der Inlandsanteil $\boldsymbol{\phi}^b$ wurde basierend auf den harmonisierten Input-Output-Tabellen bis 2012 berechnet und dann konstant gehalten:

$$b_i^{\text{inl}} = b_i \cdot \phi_i^b \tag{4.13}$$

$$b_i^{\text{imp}} = b_i \cdot (1 - \phi_i^b) \tag{4.14}$$

#### Integration von Bottom-up-Impulsen

Das Investitionsniveau besteht bei Hinzunahme der Bottom-up-Impulse aus einem Teil, der sich wie oben beschrieben proportional zur aggregierten Wertschöpfung entwickelt und durch induzierte Effekte beeinflusst wird, und einem Teil, der direkt durch die Bottom-up-Impulse bestimmt wird, wobei dieser für die Berücksichtigung von Crowding-Out-Effekten um den Anteil $\beta$ reduziert werden kann (4.15). Für die Verteilung der endogen bestimmten Investitionen wird der oben beschriebene Split $\boldsymbol{\sigma}^b$ genutzt. Da die Verteilung der Bottom-up-Investitionen auf Gütergruppen von diesem Split abweicht, beeinflussen die Bottom-up-Impulse somit sowohl das Investitionsniveau als auch die Investitionsstruktur (4.16). Für die Zuordnung der Bottom-up-Investitionen auf Gütergruppen sei auf Kapitel 3 verwiesen.

$$b = \theta \cdot v + (1 - \beta) \cdot b^{\text{bu}} \tag{4.15}$$

$$b_i = \sigma_i^b \cdot (b - b^{\text{bu}}) + b_i^{\text{bu}} \tag{4.16}$$

Wenn durch die Bottom-up-Investitionen keine anderen Investitionen verdrängt werden (Crowding-out-Faktor $\beta = 0$), erhöht sich die Nachfrage in den betroffenen Investitionsgütergruppen und auch das Investitionsniveau insgesamt. Diese eher extreme Annahme steht im Gegensatz zu anderen Modellierungsansätzen wie CGE-Modellen, die von einer vollständigen Verdrängung ausgehen. Pollitt und Mercure (2018) und Lewney et al. (2017) unterstützen diese Annahme und zeigen, dass die Geldmenge nicht unbedingt limitiert ist, sondern von der Rentabilität der Investition abhängt. Trotz der Kosten für die Kreditrückzahlung müssen die langfristigen Auswirkungen nicht negativ sein, da höhere Produktionsraten weitere ökonomische Aktivitäten anregen können. In ISI-Macro ist es möglich, als alternativen Ansatz komplettes Crowding-out zu wählen ($\beta = 1$). In diesem Fall werden die Bottom-up-Investitionen vom endogen berechneten Investitionsvolumen abgezogen und der verbleibende Betrag auf die Gütergruppen verteilt. Da unklar ist, welche Investitionsgüter aufgrund der Verdrängung durch die Bottom-up-Investitionen weniger nachgefragt werden, scheint die Verwendung des gleichen Splits wie im Basislauf des Modells eine sinnvoll Annäherung zu sein. In diesem Fall dominiert die sektorale Struktur der Investitionen und weniger das Investionsniveau die Ergebnisse.

Wenn die Bottom-up-Investitionen nicht bereits eindeutig inländischer Produktion oder Importen zugeordnet sind, werden für sie ebenso wie für die endogenen Investitionen die oben beschriebenen Anteile $\boldsymbol{\chi}$ benutzt.

In Kapitel 3 sind die Investitionsimpulse des vorliegenden Anwendungsfall inklusive ihrer Zuweisung zu Gütergruppen und regionalen Kategorien ausführlich beschrieben. Alle Energiewende bedingten Investitionen werden als zusätzliche Investitionen behandelt, die das Investitionsniveau gegenüber dem Referenzfall erhöhen ($\beta = 0$). Dies setzt, wie oben beschrieben, die Rentabilität dieser Investitionen voraus. Bei den Energieeffizienzmaßnahmen handelt es sich um so genannte no-regret-Maßnahmen, da sich die zusätzlichen Investitionen durch Wertsteigerung und eingesparte Energiekosten über die Lebensdauer des Gebäudes bzw. Geräts amortisieren. Die Investitionen in Energieerzeugungsanlagen werden durch eine entsprechende Vergütung des Stroms gegenfinanziert. Der unterschiedliche politische Rahmen zwischen Energiewende- und Referenzszenario führt dazu, dass lediglich im Energiewendeszenario Hemmnisse abgebaut und die entsprechenden zusätzlichen Investitionen getätigt werden (vgl. auch Abschnitte 1.3 und 1.4).

### 4.4.3. Staatskonsum

Die Ausgaben für Staatskonsum entsprechen einem festen Anteil $\gamma$ an der aggregierten Wertschöpfung und werden durch Multiplikation mit Faktor $\boldsymbol{\sigma}^g$ auf die Gütergruppen verteilt. Der Anteil inländischer Produktion ist durch $\boldsymbol{\phi}^g$ gegeben.

$$g = \gamma \cdot v \tag{4.17}$$

$$g_i = \sigma_i^g \cdot g \tag{4.18}$$

$$g_i^{\text{inl}} = g_i \cdot \phi_i^g \tag{4.19}$$

$$g_i^{\text{imp}} = g_i \cdot (1 - \phi_i^g) \tag{4.20}$$

#### Integration von Bottom-up-Impulsen

Bottom-up-Impulse ändern die sektorale Struktur des Staatskonsums, nicht jedoch das Niveau. Letzteres wird lediglich durch induzierte Effekte beeinflusst, da es sich proportional zu aggregierten Wertschöpfung entwickelt.

$$g^{endog} = g - g^{bu} \tag{4.21}$$

$$g_i = \sigma_i^g \cdot g^{endog} + g_i^{bu} \tag{4.22}$$

Im vorliegenden Anwendungsfall gibt es keine Bottom-up-Impulse für den Staatskonsum.

### 4.4.4. Exporte

Exporte $m$ sind exogen. Bis 2012 werden sie den deutschen Input-Output-Tabellen entnommen. Die weitere Entwicklung basiert auf dem Wirtschaftswachstum der wichtigsten Importeure von deutschen Gütern, wie den OECD-Ländern und China (OECD, 2014). In der folgenden Gleichung bezeichnet $\mu_n$ den Anteil deutscher Exporte, der von Land $n$ importiert wird:

$$\frac{m_t}{m_{t-\Delta t}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} \mu_n \frac{\text{GDP}_t^n}{\text{GDP}_{t-\Delta t}^n} \tag{4.23}$$

Dieser Ansatz impliziert, dass die Importanteile dieser Länder ebenso wie Deutschlands Anteil an diesen Importen unverändert bleiben. Dies ist eine recht starke Annahme, da weder die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands noch die möglicherweise sinkende Importabhängigkeit von Ländern wie China berücksichtigt werden. Die aggregierten Exporte werden mit einem festen Faktor $\sigma^m$ auf die Gütergruppen verteilt.

$$m_i = \sigma_i^m \cdot m \tag{4.24}$$

### Integration von Bottom-up-Impulsen

Da die Entwicklung der Exporte ausschließlich von exogenen Faktoren abhängt, sind sie nicht von den Impulsen betroffen und unterscheiden sich zwischen den Szenarien nicht. Grundsätzlich ist eine Variation jedoch möglich.

Ein Argument für ein niedrigeres Exportniveau unter einem Energiewendeszenario im Vergleich zur Referenz wäre eine verringerte internationale Wettbewerbsfähigkeit aufgrund höherer Strompreise, die nicht in allen Produktionsbereichen vollständig durch Effizienzgewinne kompensiert werden. Dies wird jedoch nicht berücksichtigt, da die zu erwartenden Effekte klein sind (Grave et al., 2015). Im Energiewendeszenario sind die Strominputkoeffizienten der Dienstleistungsbereiche um bis zu 3% niedriger, die der meisten Industriezweige um bis zu 2% höher. Nur für drei Produktionsbereiche (Papier, chemische Erzeugnisse und Eisenmetalle) ist der Strominputkoeffizient bis zu 8% höher. Um die Stromausgaben dieser Produktionsbereiche zu berechnen, wurden sie basierend auf Grave et al. (2015) in energieintensiv und nicht-energieintensiv unterteilt und die entsprechenden Strompreise angewendet; die energieintensive Industrie profitiert in beiden Szenarien weiterhin von der Befreiung der EEG-Umlage. Input-Output-Tabellen stellen immer einen Durchschnitt von vielen Unternehmen dar, und es wird sicherlich Unternehmen geben, die stärker betroffen sind, während andere weniger stark betroffen sind. In diesem Detailgrad kann dies jedoch mit dem vorliegenden Modell nicht abgebildet werden.

Folgendes Argument spräche hingegen für zusätzliche Exporte unter einem Energiewendeszenario im Vergleich zur Referenz: Deutschland nimmt eine Vorreiterrolle im Bereich der Energieeffizienz und Erneuerbarer Energien ein, es erfüllt die Kriterien eines Lead Market für diese Technologien, also eines Markts, von dem aus sich das Design einer Innovation global verbreitet (siehe auch Abschnitt 1.3). Während andere Studien dieses Argument aufgreifen und eine positive Wirkung der Energiewende auf die Exporte von Technologien zur erneuerbaren Energieerzeugung (Duscha et al., 2016; Lehr et al., 2012; Walz & Ragwitz, 2011) oder zur Erhöhung der Energieeffizienz (Pfaff & Walz, 2017) unterstellen, wird dies in der vorliegenden Studie (analog zur oben beschriebenen möglicherweise verringerten internationalen Wettbewerbsfähigkeit in energieintensiven Branchen) nicht berücksichtigt.

## 4.5. Input-Output

### 4.5.1. Sekundäre Inputs

Wie bei den methodischen Grundlagen etwas ausführlicher erläutert, führt im Mengenmodell eine Änderung der Endnachfrage zu einer Änderung der Produktion unter Berücksichtigung der intermediären Verflechtung:

$$\boldsymbol{x} = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{y} \tag{4.25}$$

wobei $\boldsymbol{x}$ den Produktionswert, $\boldsymbol{y}$ die Endnachfrage, $(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{A})^{-1}$ die Leontief-Inverse und $\boldsymbol{A}$ die (inländische) technische Koeffizienten Matrix bezeichnen. Letztere wird wie folgt berechnet:

$$\boldsymbol{A}_t = \frac{\boldsymbol{Z}_t}{\hat{\boldsymbol{x}}_t} \tag{4.26}$$

wobei $\boldsymbol{Z}$ die inländische Vorleistungsmatrix bezeichnet und das Zeichen auf dem $\boldsymbol{x}$ für Diagonalisierung steht. Für den Zeitraum zwischen 1995 und 2012 basiert die inländische Vorleistungsmatrix auf historischen Werten. Ab 2013 wird sie endogen im Modell berechnet.:

$$\boldsymbol{Z}_t = \boldsymbol{Z}_{t-\Delta t} + \left.\frac{d\boldsymbol{Z}}{dt}\right|_{t-\Delta t} \Delta t \tag{4.27}$$

$$\left.\frac{d\boldsymbol{Z}}{dt}\right|_t = \boldsymbol{A}_t \left.\frac{d\hat{\boldsymbol{x}}}{dt}\right|_t \tag{4.28}$$

Für jeden Zeitschritt wird die technische Koeffizientenmatrix aus der Vorleistungsmatrix berechnet (4.26). Die Input-Output-Logik impliziert jedoch, dass $\boldsymbol{A}$ nach 2012 konstant bleibt, solange keine exogenen Änderungen an $\boldsymbol{Z}$ vorgenommen werden. Aus diesem Grund ändert sich die Produktionsstruktur im Basislauf des Modells nicht. Dies ist eine limitierende Annahme. Es ist jedoch schwierig, Vorhersagen über mittel- bis langfristige Änderungen der Inputkoeffizienten zu treffen, da technologische Entwicklungen oft in Form von Schocks stattfinden. Darüber hinaus können technologische Entwicklungen in Mengenmodellen nicht getrennt von wirtschaftlichen Entwicklungen, wie z.B. Preisänderungen, dargestellt werden, die diesen technologischen Entwicklungen theoretisch entgegenwirken können. Wie ein Blick auf Zeitreihen von Input-Output-Tabellen zeigt, scheint auf dieser

Aggregationsebene der Strukturwandel nicht in erster Linie zwischen den Produktionsbereichen, sondern innerhalb dieser zu erfolgen. So können zwar viele neue Technologien entstehen, aber dies kommt nicht durch Veränderungen in der Beziehung zwischen den Produktionsbereichen zum Ausdruck, sondern in den internen Strukturen der Produktionsbereiche, die durch die diagonalen Elemente der Vorleistungsmatrix repräsentiert werden. Pfaff (2019) zeigt für jährliche Daten zwischen 1995 und 2007, dass die relative Varianz fast aller Inputkoeffizienten unter 5% lag.

Die Inputkoeffizientenmatrix $\boldsymbol{A}^{\text{imp}}$ beschreibt den Input an importierten Vorleistungen von Gütergruppe $i$ je Output des Produktionsbereichs $j$. Analog zur heimischen Vorleistungsmatrix basiert sie auf historischen Daten bis 2012 und wird danach konstant gehalten. Durch Multiplikation mit dem Produktionswert eines Wirtschaftsbereiches können die importierten Vorleistungen aus Gütergruppe $i$, die an Produktionsbereich $j$ fließen, berechnet werden:

$$\boldsymbol{Z}^{\text{imp}} = \boldsymbol{A}^{\text{imp}}\hat{\boldsymbol{x}} \tag{4.29}$$

Die Zeilensumme der Matrix der importierten Vorleistungen $\boldsymbol{Z}_{imp}$ umfasst alle importierten Vorleistungen einer Gütergruppe, die dann im Handelsmodul zur Berechnung der gesamten Importe genutzt werden. Die Spaltensumme gibt den monetären Wert der importierten Vorleistungen wieder, die an einen Produktionsbereich fließen. Dieser Wert wird für die Berechnung der Wertschöpfung weiterverwendet. Wie bereits für die Komponenten der Endnachfrage diskutiert, könnten die festen Importanteile zu einer Überschätzung der inländischen Produktion führen, da in der Vergangenheit die Importanteile der Sekundärinputs in einigen Produktionsbereichen sowie auch aggregiert über alle Produktionsbereiche tendenziell zunahmen (Destatis, 2018).

#### Integration von Bottom-up-Impulsen

Die direkte Änderung einzelner inländischer Vorleistungslieferungen durch Bottom-up-Impulse $z_{ij}^{\text{bu}}$ ist möglich. Die Bottom-up-Impulse beziehen sich hierbei auf die Veränderung im Vergleich zum letzten Zeitschritt. Einfache Addition mit der endogen modellierten Vorleistungsmatrix würde jedoch zu einer unausgeglichenen Input-Output-Tabelle führen. Aus diesem Grund werden die Änderungen zunächst auf folgende Weise zu $\boldsymbol{Z}^{\dagger}$ transformiert[2]:

[2]Eine im Kontext der Input-Output-Rechnung häufig angewendete Technik zum Ausgleich von Matrizen ist das biproportionale iterative RAS Verfahren (Bacharach, 1965; Stone & Brown, 1962). Es wird hauptsächlich zur Inter- oder Extrapolation bestehender Input-Output-Tabellen verwendet und nutzt die ursprüngliche Z- oder A-Matrix und zusätzliche Informationen über gelieferte und bezogene Vorleistungen

Die Änderungen einzelner Elemente der Vorleistungsmatrix $z_{ij}^{\text{bu}}$ werden durch Bilden der Zeilensumme zu einem Vektor der Änderung der von den einzelnen Gütergruppen gelieferten Vorleistungen:

$$\boldsymbol{z}^{\text{bu}} = \sum_{j=1}^{n} z_{ij}^{\text{bu}} \tag{4.30}$$

Die veränderte Nachfrage nach Vorleistungen wird analog zu einer Endnachfrageänderung benutzt, um die Veränderung des Produktionswerts $\boldsymbol{x}^{\text{bu}}$ zu berechnen[3]:

$$\boldsymbol{x}^{\text{bu}} = \boldsymbol{L}\boldsymbol{z}^{\text{bu}} \tag{4.31}$$

Die Multiplikation des Produktionswerts mit der ursprünglichen Inputkoeffizientenmatrix $\boldsymbol{A}$ liefert die induzierten Änderungen der Vorleistungsmatrix. Die Addition mit der initialen Änderung führt zu einer ausgeglichenen Tabelle:

$$\boldsymbol{Z}^{\dagger} = z_{ij}^{\text{bu}} + \boldsymbol{A}\hat{\boldsymbol{x}}^{\text{bu}} \tag{4.32}$$

Gleichung 4.28 wird dann wie folgt substituiert:

$$\boldsymbol{Z}_t = \boldsymbol{Z}_{t-\Delta t} + \boldsymbol{A}_{t-\Delta t} \left.\frac{d\hat{\boldsymbol{x}}}{dt}\right|_{t-\Delta t} \Delta t + \left.\frac{d\boldsymbol{Z}^{\dagger}}{dt}\right|_{t-\Delta t} \Delta t \tag{4.33}$$

Diese Vorleistungsmatrix wird dann wie in Gleichung 4.26 beschrieben benutzt um die Inputkoeffizientenmatrix zu berechnen.

Diese Methode enthält die Annahme, dass Vorleistungsänderungen $z_{ij}^{\text{bu}}$ nur die Inputstruktur des Bereichs $j$ betreffen, für den sich die relativen Anteile von sekundären Inputs ($a_{ij}$) und primären Inputs ($v_{ij}$) am Output verändern. Der induzierte Effekt führt zwar zu einer Anpassung der Produktionsmengen aller Wirtschaftsbereiche, die Inputstruktur der nicht direkt durch die Änderungen betroffenen Produktionsbereiche bleibt jedoch un-

und den Produktionswert. Als rein mathematisches Verfahren wird es jedoch aus ökonomischer Perspektive kritisch gesehen (Miller & Blair, 2009). Zudem ist die Implementierung solcher iterativer Verfahren in ein dynamisches Modell mit diskreten Zeitschritten schwierig.

[3]Dieses Verfahren wird auch als „Final Demand Approach“ (deutsch: Endnachfrageansatz) zur Integration neuer Technologien in die Input-Output-Tabelle benutzt (Miller & Blair, 2009; Sievers et al., 2017)

verändert. Eine Weitergabe von Gewinnen oder Verlusten, die sich durch die veränderte Vorleistungsstruktur ergeben, und die dann zu geänderten Inputstrukturen in allen Bereichen führen würde, findet nicht statt.

Im Gegensatz zu den inländischen Vorleistungen ist die Matrix der importierten Vorleistungen nicht durch Bestand und Änderungsraten abgebildet, sondern wird wie in Gleichung 4.29 beschrieben aus der Inputkoeffizientenmatrix (konstant ab 2012) und dem Produktionswert berechnet. Entsprechend beziehen sich Änderungen immer auf das Jahr 2012, berücksichtigen jedoch Änderungen, die sich rein durch eine Abweichung des Produktionswerts ergeben, nicht (vgl. Kapitel 3). Gleichung 4.29 ändert sich durch die Integration der Bottom-up-Impulse wie folgt:

$$\boldsymbol{Z}^{\text{imp}} = \boldsymbol{A}^{\text{imp}}\hat{\boldsymbol{x}} + \boldsymbol{Z}^{\text{imp, bu}} \tag{4.34}$$

Die Implementierung der Szenarien im vorliegenden Anwendungsfall umfasst folgende Bottom-up-Impulse, die im Kapitel 3 detailliert beschrieben werden:

- Vorleistungsstruktur des Produktionsbereichs Elektrizitätsversorgung
- Veränderte Nachfrage nach Dienstleistungen der Elektrizitätsversorgung durch alle Produktionsbereiche aufgrund von Effizienz und Preisveränderungen
- Veränderte Nachfrage nach den Energieträgern Kohle, Öl, Gas und Biomasse durch alle Produktionsbereiche aufgrund von Effizienz und Preisveränderungen
- Veränderte Vorleistungsstruktur des Grundstücks- und Wohnungswesens[4]

### 4.5.2. Primäre Inputs

Die primären Inputs werden im Modell analog zur deutschen Input-Output-Tabelle differenziert:

- Arbeitnehmerentgelte $\boldsymbol{w}$
- Nettobetriebsüberschüsse $\boldsymbol{p}$
- Abschreibungen $\boldsymbol{k}$
- Sonstige Produktionsabgaben abzüglich Subventionen $\boldsymbol{o}$

[4] Zusätzlicher Konsum von Dienstleistungen des Grundstücks- und Wohnungswesens aufgrund von Umlage der Energieeffizienzinvestitionen auf die Miete soll nicht zu einer Erhöhung der Vorleistungen dieses Bereichs führen, was ohne Anpassung der Gleichung der Fall wäre.

Das formale Vorgehen ist wie folgt: Vom Produktionswert eines Produktionsbereichs werden die bezogenen heimischen und importierten Vorleistungen und die auf die darauf entfallenden Steuern abzüglich Subventionen (berechnet als fester Anteil $\tau$ am Produktionswert) abgezogen. Das Ergebnis entspricht der Summe der Primärinputs bzw. der Bruttowertschöpfung $v$ dieses Produktionsbereichs.

$$v_j = x_j - \left( \sum_{i=1}^{72} z_{i,j} + \sum_{i=1}^{72} z_{i,j}^{\text{imp}} + \tau_j x_j \right) \tag{4.35}$$

Die Wertschöpfungskomponente „Sonstige Produktionsabgaben abzüglich Subventionen“ $o_j$ wird als fester Anteil $\rho$ am Produktionswert berechnet ($\rho$ basiert auf historischen Daten bis 2012 und wird danach konstant gehalten).

$$o_j = \rho_j x_j \tag{4.36}$$

$$v_j^o = v_j - o_j \tag{4.37}$$

Nach Abzug dieser Wertschöpfungskomponente wird die verbleibende Wertschöpfung $v_j^o$ auf die anderen drei Komponenten verteilt. Die entsprechenden Anteile $\mu^w$, $\mu^p$, $\mu^k$ basieren auf historischen Daten bis 2012 und werden danach konstant gehalten.

$$w_j = \mu_j^w x_j \tag{4.38}$$

$$p_j = \mu_j^p x_j \tag{4.39}$$

$$k_j = \mu_j^k x_j \tag{4.40}$$

#### Integration von Bottom-up-Impulsen

Wie aus dem zuvor in Gleichung 4.35 beschriebenen Zusammenhang hervorgeht, bewirkt ein durch Bottom-up-Impulse geänderter Anteil der sekundären Inputs am Produktionswert auch einen veränderten Anteil der primären Inputs.

Dies bedeutet im konkreten Anwendungsfall, dass zum Beispiel höhere Energieausgaben in den betroffenen Bereichen den Wertschöpfungsanteil senken, während Energieeinsparungen den Wertschöpfungsanteil steigern. Im Fall des Grundstücks- und Wohnungswesens sinkt der Anteil der sekundären Inputs am Produktionswert und der Wertschöpfungsanteil steigt. Im Fall der Elektrizitätsversorgung wirkt sich die veränderte Vorleistungsstruktur auch auf die Wertschöpfung aus.

### 4.5.3. Schließung des Modells

Das Modell hat Ähnlichkeit mit einem teilweise geschlossenen Input-Output-Modell. Arbeitnehmerentgelte und Nettobetriebsüberschüsse werden im Konsummodul genutzt, um das verfügbare Einkommen der Haushalte $y^h$ zu berechnen:

$$y^h = w^h + p^h + r - u^y \tag{4.41}$$

wobei $w^h$ Arbeitseinkünfte, $p^h$ Vermögenseinkünfte, $r$ staatliche und andere Transferzahlungen an die Haushalte, und $u^y$ Einkommenssteuern bezeichnen. Arbeitseinkünfte entsprechen den Arbeitnehmerentgelten $w$ abzüglich der Sozialbeiträge der Arbeitgeber, deren Anteil an den Arbeitnehmerentgelten bis 2012 auf historischen Daten basiert und danach konstant gehalten wird. Vermögenseinkünfte werden als Anteil an den aggregierten Nettobetriebsüberschüssen $p$ berechnet. Der Anteil wird auf historischen Daten berechnet und dann konstant gehalten. Die öffentlichen Transferzahlungen an die Haushalte ergeben sich durch die im Bevölkerungsmodul berechnete Anzahl an Zuwendungsempfängern (Kinder, Rentner, Arbeitslosen) und den fortgeschriebenen Sätzen je Empfänger sowie einem unspezifischen Teil, der anteilig an der aggregierten Wertschöpfung berechnet wird. Die nicht-öffentlichen Transferzahlungen ergeben sich aus ihrem Verhältnis zu den öffentlichen Transferzahlungen, das aus historischen Daten berechnet wird. Die verschiedenen Elemente des Haushaltseinkommen werden basierend auf einer Sonderauswertung der Einkommens- und Verbrauchsstichprobe (Destatis, 2014) auf Dezile verteilt. Der Einkommenssteuersatz je Dezil ist ebenfalls dieser Erhebung entnommen. Die Höhe des verfügbaren Einkommens und die personelle Einkommensverteilung hängen somit von der funktionalen Einkommensverteilung ab. Diese wird wiederum durch die Verteilung der Wertschöpfung auf die unterschiedlichen Produktionsbereiche mit ihren spezifischen Verteilung der Wertschöpfung auf die unterschiedlichen Elemente bestimmt.

Wie zuvor beschrieben, hängen entsprechend der ökonomischen Kreislauflogik auch die anderen Endnachfrageelemente Investitionen und öffentlicher Konsum von der Wertschöpfung ab. Im Gegensatz zum privaten Konsum hängen sie jedoch nicht von einzelnen Wertschöpfungselementen, sondern vereinfacht von der aggregierten Wertschöpfung ab.

Die Integration der Bottom-up-Impulse wirkt nicht nur, wie oben beschrieben, durch direkte (Endnachfrage) und indirekte (Input-Output-Modul) Effekte auf die Wertschöpfung, sondern durch die Schließung des Modells auch mittels induzierter Effekte.

## 4.6. Beschäftigung

Im Beschäftigungsmodul wird der Arbeitskräftebedarf je Produktionsbereich $l_j$ ermittelt, genauer die Anzahl an Erwerbstätigen, die für die Produktion eines Produktionsbereichs benötigt werden, gemessen in Vollzeitäquivalenten.

Die Arbeitsproduktivität je Produktionsbereich $\iota_j$ stellt einen wichtigen exogenen Input für das Modell dar. Bis 2012 wurde sie basierend auf folgenden Zeitreihen berechnet:

- Bruttowertschöpfung je Produktionsbereich (Input-Output-Tabellen)
- Erwerbstätige je Produktionsbereich in Personen (Input-Output-Tabellen)
- Durchschnittliche Wochenarbeitszeit je Produktionsbereich in Stunden pro Person (Arbeitskräfteerhebung[5]

Nach 2012 bis zum Jahr 2030 wurde ein jährliches Wachstum unterstellt, das etwas höher liegt als das auf dem OECD Economic Outlook basierende durchschnittliche Wachstum des Bruttoinlandsprodukts. Da das Arbeitskräftepotenzials in Deutschland von derzeit rund 42 Millionen auf dem Arbeitsmarkt aktiven Personen auf knapp 39 Millionen im Jahr 2030 sinkt, ist ein entsprechender Anstieg der Arbeitsproduktivität nötig, um Wirtschaftswachstum zu erreichen. Die Annahme, dass die Produktivität in allen Produktionsbereichen gleichermaßen steigt, stellt dabei eine starke Vereinfachung dar.

Das Reziprok der Arbeitsproduktivität je Produktionsbereich wird als Beschäftigungsintensität eines Produktionsbereichs bezeichnet. Das Produkt aus Bruttowertschöpfung pro Produktionsbereich und Beschäftigungsintensität pro Produktionsbereich ergibt den Arbeitskräftebedarf pro Produktionsbereich. Der Arbeitskräftebedarf in Personen ergibt sich durch Multiplikation mit einem Teilzeitfaktor je Produktionsbereich.

$$l_j = \frac{v_j}{\iota_j} \tag{4.42}$$

Der Begriff Arbeitskräftebedarf wird verwendet, da die Angebotsseite nur quantitativ (Anzahl der verfügbaren Arbeitskräfte) jedoch nicht qualitativ (Qualifikationen, Kosten, etc.) dargestellt ist. In diesem Sinne kann der Begriff Arbeitskräftebedarf auch als der Anpassungsbedarf, den (regionale) Arbeitsmärkte leisten müssen, aufgefasst werden. Im Modell wird eine vollständige Deckung des Bedarfs durch das Angebot unterstellt, was eine starke

[5]Die Arbeitskräfteerhebung erfasst die Zweisteller der Klassifikation der Wirtschaftszweige und ist somit teilweise detaillierter und teilweise weniger detailliert als die Produktionsbereiche der Input-Output-Tabelle (vgl. Tabelle A.2 im Anhang). Für die Weiterverarbeitung der Daten wurde eine entsprechende Zuordnung vorgenommen.

Vereinfachung darstellt. Arbeitslosigkeit ergibt sich durch Subtraktion des Arbeitskräftebedarfs von der Gesamtheit der Erwerbspersonen. Deren Entwicklung basiert auf der mittleren Variante der 13. Bevölkerungsvorausberechung des Statistischen Bundesamts (Destatis, 2015a). Durch die Anpassung der Arbeitsproduktivität an diese Entwicklung wird für den Basislauf des Modells sicher gestellt, dass der Arbeitskräftebedarf die Erwerbspersonen nicht überschreitet. Grundsätzlich kann dieser Fall jedoch bei der Implementierung von Szenarien auftreten, da die Arbeitsproduktivität nicht endogen angepasst wird, sondern (bis auf die in Kapitel 3 genannten Ausnahmen Stromerzeugung und Grundstücks- und Wohnungswesen) dem Basislauf entspricht.

Die Höhe der Arbeitnehmerentgelte pro Produktionsbereich ergibt sich, wie in Abschnitt 4.5.2 beschrieben, durch ihren Anteil an der Wertschöpfung, der unabhängig von der Entwicklung von Beschäftigungsangebot und Nachfrage nach 2012 konstant bleibt. Dies gilt ebenso für die kapitalbezogenen Anteile der Wertschöpfung.

#### Integration von Bottom-up-Impulsen

Die Beschäftigung wird nur in Ausnahmefällen unmittelbar durch die Bottom-up-Impulse verändert. Im vorliegenden Anwendungsfall wird der endogen ermittelte Arbeitskräftebedarf im Grundstücks- und Wohnungswesen um den Wert reduziert, der lediglich auf die höheren Mieten im Energiewendeszenario zurückzuführen ist. Weiterhin wird die Beschäftigung im Bereich Dienstleistungen der Stromversorgung durch den bottom-up ermittelten Wert ersetzt.

Direkte, indirekte und induzierte Effekte der szenarienabhängigen Impulse auf die Wertschöpfung schlagen sich auch im Arbeitskräftebedarf nieder. Wie zuvor beschrieben führen im Modell Änderungen sekundärer Inputs (z.B. Energie) zu entsprechenden Anpassungen der Wertschöpfung. Da die Arbeitsproduktivität unverändert bleibt, wirkt sich das auch auf die Beschäftigung aus. Dieser Effekt könnte überschätzt sein.

## 4.7. Importe

Die Importe je Gütergruppe $q_i$ setzen sich zusammen aus importierten Endnachfrageprodukten und importierten Vorleistungen.

$$q_i = y_i^{\text{imp}} + \sum_{j=1}^{72} Z^{\text{imp}_i} \tag{4.43}$$

#### Integration von Bottom-up-Impulsen

Wie oben beschrieben wirken sich die Bottom-up-Impulse auf importierte Endnachfragegüter sowie importierte Vorleistungen aus. Die direkte und induzierte Veränderung von Endnachfragestruktur und -niveau wirkt sich auch auf die importierten Vorleistungen aus.

## 4.8. Bruttoinlandsprodukt

Das Bruttoinlandsprodukt wird nach der Verwendungsrechnung als Summe der Endnachfrage (zu Anschaffungspreisen) und des Außenbeitrags (Exporte abzüglich Importe) ermittelt. Im Modell ist das als Summe der Endnachfrage (privater Konsum, Staatskonsum, Investitionen, Export) aus inländischer Herstellung zu Anschaffungspreisen (Übergang von Herstellerpreisen mit Faktor $\psi$) abzüglich importierter Vorleistungen umgesetzt.

$$\text{GDP} = \sum_{i=1}^{72} y_i \psi - q_i \tag{4.44}$$

## 4.9. Abschließende Bemerkung

Grundsätzlich ist anzumerken, dass Input-Output-Modelle auf folgenden Annahmen aufbauen (Miller & Blair, 2009; Suh, 2004; Weisz & Duchin, 2006):

1. Linear-limitationale Produktionsfunktionen implizieren, dass alle Produktionsfaktoren (sekundäre und primäre Inputs) zueinander sowie zum Output des entsprechenden Produktionsbereiches in einem konstanten und proportionalen Verhältnis stehen.

2. Jeder Produktionsbereich stellt genau ein homogenes Gut her, das er ohne Differenzierung an alle anderen Produktions- und Endnachfragebereiche liefert.

3. Monetäre und physische Flüsse stehen im gleichen Verhältnis zueinander, unabhängig davon, an welchen Produktions- oder Endnachfragebereich ein Gut geliefert wird.

Mit zunehmender Anzahl an abgebildeten Produktionsbereichen in einem Input-Output-Modell werden die beiden zuletzt genannten Annahmen weniger problematisch, da dann die Anzahl an Nebenprodukten (mit abweichender Produktionsstruktur) eines Produktionsbereichs reduziert wird. Andererseits ist die Differenzierung durch eingeschränkte Datenverfügbarkeit und Handhabbarkeit des Modells beschränkt. Die Verwendung der

deutschen Input-Output-Tabelle mit 72 Gütergruppen bzw. Produktionsbereich erweist sich dabei als guter Kompromiss.

Die beschriebenen limitierenden Annahmen von statischen Input-Output-Mengenmodellen betreffen auch ISI-Macro. Durch die zeitlich verzögerte Schließung des Modells und die resultierenden endogene Entwicklung einiger Endnachfrageelemente hebt sich ISI-Macro hingegen von statischen Input-Output-Mengenmodellen ab, die sich meist auf ein einzelnes Jahr beziehen. Der Wachstumspfad in ISI-Macro stützt sich auf einige wichtige exogene Inputs, wie z.B. Exporte oder Arbeitsproduktivität. Viele Modellparameter werden konstant gehalten, anstatt eine exogene oder endogene dynamische Entwicklung anzunehmen. Damit unterscheidet sich ISI-Macro von dynamischen Input-Output-Modellen, in welchen der Strukturwandel durch eine endogene Entwicklung von Endnachfrage- und Vorleistungsstrukturen abgebildet ist. Doch auch eine dynamische Entwicklung beruht auf Annahmen, die diskutierbar sind. Beispiele für konstant gehaltene Modellparameter in ISI-Macro sind insbesondere die Aufteilung der Endnachfrageelemente auf Gütergruppen, der Inlandsanteil der Produktion und die Inputfaktoren der einzelnen Produktionsbereiche. Je nach beabsichtigter Analyse kann dies als Schwäche oder Stärke des Modells angesehen werden. Ersteres kann der Fall sein, wenn man den Basislauf des Modells für wirtschaftliche Prognosen verwenden möchte. Das Modell wurde jedoch nicht für wirtschaftliche Prognosen entwickelt, sondern zur Simulation der wirtschaftlichen Auswirkungen verschiedener Politikszenarien. Beim Vergleich zweier Szenarien fällt die fehlende Dynamik weniger ins Gewicht, da sie in beiden Szenarien auftritt und im Delta (zumindest teilweise) ausgeglichen wird. Hinzu kommt, dass Modellparameter, die im Basislauf konstant gehalten werden, in den Szenarien aufgrund von Bottom-up-Impulsen variieren können, dies betrifft Höhe und Struktur der Endnachfrage ebenso wie die Vorleistungsstruktur. Die Reduktion von endogenen Rückkopplungen und Komplexität erhöht die Linearität des Modells. Dadurch werden sowohl die Transparenz als auch die Interpretierbarkeit der Ergebnisse verbessert.

# 5. Regionale Verteilung

Die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Modellteile ermöglichen es, die Wirkung der Energiewende auf Wertschöpfung und Beschäftigung einzelner Wirtschaftsbereiche auf Bundesebene zu simulieren. Um darüber hinaus die regionale Verteilung dieser Effekte abzuschätzen, wurde ISI-Macro um einen regionalökonomischen Teil erweitert, der in den folgenden Abschnitten beschrieben wird (Sievers, 2019). Die Erweiterung wie auch die folgende Beschreibung wurden bewusst allgemein gehalten, sodass die Anwendung des Modells auch für andere ökonomische Folgenabschätzungen möglich ist. Der Modellierungsansatz hebt sich von einer statischen Verteilung der nationalen branchenbezogenen Wertschöpfung auf die Regionen ab: Ein Teil der ökonomischen Impulse kann direkt einzelnen Regionen und Wirtschaftsbereichen zugeordnet und die entsprechende Wertschöpfung abgeleitet werden. Sie wird ergänzt durch die nationale branchenbezogene Wertschöpfung, die auf die Regionen verteilt wird. Diese Verteilung erhält eine Dynamik, in dem die Entwicklung der regionalen Verteilung der Erwerbspersonen mit einbezogen wird.

## 5.1. Regionale und sektorale Granularität

Die Wahl der regionalen und sektoralen Auflösung bewegt sich im Spannungsfeld von zwei Fragen: Welche Auflösung ist mit Blick auf die Fragestellung wünschenswert oder gar nötig? Welche Auflösung ist mit Blick auf die verfügbaren Daten (regionalökonomische Daten, szenarienbezogene Inputs) sinnvoll und möglich?

Für den regionalökonomischen Modellteil werden Daten zu Bevölkerung, Wertschöpfung, Beschäftigung des Europäischen Amts für Statistik und des statistischen Bundesamts benutzt. Daher macht es Sinn, für die regionale Auflösung auf die Systematik der Gebietseinheiten für die Statistik (Nomenclature des Unités territoriales statistiques – kurz NUTS) zurückzugreifen. Dies ist eine geografische Systematik, nach der das Gebiet der Europäischen Union in drei verschiedene Ebenen von Regionen eingeteilt ist. Oberhalb der NUTS1-Ebene ist die nationale Ebene der Mitgliedstaaten angeordnet (Eurostat, 2017a). In Deutschland entspricht die NUTS1-Ebene der Bundesländerebene, NUTS2-Ebene der Regierungsbezirksebene und NUTS3-Ebene der Kreisebene. Die regionalen Gebietseinhei-

ten entsprechen somit auch politischen Gebietseinheiten. Die europäische Strukturförderung orientiert sich beispielsweise an der NUTS2-Ebene. Die Wahl einer NUTS-Ebene für die regionale Auflösung des Modells erscheint somit auch im Hinblick auf die starke Politikrelevanz der Fragestellung sinnvoll.

Die sektorale Auflösung soll sich ebenfalls an in der Statistik verwandter Systematik orientieren. Der makroökonomischen Kern des Modells verwendet die 72 Gütergruppen bzw. Produktionsbereiche der Input-Output-Rechnung, diese sind eng angelehnt an die Klassifikation der Wirtschaftszweige WZ 2008. Weitere in der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung genutzten Gliederungen der Wirtschaftszweige aggregieren diese zu 37 Wirtschaftsunterabschnitten oder zu 20 Wirtschaftsabschnitten oder zu weiteren höheren Aggregationsstufen (Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2017). Tabelle A.2 im Anhang dieser Arbeit listet Gütergruppen, Wirtschaftsabschnitte und Wirtschaftsunterabschnitte auf. Erst die Gliederung in 37 Wirtschaftsunterabschnitte unterteilt das verarbeitende Gewerbe noch weiter. Gerade die Gütergruppen des Verarbeitenden Gewerbes erscheinen für diese Arbeit besonders relevant, sowohl weil sie Investitions- oder Vorleistungsgüter für den Betrieb von Stromerzeugungsanlagen liefern, als auch weil sie in besonderem Maße von Strompreisveränderungen betroffen sein können. Da die einzelnen Produktionsbereiche jedoch nicht im gleichen Maße positiv oder auch negativ betroffen sind und regionale Unterschiede bezüglich der Zusammensetzung des verarbeitenden Gewerbes bestehen, erscheint daher die Verwendung von 37 Wirtschaftsunterabschnitten oder einer noch feineren sektoralen Gliederung sinnvoll für die Fragestellung der Arbeit.

Daten zu Wertschöpfung und Beschäftigung sind entweder in hoher regionaler oder hoher sektoraler Auflösung erhältlich. Eine gleichzeitig hohe regionale und sektorale Auflösung führt zwangsweise zu Problemen bei der Datenverfügbarkeit, da viele Werte anonymisiert werden um die Zuordnung von Datensätzen zu einzelnen Betrieben zu vermeiden. Aus diesem Grund erweist sich die NUTS3-Ebene als zu kleinteilig. Auch auf NUTS2-Ebene sind nicht alle Daten in der gewünschten sektoralen Granularität erhältlich, Lücken können aber über bestimmte Annahmen zum Beispiel hinsichtlich der Arbeitsproduktivität geschlossen werden, sodass eine Gliederung in 37 Wirtschaftsunterabschnitte möglich ist. Je höher die NUTS-Ebene desto besser die Datenverfügbarkeit und desto geringer der Anteil an Anonymisierungen.

Neben Daten aus offiziellen Statistiken werden auch regional aufgegliederte Bottom-up-Impulse genutzt. Das Modell EnerTile arbeitet zwar mit einem sehr feinen Raster (7km auf 7km), und die Ergebnisse können daher bereits für die NUTS3-Ebene genutzt werden, die Belastbarkeit der regionalen Zuordnung ist jedoch für höhere NUTS-Ebenen besser. Die Errichtung einer Energieerzeugungsanlage ist mit Investitionen verbunden,

die die Wertschöpfung der Region erhöhen, in der sie aufgestellt wird. Dies ist jedoch nicht für jede regionale Auflösung haltbar. Bei Verwendung der NUTS3-Ebene ist etwa zu beachten, dass hier häufig zwischen Stadt- und Landkreisen unterschieden wird. Eine Anlage, die in einem Landkreis errichtet wird, könnte zum Beispiel zu Wertschöpfung im angrenzenden Stadtkreis führen. Grundsätzlich trifft dies auch für Grenzregionen von Regierungsbezirken und Bundesländern zu. Durch die größeren Flächen der Regionen, höhere Anzahl an Anlagen und geringere strukturelle Unterschiede, ist das Problem für diese Ebenen weniger bedeutend.

Neben der Datenverfügbarkeit sprechen auch weitere Aspekte für die Wahl der NUTS1-Ebene als Analyseebene, insbesondere die politische Relevanz dieser Gebietseinheit. Viele Bundesländer haben beispielsweise eigene energiepolitische Ziele. Aber auch die Anschlussfähigkeit an bestehende Literatur (vgl. Kapitel 1) spricht für NUTS1. Allerdings ist die Anzahl der Regionen auf NUTS1-Ebene (16) wesentlich geringer als die auf NUTS2-Ebene (38). Regionale Unterschiede, die auf NUTS2-Ebene sichtbar werden, könnten auf NUTS1-Ebene im Mittel verschwinden, für weitere statistische Auswertungen wie etwa die Berechnung eines regionalen Gini-Koeffizienten, Clustering von Regionen etc. scheint die NUTS2-Ebene daher besser geeignet.

Der regionalökonomische Teil des Modells löst somit Wertschöpfung und Beschäftigung auf NUTS2-Ebene für 37 Wirtschaftsunterabschnitte auf.

## 5.2. Modellierungsansatz

Bei der regionalökonomischen Erweiterung von ISI-Macro handelt es sich um einen hybriden Ansatz: Impulse fließen regional ein und entfalten regionale Wirkung (bottom-up), überregionale Wirkungen werden wiederum in regionale Wirkungen übersetzt (top-down). Eine schematische Darstellung findet sich in 5.1.

Sämtliche Impulse (regionale und überregionale) gehen in den makroökonomischen Kern des Modells ein, wo unter Einbezug direkter, indirekter und induzierter Effekte die Bruttowertschöpfung der 72 Produktionsbereiche ermittelt wird. Ein Teil der Impulse kann direkt einzelnen Regionen und Wirtschaftsbereichen zugeordnet und die entsprechende Wertschöpfung abgeleitet werden. Für den vorliegenden Anwendungsfall ist dies in Kapitel 3 beschrieben. Die restliche Wertschöpfung wird den Regionen mittels eines Schlüssels (NUTS2, 37 Wirtschaftsunterabschnitte) zugeordnet (eine detaillierte Beschreibung folgt in Abschnitt 5.4). Dieses Verfahren wird als Top-down-Verteilung bezeichnet. Hierbei wird auf regional und sektoral hoch aufgelöste Zeitreihen zur Beschäftigung (Arbeitskräfteerhebung) und Wertschöpfung (Daten des statistischen Bundesamts sowie der statistischen

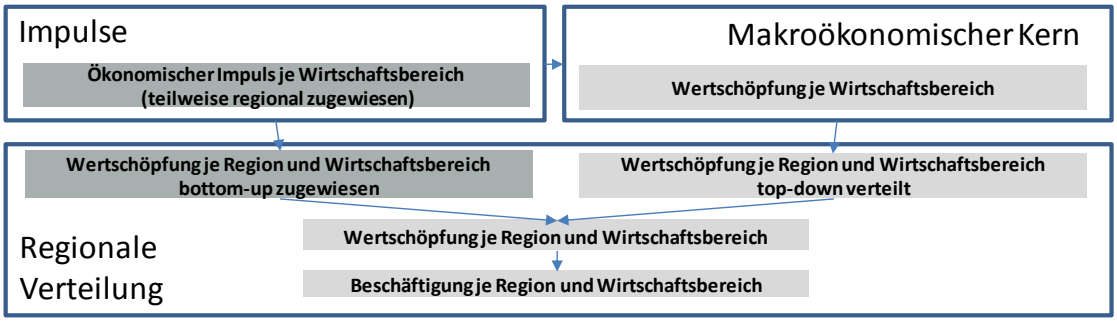



Abbildung 5.1.: Schema des regionalökonomischen Modellierungsansatzes

Ämter der Länder) und der daraus resultierenden Arbeitsproduktivität nach Regionen und Wirtschaftsunterabschnitten zurückgegriffen. Prognosen zur Entwicklung des regionalen Arbeitskräftepotenzials werden aus der Bevölkerungsvorausberechnung des statistischen Bundesamts (Destatis, 2015a) und der Raumordnungsprognose des BBSR (Schlömer et al., 2015) abgeleitet und für die Verteilung berücksichtigt. Das heißt, den Unterschieden der einzelnen Regionen in Bezug auf ihre Wirtschaftskraft und -struktur und in Bezug auf deren dynamische Entwicklung wird Rechnung getragen. Es folgt eine formelle Beschreibung der regionalen Erweiterung, die teilweise auf den bereits in Kapitel 4 eingeführten Variablensatz zurückgreift. Auch in diesem Kapitel wird der Zeitindex $t$ in der Notation weggelassen, solange er nicht zur Differenzierung benötigt wird.

## 5.3. Bruttowertschöpfung aus direkt regional zugewiesenen Impulsen

Die Bestimmung der Wertschöpfung eines Produktionsbereichs aus dem direkt zugeordneten regionalen Produktionswert (5.1) wird als Bottom-up-Verfahren bezeichnet. Die Verwendung eines durchschnittlichen Wertschöpfungsanteil am Produktionswert je Produktionsbereich stellt hierbei eine Vereinfachung dar, da Produktivitäten regional durchaus abweichen können. Dies ist jedoch gerechtfertigt, solange auch bei den Bottom-up-Impulsen nicht zwischen regionalen Produktionskosten unterschieden wird.

$$v_{j,r}^{bu} = x_{j,r}^{bu} \frac{v_j}{x_j} \tag{5.1}$$

$$v_{n,r}^{bu} = \sum_j M_{n,j} v_{j,r}^{bu} \tag{5.2}$$

mit $v$ Bruttowertschöpfung
$x$ Produktionswert
$M$ Zuordnungsmatrix Produktionsbereiche zu Wirtschaftsunterabschnitten
$j$ Produktionsbereich j=1...72
$n$ Wirtschaftsunterabschnitte n=1...37
$r$ NUTS2-Region r
$bu$ bottom-up

Da die top-down verteilte regionale Wertschöpfung statt der 72 Produktionsbereiche nur 37 Wirtschaftsunterabschnitte verwendet, muss auch die bottom-up direkt zugeordnete Wertschöpfung unter Verwendung einer Zuordnungsmatrix auf diese Aggregationsstufe gebracht werden (5.2), sodass eine spätere Zusammenführung möglich wird.

Die direkt zugeordnete regionale Wertschöpfung in den weiteren Produktionsbereichen ergibt sich im vorliegenden Anwendungsfall aus der direkt regional zugeordneten Herstellung von Investitionsgütern und Vorleistungsgütern, die vom regionalen Technologiemix und der regionalen Verteilung der Komponentenhersteller abhängt. Die Berechnung der regionalen Wertschöpfung für den Produktionsbereich Elektrizitätsversorgung bildet eine Ausnahme, sie basiert auf dem regionalen Technologiemix und der regionalen Verteilung der Betreiber (für Details siehe Kapitel 3).

## 5.4. Top-down-Verteilung

### 5.4.1. Status Quo

Die Top-down-Verteilung basiert auf einer von Eurostat kostenfrei zur Verfügung gestellte Sonderauswertung der Arbeitskräfteerhebung (AKE) der Europäischen Union. Diese umfasst Erwerbstätige (sozialversicherungspflichtig Beschäftigte, geringfügig Beschäftigte, sowie Selbständige) und deren wöchentliche Arbeitszeit in hoher regionaler (NUTS2) und sektoraler (2-Steller der Klassifikation der Wirtschaftszweige 2008) Auflösung in jährlichen Zeitschritten von 2008 bis 2012. Die NUTS2-Klassifikation entspricht dabei der in regionalökonomischen Modellteil verwandten Klassifikation von 2013, die 2-Steller der Klassifikation der Wirtschaftszweige, die sogenannten Wirtschaftsabteilungen entsprechen zu großen Teilen den 72 Gütergruppen bzw. Produktionsbereichen, die im makroökonomischen Kern genutzt werden bzw. entsprechen einer Aggregation dieser und sie lassen sich weiter aggregieren zu den 37 im regionalökonomischen Modellteil verwandten Wirtschaftsunterabschnitten. Die auf Deutschland bezogenen Daten der Arbeitskräfteerhebung werden im Rahmen des Mikrozensus erhoben (Eurostat, 2015a). Die Agentur für Arbeit er-

fasst sämtliche sozialversicherungspflichtig Beschäftigte und wäre daher mit Bezug auf die Datenqualität der auf einer Stichprobe von etwa 1 Prozent beruhenden Arbeitskräfteerhebung vorzuziehen. Allerdings werden Selbständige und geringfügig Beschäftigte nicht abgedeckt. Auch wenn diese nur etwa 10 Prozent der Erwerbstätigen ausmachen, können sie in ihrer sektoralen und regionalen Struktur abweichen und sollten daher mit einbezogen werden. Zudem können die Daten der Agentur für Arbeit in der benötigten regionalen und sektoralen Auflösung nicht kostenfrei bezogen werden.

Aus der vorliegenden Zeitreihe von Anzahl Erwerbstätiger und deren durchschnittlicher wöchentlichen Arbeitszeit, wurden Vollzeitäquivalente berechnet, wobei für eine Vollzeittätigkeit 40 Wochenstunden angenommen wurden. Durch die Verwendung von Vollzeitäquivalenten anstatt von absoluten Erwerbstätigenzahlen werden Artefakte in der Verteilung aufgrund regionaler Unterschiede bei den Teilzeitquoten ausgeschlossen.

Die verfügbaren Statistiken zur Bruttowertschöpfung sind regional und sektoral schlechter aufgelöst als die Erwerbstätigendaten der Arbeitskräfteerhebung. Wie bei den Erwerbstätigen gilt auch hier: je höher die regionale Auflösung desto schlechter die sektorale Auflösung. Die statistischen Ämter der Länder stellen Daten zur Bruttowertschöpfung auf Bundesländerebene (NUTS1) für die im regionalökonomischen Modellteil verwendeten 37 Wirtschaftsunterabschnitte zur Verfügung. Vereinfachend wird angenommen, dass die Arbeitsproduktivität eines Wirtschaftsunterabschnitts einer NUTS1-Region auch für alle untergeordneten NUTS2-Regionen gilt. Basierend auf dieser Annahme kann die Bruttowertschöpfung je Wirtschaftsunterabschnitt einer NUTS1-Region anhand der Verteilung der Vollzeitäquivalente (die zu diesem Zweck auf die 37 Wirtschaftsunterabschnitte aggregiert werden) den untergeordneten NUTS2-Regionen zugewiesen werden:

$$v^*_{n,r} = \begin{cases} 0 & \text{für} e^*_{n,r} = 0 \\ \sum_l \frac{R_{l,r} e^*_{n,r}}{\sum_r R_{l,r} e^*_{n,r}} v^*_{n,l} & \text{für} e^*_{n,r} \neq 0 \end{cases} \tag{5.3}$$

mit $e$ Erwerbstätige in Vollzeitäquivalenten
$R$ Zuordnungsmatrix NUTS2-Regionen zu NUTS1-Regionen
$l$ NUTS1-Region l=1...16
$*$ datenbasiert

### 5.4.2. Dynamik

Nach 2012 bleibt die Verteilung der Wertschöpfung je Wirtschaftsunterabschnitt nicht statisch, sondern entwickelt sich dynamisch weiter. Sie wird durch die Entwicklung der

Regionen hinsichtlich ihres Anteils an den gesamtdeutschen Erwerbspersonen bestimmt. In regionalen Produktionsfunktionen hat die Entwicklung des Arbeitskräftepotenzials häufig den größten Einfluss auf die Veränderung des Outputs (vgl. Eckey, Kosfeld & Murarro, 2009; Eckey, Kosfeld & Türck, 2004). Die ausschließliche Kopplung der Entwicklung an den Produktionsfaktor Arbeit impliziert die Annahme, dass die regionale Lohn-Zins-Relation unverändert bleibt (vgl. Eckey et al., 2009) und stellt daher eine Vereinfachung dar. Das Konzept regionaler Produktionsfunktionen wird gewöhnlich zur Bestimmung des aggregierten Produktionspotenzials einer Region genutzt.[1] Ein Heranziehen der gleichen dynamischen Entwicklung für alle Wirtschaftsunterabschnitte kann aufgrund der unterschiedlichen Bedeutung der Produktionsfaktoren in den einzelnen Produktionsbereichen kritisiert werden. Andererseits wird dadurch ermöglicht, die durch die Szenarien-bezogenen Impulse beeinflusste Entwicklung von Niveau und Struktur der überregional ermittelten Wertschöpfung miteinzubeziehen. Diese wirkt sich auf die Verteilung der aggregierten Wertschöpfung je Region aus, da die Regionen aufgrund ihrer jeweils eigenen sektoralen Struktur unterschiedlich stark profitieren. Die Szenarien wirken sich somit nicht nur über die direkt regional zugeordneten Effekte sondern auch über indirekte und induzierte Effekte auf die Verteilung der regionalen Wertschöpfung aus.

Für die Entwicklung der gesamtdeutschen Bevölkerung werden, um Konsistenz mit den in den Energiemodellen verwandten Szenarien zu schaffen, auf die Variante 2 (Kontinuität bei schwächerer Zuwanderung) der 13. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung des statistischen Bundesamts zurückgegriffen. Die Bevölkerung wird dann anhand ihrer relativen Anteile basierend auf der Raumordnungsprognose 2035 des BBSR (Schlömer et al., 2015) auf die NUTS2-Regionen verteilt (5.4). Der gleichen Studie kann die Entwicklung des Anteils der Erwerbspersonen an der Bevölkerung einer Region entnommen werden. Basierend darauf können die Erwerbspersonen pro Region (5.5) und ihr Anteil an den gesamten Erwerbspersonen (5.6) berechnet werden.

$$Pop_r = Pop^* \frac{Pop_r^*}{\sum_r Pop_r^*} \tag{5.4}$$

$$EWP_r = Pop_r \frac{EWP_r^*}{Pop_r^*} \tag{5.5}$$

$$\eta_r = \frac{EWP_r}{\sum_r EWP_r} \tag{5.6}$$

$$\tag{5.7}$$

[1] Nach aktuellem Kenntnisstand liegen aufgrund mangelhafter Datenlage keine Arbeiten zu regionalen und sektoralen Produktionsfunktionen für Deutschland vor.

mit $Pop$ Bevölkerung in Personen
$EWP$ Erwerbspersonen
$\eta_r$ Anteil der Region r an gesamten Erwerbspersonen

Die Veränderung dieses Erwerbspersonenanteils im Vergleich zum vorherigen Zeitschritt bestimmt die Veränderung des Anteils einer Region an der top-down verteilten Wertschöpfung im Vergleich zum vorherigen Zeitschritt:

$$\alpha_{n,r,t} = \begin{cases} \frac{v^*_{n,r,t}}{\sum_r v^*_{n,r,t}} & \text{für } t \leq 2012 \\ \frac{\eta_{r,t}}{\eta_{r,t-\Delta t}} \alpha_{n,r,t-\Delta t} & \text{für } t > 2012 \end{cases} \tag{5.8}$$

mit $\alpha_{n,r}$ Anteil der Region r an Wertschöpfung des Wirtschaftsunterabschnitts n

Die direkt regional zugeordnete Wertschöpfung aus Bottom-up-Impulsen, deren regionale Verteilung vom Top-down-Schlüssel abweicht, beeinflusst die Top-down-Verteilung nicht. Erhält eine Region durch direkte Zuordnung mehr Wertschöpfung innerhalb eines Wirtschaftsunterabschnitts als bei einer reinen Top-down-Verteilung, so wird die Top-down-Verteilung im nächsten Zeitschritt durch diese Entwicklung nicht beeinflusst. Diese Annahme ist eher konservativ, da mögliche positive regionale Agglomerationseffekte innerhalb dieses Wirtschaftsunterabschnitts unberücksichtigt bleiben.

Der Verteilungsschlüssel ändert sich somit innerhalb des Szenariozeitraums, da die Veränderung jedoch durch exogene Parameter bestimmt ist, unterscheidet er sich zwischen den Szenarien nicht. Die Verwendung des gleichen Verteilungsschlüssels bietet Vorteile. Die Unterschiede in der regionalen Wertschöpfung zwischen den Szenarien können auch in ihrer relativen Größe sinnvoll eingeordnet werden, weil das Grundniveau der regionalen Wertschöpfung in beiden Szenarien die Dynamik der regionalen Verteilung des Arbeitskräftepotenzials berücksichtigt. Andererseits ist der Verteilungsansatz auch mit Unsicherheiten behaftet, die aber bei Verwendung des gleichen Schlüssels durch den Vergleich mehrerer Szenarien und Fokus auf das Delta weniger stark ins Gewicht fallen.

## 5.5. Berechnung der regionalen Verteilungswirkung

Die Wertschöpfung pro Wirtschaftsunterabschnitt und NUTS2-Region ergibt sich durch Zusammenführen der Wertschöpfung aus direkt regional zugeordneten Bottom-up-Impulsen und der top-down verteilten Wertschöpfung (5.9). Die Aggregation der Wirtschaftsunterabschnitte liefert die Wertschöpfung einer Region, welche als Proxy für das regionale BIP herangezogen wird (5.10). Diese kann auch pro Kopf berechnet werden (5.11).

$$v_{n,r,t} = \begin{cases} \alpha_{n,r,t} \sum_j M_{n,j} v_{j,t} & \text{für } 2008 \leq t \leq 2012 \\ \underbrace{\alpha_{n,r,t}(\sum_j M_{n,j} v_{j,t} - v^{bu}_{n,r,t})}_{\text{top-down}} + \underbrace{v^{bu}_{n,r,t}}_{\text{bottom-up}} & \text{für } t > 2012 \end{cases} \tag{5.9}$$

$$v_r = \sum_n v_{n,r} \tag{5.10}$$

$$v_r^{\text{per capita}} = \frac{v_r}{Pop_r} \tag{5.11}$$

Die regionale und sektorale Beschäftigung wird berechnet als Verhältnis von Wertschöpfung und Arbeitsproduktivität $\iota$.

$$e_{n,r} = \frac{v_{n,r}}{\iota_{n,r}} \tag{5.12}$$

Die Entwicklung der Arbeitsproduktivität basiert auf der Entwicklung im nationalen Teil von ISI-Macro. Dafür werden zunächst Wertschöpfung und Beschäftigung jeweils von 72 Produktionsbereichen auf 37 Wirtschaftsunterabschnitte zusammengefasst und die Arbeitsproduktivität als Quotient daraus berechnet. Die Dynamik der regionalen Arbeitsproduktivität je Wirtschaftsunterabschnitt entspricht dann der nationalen:

$$\frac{\iota_{n,r,t}}{\iota_{n,r,t-\Delta t}} = \frac{\iota_{n,t}}{\iota_{n,t-\Delta t}} \tag{5.13}$$

Da die regionale Arbeitsproduktivität berücksichtigt wird, ist es möglich, dass die Summe der regionalen Beschäftigung von der im nationalen Teil von ISI-Macro berechneten Beschäftigung abweicht.

# 6. Ergebnisse und Diskussion

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der regionalen Verteilung der Effekte. Diese müssen jedoch im Zusammenhang mit den gesamtwirtschaftlichen Effekten und ihrer Verteilung auf Wirtschaftsbereiche betrachtet werden, weshalb diese zunächst dargestellt werden.

## 6.1. Gesamtwirtschaftliche Effekte und Verteilung auf Wirtschaftsbereiche

Die gesamtwirtschaftlichen Effekte sind positiv: Das Energiewendeszenario zeichnet sich durch eine Wertschöpfung aus, die in 2020 um 0,7% und in 2030 um 1,4% höher ist als im Referenzszenario. Die Gesamtbeschäftigung liegt mit 0,7% in 2020 und 1,2% in 2030 ebenfalls leicht höher. Basierend auf der in Kapitel 3 dargelegten Zuordnung der Impulse, können die Effekte nach den Handlungsfeldern Strom, Wärme und Verkehr differenziert werden. Der Effekt auf die Wertschöpfung im Jahr 2030 kann zu 20% auf die Transformation des Stromsektors und jeweils zu 40% auf die Änderungen im Wärme- bzw. Verkehrssektor zurückgeführt werden. Die Abweichung der Beschäftigung begründet sich hingegen zu etwa gleichen Teilen auf den Transformationen in den drei Handlungsfeldern (31% Strom, 37% Wärme und 32% Verkehr).

Haupttreiber dieses Wirtschaftswachstums sind zusätzliche Investitionen. An erster Stelle sind hier Maßnahmen im Gebäudebereich zu nennen, aber auch zusätzliche Investitionen in Energieerzeugungsanlagen, Verkehrsinfrastruktur und Effizienzverbesserungen im Strom- und Verkehrssektor spielen eine Rolle. Der Investitionsimpuls wird verstärkt durch Multiplikator und Akzeleratoreffekte. Der Modellierungsansatz unterstellt, wie bereits in vorangegangen Teilen dieser Arbeit diskutiert, dass andere Investitionen nicht verdrängt werden. Entsprechend führen die zusätzlichen Investitionen zu Wachstum. Die Effekte bleiben jedoch moderat, da angenommen wurde, dass die zusätzlichen Investitionen keine produktivitätssteigernde Wirkung haben (siehe Abschnitte 1.3 und 1.4). Eine stärkere Limitierung der verfügbaren Geldmenge dämpft die positiven Effekte (postkeynesianische Modelle) oder führt zu negativen Effekten (neoklassische Modelle) (vgl. Abschnitte 1.3, 1.4 und 4.4.2).

Neben dem Investitionsimpuls wirkt sich auch die Substitution importierter fossiler Brennstoffe durch heimische erneuerbare Energieerzeugung positiv auf die Wirtschaft aus, wenngleich die Importe von Technologien für erneuerbare Energien diese Auswirkungen verringern. Im Fall von PV werden insbesondere Wafer, Solarzellen und Module importiert, wobei für die einzelnen Komponenten jeweils konstante Importanteile unterstellt wurden. Die positiven Auswirkungen auf die Produktion im Inland könnten daher überschätzt werden, da in der Vergangenheit ein Anstieg der Importanteile zu beobachten war. Andererseits wirkt dem entgegen, dass die (größtenteils aus China) importierten Komponenten von einer deutlichen Kostensenkung profitieren konnten (Candelise, Winskel & Gross, 2013; Liu & Goldstein, 2013). Auch in den Szenarien spielen Lern- und Skaleneffekte für diese Komponenten eine stärkere Rolle als beispielsweise für die heimisch erbrachten Dienstleistungen zu Planung und Installation (vgl. Abschnitt 3.2.1.2). So fällt der wertmäßige Anteil der Importe an den Investitionen für Photovoltaik von 30% zu Beginn des Szenarienzeitraums auf 20% in 2030. Die Exporte von Technologien zur erneuerbaren Energieerzeugung oder von Energieeffizienztechnologien unterscheiden sich zwischen den Szenarien nicht. Andere Studien (Duscha et al., 2016; Lehr et al., 2012; Pfaff & Walz, 2017) unterstellen hingegen, dass diese im Energiewendeszenario höher sind als im Referenzszenario und somit das Wirtschaftswachstum noch weiter antreiben könnten als oben dargestellt (vgl. hierzu auch die Ausführungen in den Abschnitten 1.3 und 4.4.4).

Es wird häufig angeführt (Breitschopf et al., 2013; Cox, Peichl, Pestel & Siegloch, 2014; Duscha et al., 2016; Lehr et al., 2012; Lutz et al., 2012), dass sich steigende Strompreise oder Heizkosten dämpfend auf den nicht-energiebezogenen Konsum der Haushalte und die Wertschöpfung der Industrie auswirken. Im Modell wird zwischen Strompreisen für Haushalte und Dienstleistungsunternehmen, nicht-energieintensive und energieintensive Industrie unterschieden. Die Strompreise sind im Energiewendeszenario zwar höher, aber der Endenergiebedarf ist aufgrund der höheren Effizienz geringer. Die Energieausgaben der Haushalte sind daher im Energiewendeszenario tatsächlich niedriger, die Ausgaben für Mieten und langfristige Konsumgüter liegen jedoch höher. Der gleiche Effekt ist für die Dienstleistungsbereiche zu beobachten: sie müssen, gemessen an ihrer Produktion, etwas weniger für Strom ausgeben. Im Energiewendeszenario sind die Strominputkoeffizienten der Dienstleistungsbereiche um bis zu 3% niedriger als im Referenzszenario. In den industriellen Produktionsbereichen hingegen sind die Ausgaben für Strom leicht gestiegen, da der Rückgang des Energieverbrauchs die steigenden Strompreise nicht kompensiert. Die Strominputkoeffizienten der meisten Industriezweige sind im Energiewendeszenario um bis zu 2% höher als im Referenzszenario. Nur für drei Produktionsbereiche (Papier, chemische Erzeugnisse und Eisenmetalle) sind die Strominputkoeffizienten im Energiewendeszenario

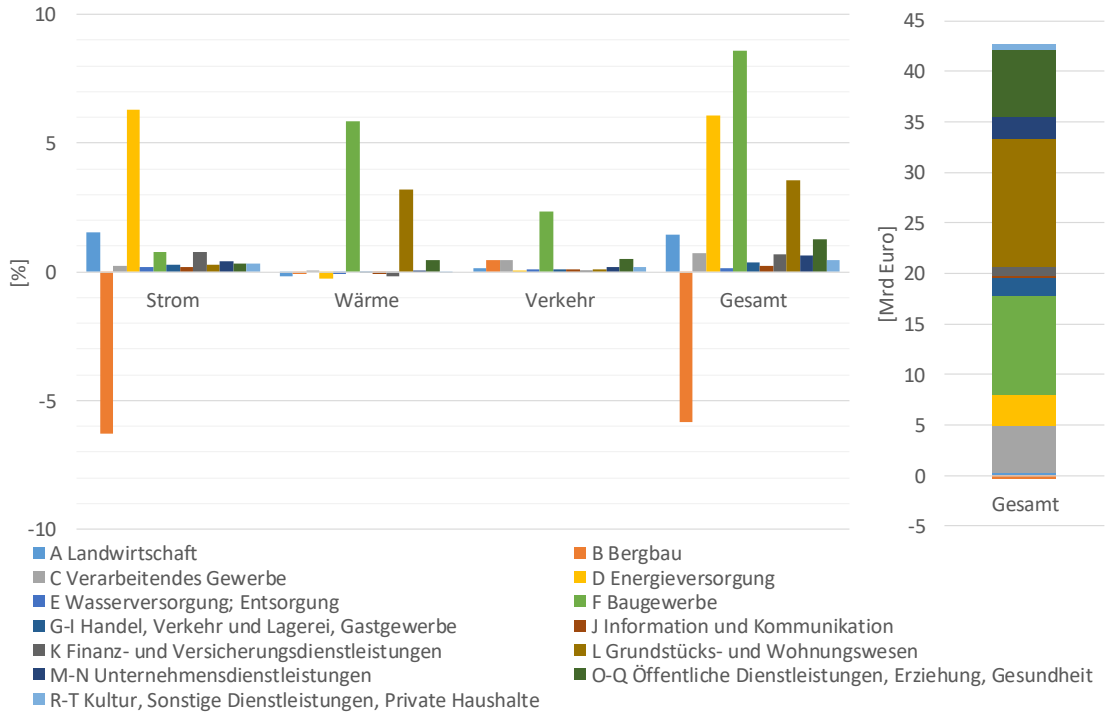



Abbildung 6.1.: Abweichung der Wertschöpfung pro Wirtschaftsabschnitt im Energiewendeszenario im Vergleich zum Referenzszenario in 2030 als Gesamteffekt und differenziert für die Handlungsfelder Strom, Wärme und Verkehr. Der linke Bereich der Abbildung zeigt die relativen Abweichungen in Prozent; der rechte Bereich zeigt absolute Abweichungen in Milliarden Euro.

bis zu 8% höher als im Referenzszenario.[1] Die höheren Aufwendungen für Strom führen in den betroffen Produktionsbereichen zu geringerer Wertschöpfung, gemessen als Anteil am Produktionswert. Mögliche Wirkungen auf internationale Wettbewerbsfähigkeit werden nicht berücksichtigt, da die zu erwartenden Effekte klein sind (Grave et al., 2015).[2]

Abbildung 6.1 zeigt die relative Abweichung der Bruttowertschöpfung im Energiewendeszenario im Vergleich zum Referenzszenario je Handlungsfeld und Wirtschaftsabschnitt sowie die gesamte absolute Abweichung der Bruttowertschöpfung.

[1] Um die Stromausgaben dieser Produktionsbereiche zu berechnen, werden sie basierend auf Grave et al. (2015) in energieintensiv und nicht-energieintensiv unterteilt und die entsprechenden Strompreise angewendet. Die energieintensive Industrie profitiert in beiden Szenarien weiterhin von der Befreiung der Energieumlage.

[2] Produktionsbereiche in Input-Output-Tabellen stellen immer einen Durchschnitt von vielen Unternehmen dar, und es wird sicherlich Unternehmen geben, die stärker betroffen sind, während andere weniger stark betroffen sind. In diesem Detailgrad kann dies jedoch mit dem vorliegenden Modell nicht abgebildet werden.

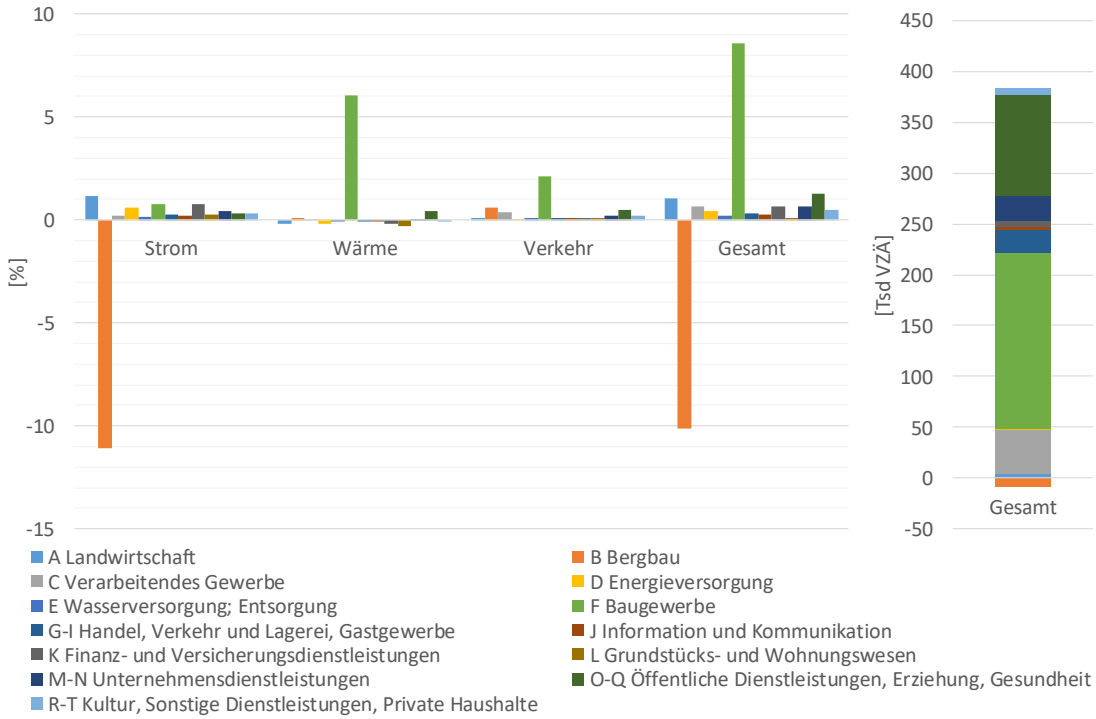



Abbildung 6.2.: Abweichung der Beschäftigung pro Wirtschaftsabschnitt im Energiewendeszenario im Vergleich zum Referenzszenario in 2030 als Gesamteffekt und differenziert für die Handlungsfelder Strom, Wärme und Verkehr. Der linke Bereich der Abbildung zeigt die relativen Veränderungen in Prozent; der rechte Bereich zeigt absolute Veränderungen in Tausend Vollzeitäquivalenten.

Die Energiewende führt zu Änderungen im Stromsektor. Haupttreiber für den Anstieg der Wertschöpfung der Elektrizitätsversorgung (D) sind zusätzliche Investitionen in Energieerzeugungsanlagen und somit auch höhere kapitalgebundene Wertschöpfungselemente wie Abschreibungen und Nettobetriebsüberschüsse. Zusätzliche Investitionen ins Elektrizitätssystem erklären auch den deutlichen Anstieg der Wertschöpfung des Baugewerbes (F) und der Finanzdienstleistungen (K). Aufgrund der gesunkenen Nachfrage nach fossilen Energieträgern, insbesondere Kohle, ergeben sich große negative Auswirkungen auf den Bergbau (B), während die zusätzliche Nachfrage nach Biomasse die Wertschöpfung des Agrarsektors (A) erhöht.

Im Handlungsfeld Wärme führen erhöhte Energieeffizienzmaßnahmen an Gebäuden zu einem Anstieg der Wertschöpfung im Bauwesen (F). Die größte absolute Abweichung der Wertschöpfung verzeichnet das Grundstücks- und Wohnungswesen (L). Dies kann wie folgt erklärt werden: Elf Prozent der zusätzlichen Investitionen zur Erhöhung der Energieeffizienz von Gebäuden dürfen als Modernisierungsanlage auf die jährliche Miete umgelegt werden. Dies spiegelt (zumindest teilweise) den höheren Wert der Immobilie und die gestiegene Wohnqualität wider. Dies wird im Modell entsprechend implementiert und zwar sowohl für die tatsächlichen Mieten als auch für hypothetische Mieten der Eigenheimbesitzer.[3] Da den erhöhten Mieteinnahmen kein entsprechender Anstieg der bezogenen Vorleistungen gegenüber steht, erhöht sich dadurch direkt die Wertschöpfung im Grundstücks- und Wohnungswesen. Die durch Energieeffizienzmaßnahmen erzielten Einsparungen können den Anstieg der Mieten nicht kompensieren. Die damit einhergehende Reduktion von Haushaltsausgaben für andere Konsumzwecke führt zu leicht negativen Effekten in einigen Wirtschaftsbereichen. Die Wertschöpfung des öffentlichen Sektors (O-Q) liegt im Energiewendeszenario dennoch etwas höher als im Referenzszenario aufgrund höheren Wirtschaftswachstums und somit auch Staatsausgaben.

Die Transformation des Verkehrssektors erfordert zusätzliche Investitionen in die Infrastruktur wie das Schienennetz oder die Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge. Die Ausgaben für Fahrzeuge[4] liegen aufgrund höherer Anforderungen an die Energieeffizienz und die Elektrifizierung des Antriebsstrangs ebenfalls höher als im Referenzszenario. Die

[3] Das Statistische Bundesamt bezieht sowohl tatsächliche als auch hypothetische Mieten in die volkswirtschaftliche Gesamtrechnung mit ein. Die Höhe der hypothetischen Mieten der Eigenheimbesitzer wird durch den Vergleich mit vermieteten Immobilien bestimmt (Eurostat, 2013). Analysen zur Frage, ob der Anstieg der Mieten auf allen lokalen Wohnungsmärkten vollständig erreicht werden kann, fehlen bisher. Seit dem 1.1.2019 wurde die Modernisierungsumlage auf acht Prozent abgesenkt. Der Effekt auf das Grundstücks- und Wohnungswesen wird somit insbesondere ab 2019 überschätzt. Aber auch für die Jahre zuvor sollte er eher als obere Grenze interpretiert werden. Dies gilt insbesondere für die Regionen, die sich durch einen weniger angespannten Wohnungsmarkt auszeichnen.

[4] Vgl. Abschnitt 3.3.14 für nähere Erläuterungen.

größten relativen Abweichungen der Wertschöpfung treten daher im Baugewerbe (F) und im verarbeitenden Gewerbe (C) auf. Der Bergbau (B) ist eine wichtige vorgelagerte Industrie für das Baugewerbe und profitiert daher indirekt. Höhere Haushaltsausgaben für Fahrzeuge werden zu großen Teilen durch niedrigere Energieausgaben für Mobilität ausgeglichen, sodass die Auswirkungen auf die Haushaltsbudgets annähernd neutral sind (vgl. Abbildung 3.2). Der positive Investitionsimpuls stimuliert die Gesamtwirtschaft, sodass alle in Abbildung 6.1 gezeigten Wirtschaftsbereiche einen leichten Wertschöpfungsanstieg im Vergleich zum Referenzszenario aufweisen.

Die dominanten Effekte der nach Handlungsfeldern (Strom, Wärme, Verkehr) differenzierten Ergebnisse sind auch in den Gesamtergebnissen noch sichtbar. Dazu gehören ein starker relativer Wertschöpfungsrückgang des Bergbaus und ein starker relativer Wertschöpfungsanstieg der Elektrizitätsversorgung (Strom), des Baugewerbes (hauptsächlich Wärme, aber auch Verkehr und teilweise Strom) und des Grundstücks- und Wohnungswesens (Wärme). Die Beschäftigungseffekte (Abbildung 6.2) verteilen sich mit einem ähnlichen Muster auf die Wirtschaftsbereiche wie die Wertschöpfungseffekte, jedoch mit zwei Unterschieden: Höhere Mieten erhöhen die Wertschöpfung (kapitalbezogene Komponenten) des Grundstücks- und Wohnungswesens, führen aber nicht zu zusätzlicher Beschäftigung. Die Wertschöpfung in der Elektrizitätsversorgung steigt vor allem aufgrund des gestiegenen Kapitaleinsatzes und der gestiegenen Erträge. Dies führt zu einem leichten Anstieg der Arbeitsproduktivität dieses Produktionsbereichs und somit zu einem etwas geringeren Beschäftigungsanstieg im Vergleich zum Wertschöpfungsanstieg. Ähnlich wie bei der Wertschöpfung sind die Abweichungen der Beschäftigung zwischen den Szenarien im Bergbau absolut gesehen klein und negativ, aber relativ gesehen groß. Im Gegensatz dazu sind sowohl die relativen als auch die absoluten Beschäftigungseffekte im Baugewerbe stark positiv.

## 6.2. Regionale Verteilung der Effekte

### 6.2.1. Wertschöpfung

Die Abweichung der Wertschöpfung zwischen den Szenarien ist für die Bundesländer in Abbildung 6.3 sowie kartographisch in Abbildung 6.4 dargestellt. Sie erlauben folgende Aussagen:

1. In allen Bundesländern ist die Bruttowertschöpfung im Energiewendeszenario höher als im Referenzszenario.

2. Die relativen Abweichungen der Bruttowertschöpfung zwischen den Szenarien variieren zwischen den Regionen für den Stromsektor stark, wohingegen die durch die Veränderungen im Wärme- und Verkehrssektor bedingten Abweichungen eher gleichmäßig zwischen den Regionen verteilt sind.

3. Absolut gesehen, hängen die Abweichungen von der entsprechenden Wirtschaftskraft des Bundeslands ab.

Mecklenburg-Vorpommern verzeichnet im Jahr 2030 den größten relativen Anstieg der Wertschöpfung, auch weil die Wertschöpfung im Referenzszenario hier viel geringer ist als in anderen Bundesländern. So sind selbst kleine Änderungen relativ gesehen groß. Aber auch die absolute Abweichung ist deutlich positiv und ähnlich hoch wie in anderen Bundesländern. In Mecklenburg-Vorpommern findet zwischen 2020 und 2030 ein deutlicher Ausbau der erneuerbaren Energien, insbesondere der Offshore-Windenergie, statt. Dies ist mit zusätzlichen Investitionen und einer erhöhten Wertschöpfung aus Wartung und Betrieb der Anlagen verbunden. Gleichzeitig gibt es in Mecklenburg kaum Stromproduktion aus fossilen Energieträgern, die verdrängt werden könnte, sodass die Nettoauswirkungen hier deutlich positiv sind. Zudem ist Mecklenburg-Vorpommern aufgrund seiner Produktionsstruktur weniger vulnerabel hinsichtlich höherer Strompreise. Die durch die Energiewende im Wärme- und Verkehrssektor bedingten relativen Abweichungen der Bruttowertschöpfung sind ähnlich hoch wie in anderen Bundesländern. Abschnitt 6.3 enthält eine detaillierte Beschreibung der Auswirkungen auf Mecklenburg-Vorpommern.

Auch in Niedersachsen und Schleswig-Holstein sowie in den Küstenregionen, die den Stadtstaaten Hamburg und Bremen zugeordnet sind, expandiert die Stromerzeugung aus Onshore- und Offshore-Wind. Die fünf Regionen mit der größten relativen Wertschöpfungszunahme (sowohl in Bezug auf die durch den Stromsektor bedingten Änderungen als auch durch die Energiewende insgesamt) zeichnen sich somit allesamt durch zusätzliche

Stromproduktion aus Windenergie und ihre geographische Lage im windreichen Norden von Deutschland aus.

Die neuen Bundesländer Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen weisen für 2030 relative Abweichungen der Wertschöpfung auf, die über dem nationalen Wert von 1,4% liegen. Die Produktion aus erneuerbaren Energien (PV und Wind) ist in diesen Regionen im Vergleich zum Referenzszenario höher, und Verluste durch eine geringere Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen sind von untergeordneter Bedeutung.

In Brandenburg zeigen sich negative Wirkungen auf die Wertschöpfung in 2030, allerdings nur, wenn die Transformation im Handlungsfeld Strom separat betrachtet wird. Dies ist auf die geringere Stromproduktion aus Braunkohle und den damit verbundenen Rückgang des Braunkohleabbaus zurückzuführen, der durch die positiven Effekte aus dem Ausbau der Solarenergie in dieser Region nicht ausgeglichen werden kann. Berücksichtigt man jedoch zusätzlich die wirtschaftlichen Impulse der Energiewende im Wärme- und Verkehrsbereich, so sind die Nettoeffekte für Brandenburg insgesamt positiv. Darüber hinaus bietet der Rückgang des Braunkohleabbaus der Region auch alternative Entwicklungsmöglichkeiten etwa im Bereich des Tourismus, die in der vorliegenden Analyse jedoch unberücksichtigt bleiben.

In Baden-Württemberg, Hessen und insbesondere im Saarland führt die Energiewende zu negativen Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekten im Bereich der Stromerzeugung. Die positiven Wirkungen der Transformation im Stromsektor kompensieren (Saarland) oder überkompensieren (Baden-Württemberg und Hessen) jedoch die negativen Wirkungen. Dies gilt erst recht, wenn auch die Veränderungen im Verkehrs- und Wärmesektor berücksichtigt werden.

In Nordrhein-Westfalen ist die Stromerzeugung aus Kohle und Braunkohle geringer als im Referenzszenario, aber die PV- und Gaskapazitäten sind höher. Die geringere Wertschöpfung im Bergbausektor wird durch positive Effekte im Strombereich und in anderen Wirtschaftszweigen ausgeglichen. Die absolute Abweichung der Wertschöpfung im Energiewendeszenario im Vergleich zur Referenz ist in diesem Bundesland am größten. Dies gilt sowohl für die durch die Veränderungen des Stromsystems bedingten Effekte als auch insgesamt. Abschnitt 6.3 enthält eine detailliertere Beschreibung und Interpretation der Auswirkungen auf Nordrhein-Westfalen.

Die Abweichung der Wertschöpfung in Bayern im Energiewendeszenario im Vergleich zur Referenz ist absolut gesehen die zweitgrößte und relativ betrachtet leicht unter dem nationalen Wert. Die installierten Kapazitäten von PV, Wind und Gas sind höher als im Referenzszenario, bei Steinkohle dagegen niedriger. In Berlin sind die installierten Kapazitäten von PV-Aufdachanlagen und Gas höher als im Referenzszenario, aber niedriger bei

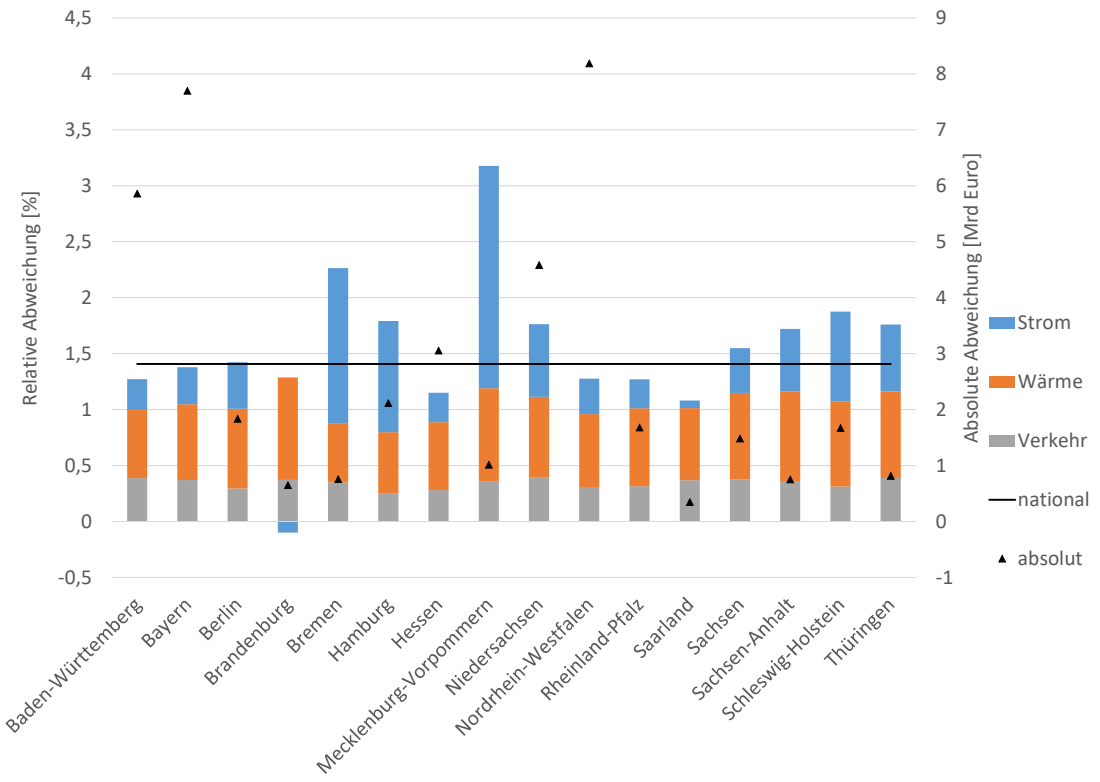



Abbildung 6.3.: Abweichung der Wertschöpfung nach Regionen im Energiewendeszenario im Vergleich zur Referenz in 2030. Die linke Achse zeigt die relative Abweichung in Prozent, differenziert nach Strom, Wärme, Verkehr, Gesamteffekt und nationalem Gesamteffekt. Die rechte Achse zeigt die entsprechenden absoluten Abweichungen in Milliarden Euros.

Stein- und Braunkohle. Die Nettoeffekte sind für alle Wirtschaftsbereiche in Berlin positiv, wobei die relative Abweichung der Wertschöpfung etwa dem nationalen Wert entspricht. In Rheinland-Pfalz sind installierten Kapazitäten zur Stromerzeugung aus Wind und Gas höher, für PV niedriger als im Referenzszenario.[5] Leichte negative Auswirkungen auf das verarbeitende Gewerbe werden durch positive Auswirkungen in anderen Wirtschaftsbereichen ausgeglichen.

[5]Dieses Modellergebnis von Enertile zeigt, dass unter den Bedingungen des Energiewendeszenarios im Vergleich zum Referenzszenario eine andere regionale Verteilung der installierten PV-Kapazitäten optimal ist. Die gesamte installierte PV-Kapazität ist im Energiewendeszenario höher.

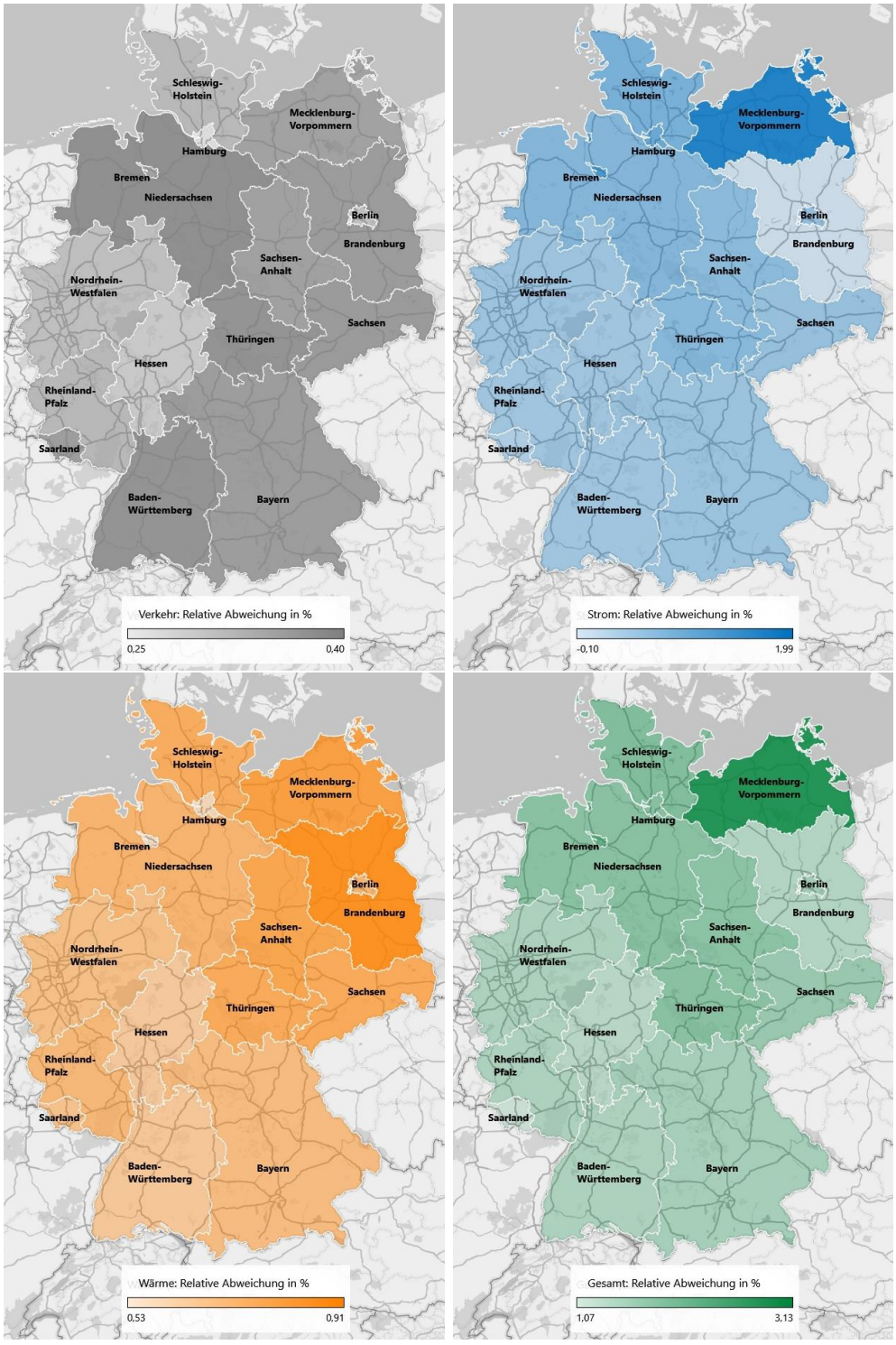



Abbildung 6.4.: Relative Abweichung der Wertschöpfung nach Regionen im Energiewendeszenario im Vergleich zur Referenz in 2030 in Prozent, differenziert nach Verkehr (Karte links oben), Strom (Karte rechts oben), Wärme (Karte links unten) und Gesamteffekt (Karte rechts unten).

### 6.2.2. Beschäftigung

Die relative Abweichung der Beschäftigung in den Regionen ist in Abbildung 6.5 und zusätzlich kartographisch in Abbildung 6.6 dargestellt. Die Auswirkungen hängen davon ab, wo und in welchen Wirtschaftsbereichen die Wertschöpfung steigt oder sinkt, und wie beschäftigungsintensiv diese Wirtschaftsbereiche in der jeweiligen Region sind. In vielen Regionen sind die Beschäftigungseffekte ähnlich groß wie die Wertschöpfungseffekte, und auch die regionale Verteilung ist ähnlich. Einige Aspekte sind jedoch zu beachten.

Energieeffizienzmaßnahmen in Gebäuden erhöhen die Mieten und die Wertschöpfung des Grundstücks- und Wohnungswesens, nicht aber die Beschäftigung in diesem Bereich. So ist die relative Abweichung der Beschäftigung in allen Regionen geringer als die relative Abweichung der Wertschöpfung, wenn man nur die Energiewende im Wärmesektor betrachtet. Am stärksten wirkt sich dies in den Stadtstaaten Berlin und Hamburg aus.

Die durch die Energiewende im Verkehrssektor bedingte relative Abweichung der Beschäftigung ist ähnlich groß oder höher als die relative Abweichung der Wertschöpfung. Dies liegt daran, dass ein Großteil der zusätzlichen Wertschöpfung auf den beschäftigungsintensiven Bausektor entfällt.

Betrachtet man nur die durch die Veränderung des Stromsystems bedingten Effekte, so ist die relative Abweichung der Beschäftigung geringer als die Abweichung der Wertschöpfung. Dies gilt insbesondere für die Bundesländer, in denen ein Großteil der zusätzlichen Wertschöpfung auf die Elektrizitätsversorgung entfällt, beispielsweise Hamburg und Bremen, und liegt daran, dass die Beschäftigungsintensität dieses Produktionsbereichs eher gering ist bzw. die Arbeitsproduktivität hoch. Ein Großteil der Wertschöpfung (und des Einkommens) ist kapitalbezogen (Abschreibungen, Gewinne), und Löhne spielen eine untergeordnete Rolle. In Brandenburg dreht sich das Vorzeichen sogar um: Während die Wertschöpfungseffekte durch die Veränderung des Stromsystems leicht negativ sind, sind die Beschäftigungseffekte hingegen positiv. Dies liegt daran, dass die Veränderungen im Stromsystem gleichzeitig negative Effekte im weniger beschäftigungsintensiven Energiesektor und positive Effekte im beschäftigungsintensiven Baugewerbe bewirken. Die negativen Effekte dominieren die Wertschöpfung, die positiven die Beschäftigung.

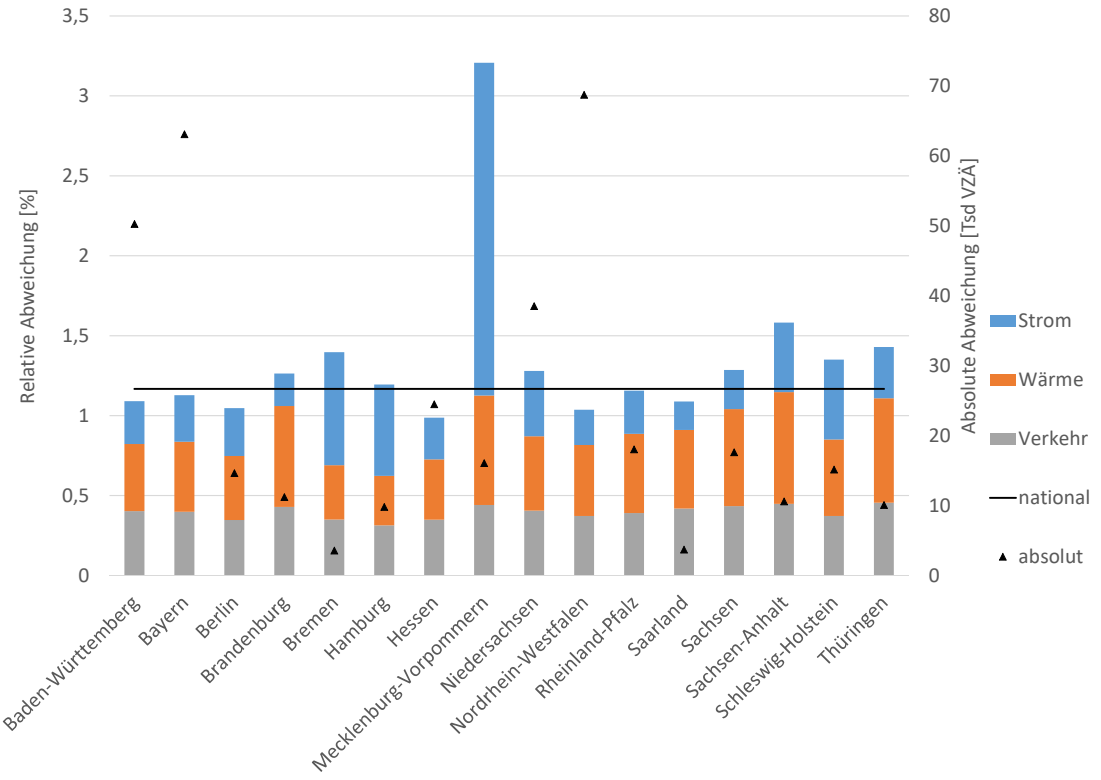



Abbildung 6.5.: Abweichung des Arbeitskräftebedarfs nach Regionen im Energiewendeszenario im Vergleich zur Referenz in 2030. Die linke Achse zeigt die relative Abweichung in Prozent, differenziert nach Strom, Wärme, Verkehr und nationalem Gesamteffekt. Die rechte Achse zeigt die entsprechenden absoluten Abweichungen in Tausend Vollzeitäquivalenten.

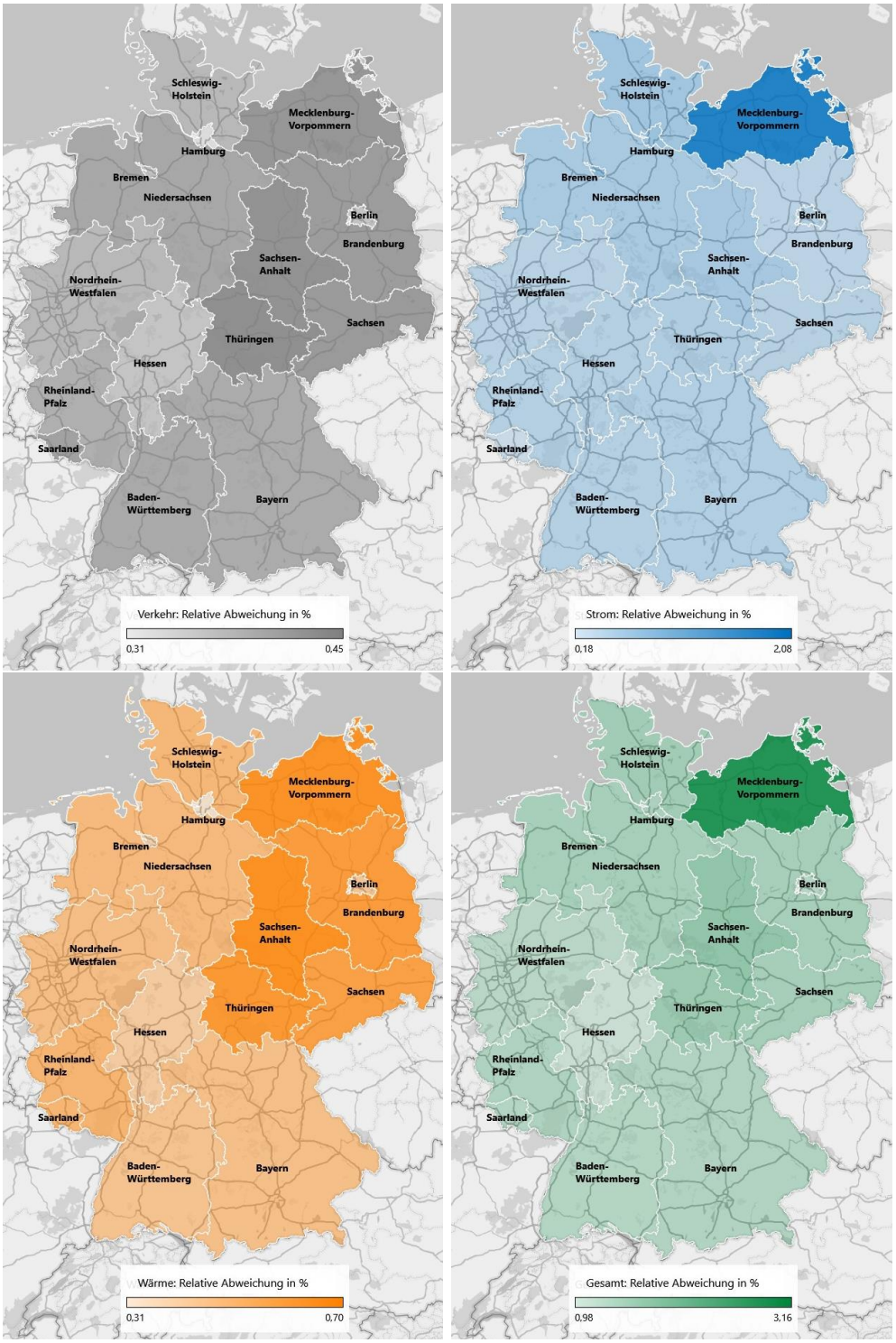



Abbildung 6.6.: Relative Abweichung des Arbeitskräftebedarfs nach Regionen im Energiewendeszenario im Vergleich zur Referenz in 2030 in Prozent, differenziert nach Verkehr (Karte links oben), Strom (Karte rechts oben), Wärme (Karte links unten) und Gesamteffekt (Karte rechts unten).

### 6.2.3. Verteilungswirkung

Die linke Karte in Abbildung 6.8 zeigt die regionale Verteilung der Bruttowertschöpfung pro Kopf zu Beginn des Szenariozeitraums. Es fällt auf, dass die weniger produktiven Bundesländer vor allem im Osten und Norden von Deutschland zu finden sind. In Abbildung 6.7 sind die Regionen nach aufsteigender Bruttowertschöpfung pro Kopf im Jahr 2010 von links nach rechts angeordnet (blaue Linie und rechte Achse) . Die relative Abweichung der regionalen Wertschöpfung zwischen Energiewendeszenario und Referenz in 2030 in Prozent ist ebenfalls in den Abbildungen dargestellt (orangene Balken, linke Achse in Abbildung 6.7 bzw. rechte Karte in Abbildung 6.8). Abbildung 6.7 enthält zusätzlich noch den entsprechenden nationalen Wert (1,4%, schwarze durchgezogene Linie) sowie den Mittelwert der regionalen Abweichungen (1,6%, schwarze, gestrichelte Linie).

Der Vergleich der regionalen Wertschöpfungsabweichungen mit der regionalen Wertschöpfung pro Kopf zu Beginn des Szenariozeitraums zeigt deutlich, dass (mit Ausnahme von Brandenburg und Sachsen[6]) vor allem die weniger produktiven Volkswirtschaften der nord- und ostdeutschen Bundesländer überdurchschnittlich profitieren, während die produktiveren westlichen und südlichen Bundesländer eine unterdurchschnittliche Zunahme verzeichnen. Unter den gegebenen Modell- und Szenarioannahmen könnte die Energiewende daher zu einer Konvergenz der Wirtschaftskraft deutscher Regionen beitragen. Es sollte jedoch beachtet werden, dass die im Modell umgesetzte Dynamik der Top-down-Verteilung der Wertschöpfung in Abhängigkeit von der regionalen Verteilung der Erwerbspersonen bereits in der Referenz zu einer steigenden Ungleichverteilung der Wertschöpfung führt. Der ausgleichende Effekt der Energiewende ist im Vergleich hierzu sehr gering.

[6] Für Sachsen gilt der spezielle Fall, dass die relative Änderung der Wertschöpfung über dem nationalen Wert von 1,4% liegt, jedoch unter dem Mittelwert aus den relativen Abweichungen der einzelnen Regionen von 1,6%.

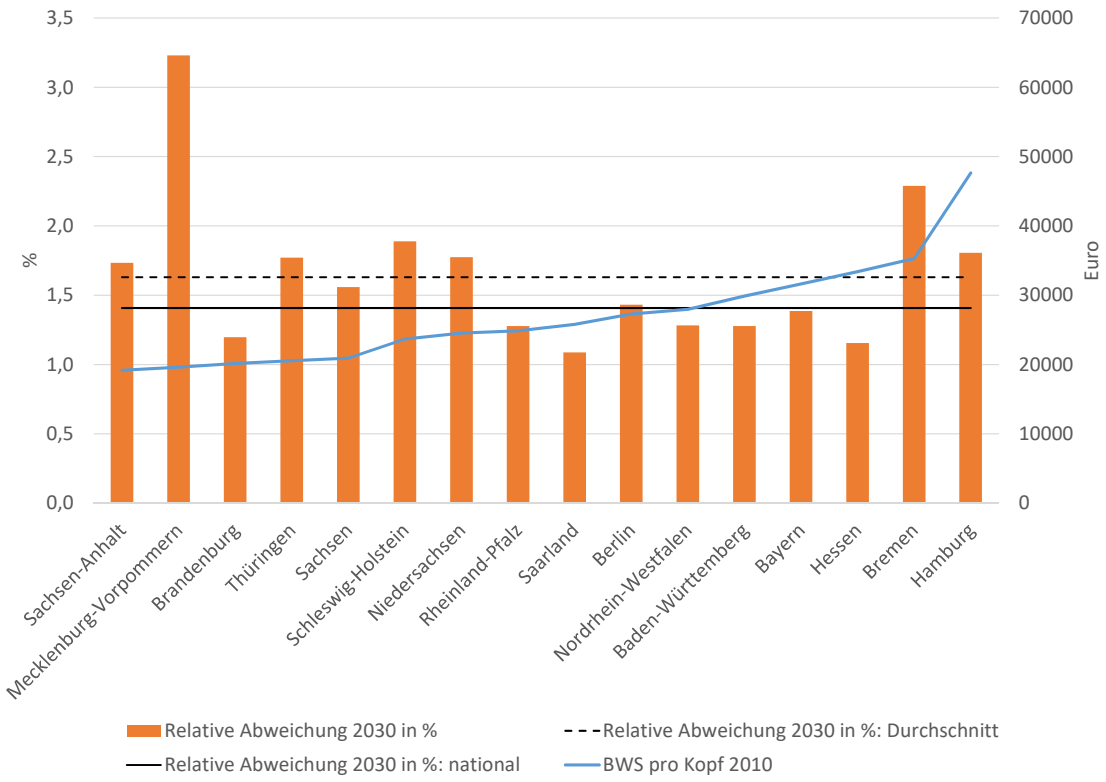



Abbildung 6.7.: Relative Abweichung der Wertschöpfung im Energiewendeszenario im Vergleich zur Referenz in 2030: differenziert nach Regionen (rote Balken, linke Achse), national (schwarze Linie, linke Achse) und Durchschnitt der regionalen Werte (schwarze gestrichelte Linie, linke Achse). Regionen geordnet nach Wertschöpfung pro Kopf im Jahr 2010 (blaue Linie, rechte Achse).

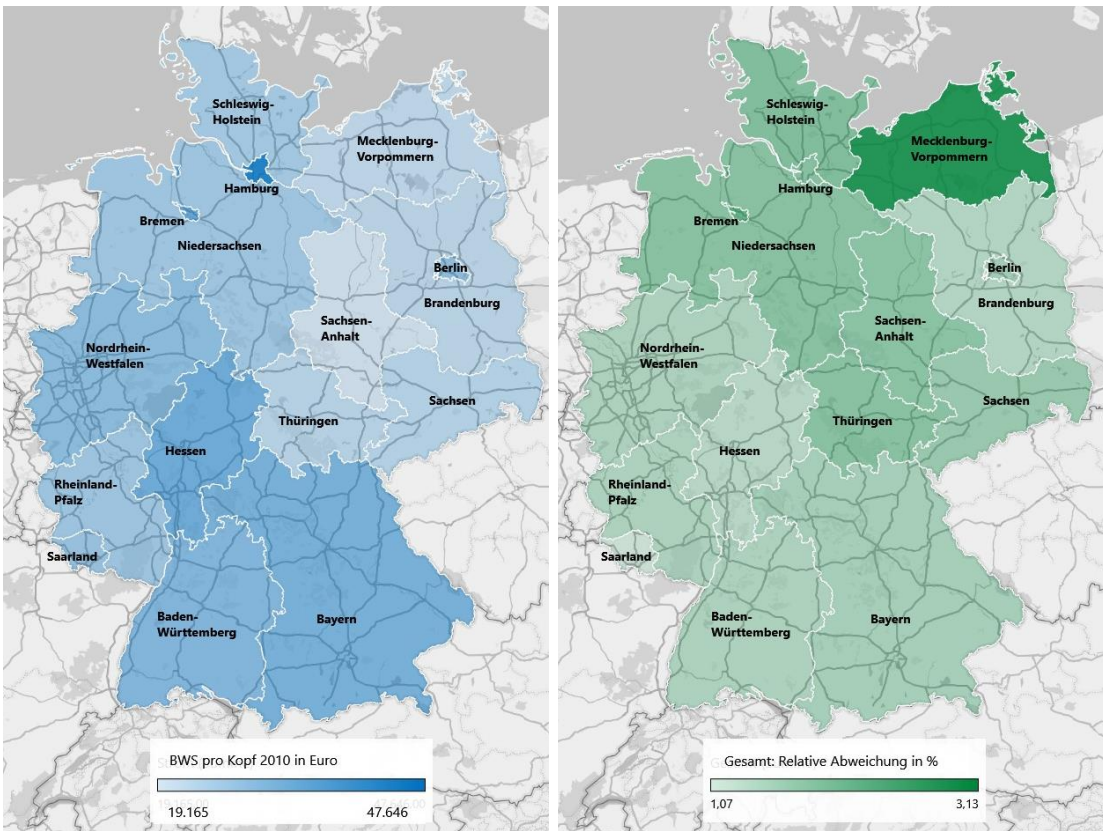



Abbildung 6.8.: Bruttowertschöpfung pro Kopf in 2010 in Euro (linke Karte) und relative Abweichung der Wertschöpfung im Energiewendeszenario im Vergleich zur Referenz in 2030 in Prozent (rechte Karte).

## 6.3. Detaillierte Analyse für zwei exemplarische Regionen

In dieser Arbeit steht die regionale Verteilung und nicht die Wirkung auf einzelne Regionen im Vordergrund. Die Betrachtung einzelner Regionen kann jedoch das Verständnis des Modellierungsansatzes verbessern und die Interpretation der Ergebnisse vereinfachen. In diesem Abschnitt wird die regionale Verteilung der Bottom-up-Impulse näher beschrieben und deren Auswirkungen auf zwei Bundesländer dargestellt: Nordrhein-Westfalen (NW) und Mecklenburg-Vorpommern (MV). Die Bevölkerungsdichte in Nordrhein-Westfalen ist mit einem Anteil von rund 22% an der Gesamtbevölkerung sehr hoch, die in Mecklenburg-Vorpommern mit einem Anteil von nur 2% an der Gesamtbevölkerung gering. Der Anteil Nordrhein-Westfalens an der gesamten deutschen Wertschöpfung entspricht seinem Bevölkerungsanteil, während er für MV, als eine der Regionen mit der geringsten Wertschöpfung pro Kopf mit 1,4% niedriger ist als der Bevölkerungsanteil. Während der Anteil Nordrhein-Westfalens an Bevölkerung und BIP bis 2030 leicht abnimmt, verzeichnet MV im Referenzszenario einen relativ starken Rückgang von etwa 10% (vgl. Sievers, Breitschopf et al., 2019, Tabelle 2 im Anhang).

Die beiden Bundesländer sind nicht nur aufgrund ihrer Größe und Wirtschaftskraft interessante Beispiele. Sie unterscheiden sich auch hinsichtlich ihrer ökonomischen Struktur sowie bezüglich des regionalen Technologiemix zur Stromerzeugung. Diese Aspekte sind sowohl für die Top-down-Verteilung der sektoralen Wertschöpfung als auch für die direkte regionale Zuordnung von Bottom-up-Impulsen relevant. Beide Aspekte werden in den folgenden Unterabschnitten behandelt.

### 6.3.1. Regionale Verteilung der Bottom-up-Impulse

#### 6.3.1.1. Investitionen in Stromerzeugungstechnologien

Wie in Kapitel 3 beschrieben, ist der Kapazitätsausbau je Technologie Output des Modells EnerTile, welcher dann in einen monetären Wert, d.h. Investitionen, transformiert wird. Die Investitionen werden in Komponenten aufgeteilt und jede Komponente wird sowohl Wirtschaftszweigen als auch regionalen Kategorien zugeordnet. Tabelle 6.1 zeigt die Zuordnung der spezifischen Investitionen je Technologie zu regionalen Kategorien (rtyp=1: Region der Stromerzeugung, rtyp=2: Region der Hauptthersteller, rtyp=3: ohne regionale Zuordnung, d.h. Top-down-Verteilung greift hier, rtyp=4: Importe). Die Tabelle basiert auf der Zerlegung der Technologien in einzelne Komponenten, diese hoch aufgelösten Tabellen finden sich in Kapitel 3.

Tabelle 6.1.: Spezifische Investitionen in Stromerzeugungstechnologien und Zuordnung zu regionalen Kategorien

| Technologie | $I^{spez}$ in Euro/kW | rtyp 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|---|
| PV-Aufdachanlage | 1250 | 0,45 | 0,25 | 0,08 | 0,21 |
| PV-Freiflächenanlage | 920 | 0,36 | 0,24 | 0,10 | 0,30 |
| Onshore-Wind | 1525 | 0,2 | 0,8 | 0 | 0 |
| Offshore-Wind | 3314 | 0,54 | 0,35 | 0,11 | 0 |
| Erdgas | 950 | 0,14 | 0 | 0,86 | 0 |
| Steinkohle | 1700 | 0,14 | 0 | 0,86 | 0 |
| Braunkohle | 1900 | 0,14 | 0 | 0,86 | 0 |

Nur Investitionen, die den regionalen Kategorien 1 und 2 zugeordnet sind, werden direkt verteilt. Bei der Zuteilung wird der regionale Technologiemix bzw. die regionale Verteilung der wichtigsten Hersteller berücksichtigt.

**Zuteilung basierend auf dem regionalen Technologiemix** MV und NW lassen sich hinsichtlich der Stromerzeugung in den beiden Szenarien im Jahr 2030 wie folgt beschreiben (siehe Abbildungen 2.10 und 2.10 in Kapitel 2): Im Energiewendeszenario spielt MV bei Offshore-Wind eine wichtige Rolle, mit einer zusätzlichen Kapazität von mehr als 4 GW im Vergleich zur Referenz. Basierend auf der Lage der Versorgungshäfen der geplanten Projekte, kann der Großteil der Offshore-Installation dieser Region zugeordnet werden. Andere Technologien sind von geringerer Bedeutung in dieser Region.

In NW liegt die installierte Kapazität für Stromerzeugung aus Steinkohle und insbesondere aus Braunkohle im Energiewendeszenario deutlich unter der Referenz (um 1 GW bzw. 3 GW). NW ist das Bundesland mit dem größten Anteil an diesen Technologien und erfährt somit auch den größten Rückgang im Energiewendeszenario. Im Gegensatz dazu ist die installierte Kapazität der PV-Aufdachanlagen im Energiewendeszenario um mehr als 6 GW höher als im Referenzszenario. Keine andere Region erfährt einen so starken Ausbau der Photovoltaik. Außerdem liegt die installierte Kapazität von Gaskraftwerken im Energiewendeszenario etwa 2 GW höher als in der Referenz. Auch hier zeigt keine andere Region eine solch große Abweichung zwischen den Szenarien.

Ein Großteil der spezifischen Investitionen in Offshore-Windenergieanlagen und Photovoltaik (insbesondere Aufdachanlagen) wird der regionalen Kategorie 1, Region der Stromerzeugung, zugewiesen (vgl. Tabelle 6.1). Dies trifft insbesondere auf Planung und Installation zu. Im Gegensatz dazu wird nur ein kleiner Teil der spezifischen Investitio-

nen in Onshore-Windenergieanlagen und Anlagen zur Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern der regionalen Kategorie 1 zugeordnet. MV profitiert somit vom Ausbau der Offshore-Windenergieanlagen. NW erhält einen positiven Impuls durch den Ausbau von Photovoltaik und (nachgeordnet) Gas. Die negative Wirkung der geringeren Investitionen in Braun- und Steinkohle in NW wird durch diese positiven Effekte überkompensiert.

**Zuteilung basierend auf der regionalen Verteilung der Hauptthersteller** Photovoltaik und Wind (Onshore und Offshore) haben den größten Anteil am Investitionsimpuls. Für diese Technologien wird eine Verteilung der Hauptthersteller berücksichtigt, die auf Literaturrecherche (Branchenzeitschriften, Marktinformationen von Germany Trade and Invest, EEG Erfahrungsberichte) und Expertenbefragung beruht. Kapitel 3 enthält detaillierte Tabellen hierzu. Für alle anderen Technologien wird anstelle der direkten regionalen Zuordnung eine Top-down-Verteilung gewählt. Dies impliziert die Annahme, dass die regionale Verteilung der wichtigsten Hersteller der regionalen Verteilung der Produktion eines durchschnittlichen Gutes im entsprechenden Wirtschaftszweig entspricht.

9% der Investitionen, die den Hauptherstellern von Onshore-Windenergieanlagen zugeordnet sind, gehen an MV (basierend auf dem Marktanteil des Hersteller Nordex, der dort seinen Standort hat). Keiner der für die Verteilung berücksichtigten Hauptthersteller von Offshore-Windenergieanlagen befindet sich in MV. Der Anteil der Hauptthersteller für Photovoltaik-Komponenten, der auf MV entfällt, ist vernachlässigbar. Keiner der Hersteller, die für Onshore- und Offshore-Windenergieanlagen berücksichtigt wurden, hat einen Standort in NW. Im Gegensatz dazu erfolgt die Fertigung vieler Photovoltaik-Komponenten in NW (Wechselrichter 19%, Kabel 25%, Steckverbindungen 26%, Montage System 18%).

#### 6.3.1.2. Stromerzeugung: Vorleistungen, Wertschöpfung, Beschäftigung

Installierte Kapazität je Technologie und Region und durchschnittliche Volllaststunden je Technologie (ohne regionale Differenzierung) sind Output des Modells EnerTile. Sie werden, wie in Kapitel 3 ausführlich beschrieben, in ökonomische Impulse transformiert.

- Vorleistungen für die Stromerzeugung nach Gütergruppen und teilweise regional zugewiesen
- Wertschöpfung des Produktionsbereiches Elektrizitätsversorgung nach Regionen
- Beschäftigung im Produktionsbereich Elektrizitätsversorgung nach Regionen

**Direkt regional zugewiesene Vorleistungen** Für die Vorleistungen wird ein ähnlicher Ansatz gewählt wie für die Investitionen. Es wird zwischen den regionalen Kategorien Region der Stromerzeugung, inländische Produktion ohne regionale Zuweisung und Importe unterschieden. Für Photovoltaik, Wind und Braunkohle wird etwa die Hälfte der Vorleistungen (42% bis 62%) der Region der Stromerzeugung zugewiesen, für Steinkohle und Erdgas ist der entsprechende Anteil auf Grund der hohen Importe von fossilen Energieträgern deutlich geringer (11% bzw. 5%).

Somit profitiert MV von der Nachfrage nach Vorleistungen für die Stromerzeugung mit Offshore-Wind. In NW wirkt sich die Nachfrage nach Vorleistungen für die Stromerzeugung mit Photovoltaik positiv aus. Auch die Vorleistungen für die Stromerzeugung mit Gas erzeug einen positiven Effekt, jedoch in wesentlich geringerem Ausmaß. Negative Effekte entstehen hingegen durch die zurückgehende Nachfrage nach Vorleistungen für die Stromerzeugung aus Braunkohle und (deutlich nachgelagert) Steinkohle.

**Direkt regional zugewiesene Wertschöpfung** Die Wertschöpfung aus der Stromerzeugung beinhaltet Arbeitnehmerentgelte, Abschreibungen und Gewinne der Betreibergesellschaft. Für die einzelnen Wertschöpfungskomponenten basieren die spezifischen Werte pro installierter Kapazität einer Technologie auf Literatur. Die Wertschöpfung aus der Stromerzeugung wird der Region des Betreibers zugewiesen. Mit Ausnahme von Offshore-Wind wird unterstellt, dass dies der Region der Stromerzeugung entspricht. Stromerzeugung mit Photovoltaik und in geringerem Maße Erdgas leisten somit einen positiven Beitrag zur Wertschöpfung in NW. Die verringerte Stromerzeugung aus Kohle und Braunkohle wirkt sich hingegen negativ aus.

Die regionale Verteilung der Betreiber von Offshore-Windenergieanlagen basiert auf Stiftung Offshore (2019). Wie oben beschrieben, spielt Stromerzeugung mit Offshore-Wind im Energiewendeszenario eine wichtige Rolle in MV und die Region profitiert von der Nachfrage nach Investitionsgütern und Vorleistungen. Bemerkenswerterweise sitzt jedoch keine der Betreibergesellschaften in MV, sodass die Region an der direkten Wertschöpfung aus der Stromproduktion keinen Anteil hat. Im Gegensatz dazu erhält NW, obwohl es nicht an der Küste liegt, immerhin noch 4.5% der Wertschöpfung.

**Direkt regional zugewiesene Beschäftigung** Der Arbeitskräftebedarf im Produktionsbereich Stromerzeugung basiert auf spezifischen Werten je installierter Kapazität und wird der Region der Energieerzeugungsanlage zugewiesen.

**Anmerkung zur Stromerzeugung** Der Produktionsbereich 29 der Input-Output-Tabelle beinhaltet Stromversorgung (NACE 35.1, bestehend aus Stromerzeugung 35.11, Übertragung 35.12, Verteilung 35.13 und Handel 35.14) sowie Wärme- und Kälteversorgung (NACE 35.3). Die obigen Ausführungen zur direkten regionalen Wirkung beziehen sich lediglich auf die Stromerzeugung (NACE 35.11). Es wird unterstellt, dass die Produktionsstruktur der anderen Bereiche unverändert bleibt. Diese sind im makroökonomischen Kern des Modells enthalten und die Wertschöpfung wird mittels Top-down-Verteilung den einzelnen Regionen zugewiesen.

#### 6.3.1.3. Resultierender direkt zugewiesener ökonomischer Impuls

Abbildung 6.9 zeigt für die Regionen MV bzw. NW die absolute Abweichung zwischen den Szenarien hinsichtlich der direkt zugewiesenen ökonomischen Impulse. Investitionen, Vorleistungen und Wertschöpfung aus der Stromerzeugung werden aufgeteilt nach vier Gruppen von Energieträgern dargestellt. Die Abbildungen verdeutlichen die obigen Ausführungen: MV erhält insbesondere einen positiven Effekt durch den im Energiewendeszenario deutlich stärkeren Ausbau von Windenergieanlagen. NW profitiert insbesondere von der Stromerzeugung mit Photovoltaikanlagen und (nachrangig) aus Erdgas und ist durch die geringere Stromerzeugung aus Steinkohle und insbesondere Braunkohle negativ betroffen.

### 6.3.2. Top-down-Verteilung von Wertschöpfung

Die Anteile von MV und NW an der sektoralen Wertschöpfung im Jahr 2030, die für die Top-down-Verteilung angewendet und wie in Abschnitt 5.4 beschrieben bestimmt wurden, sind in der Tabelle 6.2 aufgeführt. MV weist in den meisten Wirtschaftsbereichen nur sehr geringe Anteile an der bundesweiten Wertschöpfung von rund 1% auf. Im verarbeitenden Gewerbe sind die entsprechenden Anteile sogar noch geringer. Dahingegen ist die Landwirtschaft mit einem Anteil von 4.1% an der bundesweiten Wertschöpfung vergleichsweise stark. Auch die Tourismuswirtschaft und die öffentliche Verwaltung zeigen mit jeweils 2.2% etwas höhere Wertschöpfungsanteile als die anderen Wirtschaftsbereiche. NW ist eine ökonomisch starke und bevölkerungsreiche Region mit Anteilen an der bundesweiten Wertschöpfung von etwa 22% in den einzelnen Wirtschaftsbereichen. In einigen Bereichen des Verarbeitenden Gewerbes wie der Herstellung chemischer Erzeugnisse und Metalle weist NW Anteile von 32% auf. Ähnlich hohe Anteile verzeichnet die Region bei den Dienstleistungen der Strom- und Gasversorgung (32%) und bei Telekommunikationsdienstleistungen (31%). Der hohe Anteil des Strom- und Gassektors spiegelt die aktuelle regionale Verteil-

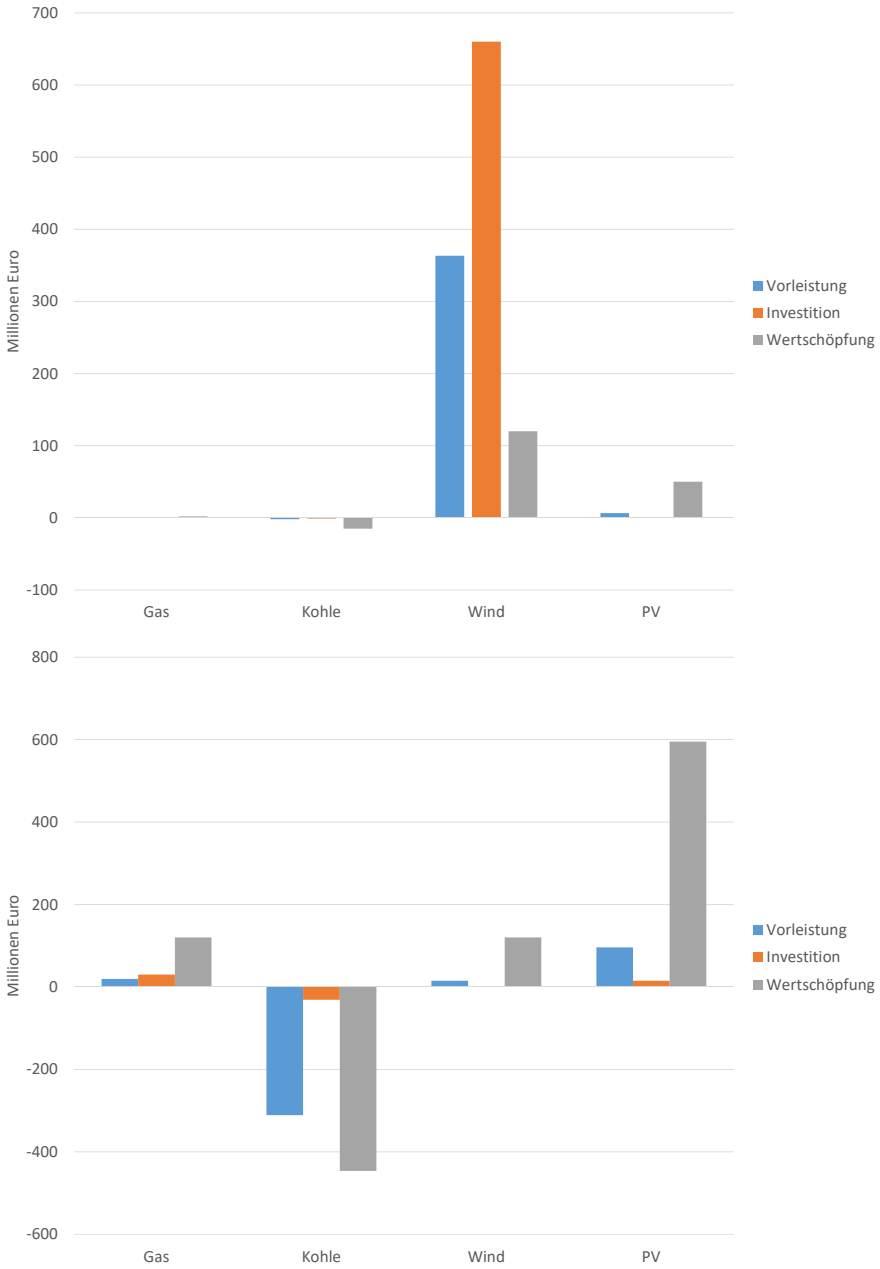



Abbildung 6.9.: Direkt regional zugewiesene Nachfrage nach Vorleistungen und Investitionsgütern und direkt regional zugewiesene Wertschöpfung aus der Stromerzeugung: Abweichung zwischen Energiewendeszenario und Referenzszenario im Jahr 2030, differenziert nach Technologien. Die obere Abbildung bezieht sich auf Mecklenburg-Vorpommern, die untere Abbildung auf Nordrhein-Westfalen.

lung der Wertschöpfung in diesem Sektor wider, die wie im Abschnitt 5.4 beschrieben weiterentwickelt wurde, jedoch noch ohne Integration von Bottom-up-Impulsen. Wie für alle anderen Branchen gilt die Top-down-Verteilung nur für die sektorale Wertschöpfung, die nicht direkt einer Region zugeordnet ist. Die Abweichung zwischen Energiewendeszenario und Referenz ist hierbei in der äußeren rechten Spalte der Tabelle 6.2 aufgeführt.

Tabelle 6.2.: Top-down-Verteilung: Wertschöpfungsanteil von MV und NW in 2030 je Wirtschaftsbereich und abgeschätzte Abweichung der nicht direkt regional zugewiesenen Wertschöpfung ($\Delta v$) zwischen EW und REF in Mio Euros

| Wirtschaftsbereich | MV | NW | $\Delta v$ |
|---|---|---|---|
| AA Landwirtschaft | 4,1% | 14% | 262 |
| BA Bergbau | 0,4% | 12% | -239 |
| CA Nahrungsmittel | 1,9% | 20% | -102 |
| CB Textilien | 0,3% | 26% | -19 |
| CC Holz, Papier, Druckerzeugnisse | 1,1% | 23% | 24 |
| CD Kokerei und Mineralölerzeugnisse | 0,0% | 24% | -310 |
| CE Chemische Erzeugnisse | 0,4% | 32% | -289 |
| CF Pharmazeutische Erzeugnisse | 0,1% | 10% | 86 |
| CG Kunststoffe Glas Keramik | 0,5% | 20% | 425 |
| CH Metalle und Metallprodukte | 0,8% | 32% | 282 |
| CI Datenverarbeitungsgeräte, elektronische und optische Erzeugnisse | 0,3% | 11% | 49 |
| CJ Elektrische Ausrüstungen | 0,3% | 24% | 1241 |
| CK Maschinen | 0,4% | 22% | 606 |
| CL Fahrzeuge | 0,2% | 7% | 1556 |
| CM Möbel, Reparatur / Installation von Maschinen u. Ausrüstungen | 0,6% | 19% | 73 |
| DA Energieversorgung | 0,9% | 32% | -126 |
| EA Wasserversorgung, Entsorgung | 1,6% | 28% | 64 |
| FA Baugewerbe | 1,5% | 19% | 9440 |
| GA Handel; Instandhaltung und Reparatur von KfZ | 0,9% | 25% | 1094 |
| HA Verkehr und Lagerei | 1,3% | 19% | 691 |
| IA Gastgewerbe | 2,2% | 18% | -71 |
| JA Verlagswesen, audiovisuelle Medien, Rundfunk | 0,5% | 21% | 64 |
| JB Telekommunikation | 0,7% | 31% | 23 |
| JC IT- und Informationsdienstleistungen | 0,3% | 21% | 213 |
| KA Finanz- und Versicherungsdienstleistungen | 0,5% | 22% | 582 |
| LA Grundstücks- und Wohnungswesen | 1,2% | 23% | 12627 |
| MA Freiberufliche und technische Dienstleistungen | 0,5% | 24% | 717 |
| MB Forschung und Entwicklung | 1,5% | 21% | 141 |
| MC Sonstige freiberufliche, wissenschaftliche u. technische DL | 0,4% | 23% | 235 |
| NA Sonstige Unternehmensdienstleistungen | 1,1% | 23% | 908 |
| OA Öffentliche Verwaltung, Verteidigung; Sozialversicherung | 2,2% | 21% | 2523 |
| PA Erziehung und Unterricht | 1,3% | 22% | 1682 |
| QA Gesundheitswesen | 1,5% | 23% | 1702 |
| QB Heime und Sozialwesen | 1,6% | 24% | 724 |
| RA Kunst, Unterhaltung und Erholung | 1,1% | 22% | 221 |
| SA Sonstigen Dienstleister a.n.g. | 1,4% | 23% | 356 |
| TA Private Haushalte | 0,4% | 27% | -24 |

### 6.3.3. Regionale und sektorale Wertschöpfung inklusive Bottom-up-Impulse

Die absolute Abweichung der Wertschöpfung zwischen den Szenarien durch direkt regional zugeordnete ökonomische Impulse ist in Abbildung 6.10 dargestellt. Diese wird wie im Abschnitt 5.3 beschrieben bestimmt. Die daraus resultierende Abweichung der aggregierten Wertschöpfung für NW und MV zwischen den Szenarien integriert zusätzlich die top-down verteilte Wertschöpfung, wie im Abschnitt 5.5 beschrieben. Während die absolute Abweichung der direkt zugeordneten Wertschöpfung für NW und MV in ihrer Größe vergleichbar ist, ist dies bei der top-down verteilten Wertschöpfung wie zuvor erläutert nicht der Fall. Abbildung 6.11 zeigt daher die relative Abweichung der aggregierten Wertschöpfung in NW und MV des Energiewendeszenarios im Vergleich zur Referenz. Hier wird deutlich: die relative Abweichung der Wertschöpfung zwischen den Szenarien durch direkt regional zugeordnete ökonomische Impulse spielt in NW kaum eine Rolle (unter 0,1%), die Ergebnisse in dieser Region werden durch die Top-down-Verteilung dominiert. In MV hingegen sind die Effekte aus der Bottom-up-Zuweisung und aus der Top-down-Verteilung etwa gleichermaßen relevant.

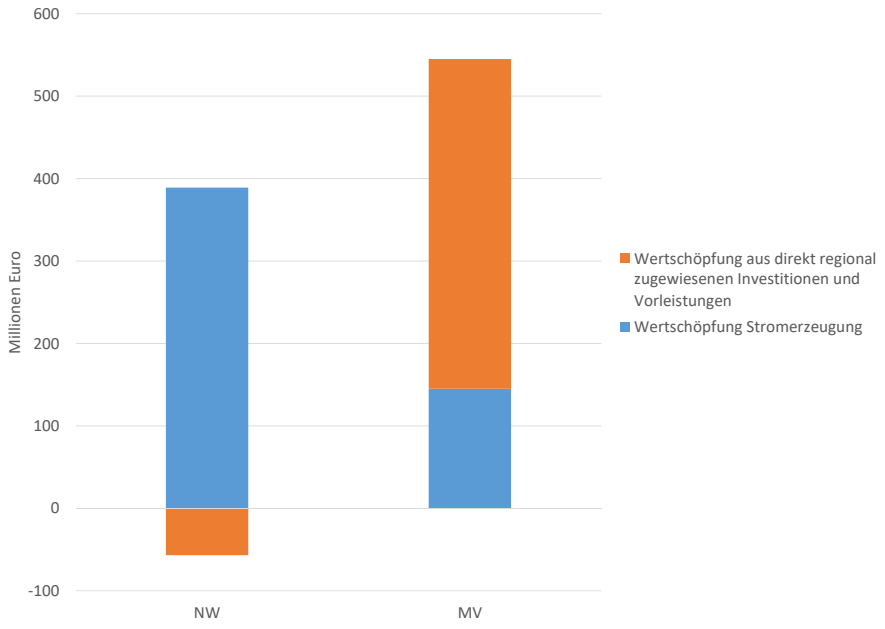



Abbildung 6.10.: Direkt Mecklenburg-Vorpommern und Nordrhein-Westfalen zugewiesene Wertschöpfung: Absolute Abweichung zwischen Energiewendeszenario und Referenzszenario im Jahr 2030 in Mio Euro

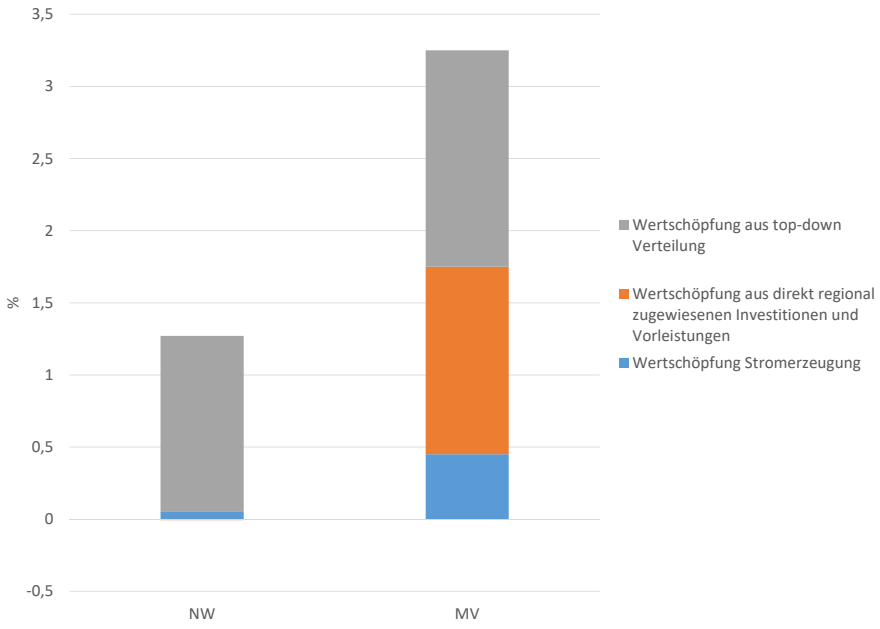



Abbildung 6.11.: Aggregierte Wertschöpfung in Mecklenburg-Vorpommern und Nordrhein-Westfalen: Relative Abweichung zwischen Energiewendeszenario und Referenzszenario im Jahr 2030 in Prozent

# 7. Zusammenfassung und Ausblick

## 7.1. Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit ist es, die gesamtwirtschaftliche Wirkung, das heißt die Nettowirkung der Energiewende auf Beschäftigung und Wertschöpfung und deren Verteilung auf Regionen und Wirtschaftsbereiche ex-ante bis zum Jahr 2030 abzuschätzen.

Hierfür wird ein integrierter Modellierungsansatz genutzt, der auf zwei verschiedenen Szenarien aufbaut. Ein Referenzszenario und ein Energiewendeszenario beschreiben den sozioökonomischen und politischen Rahmen. Inputs aus aufeinander abgestimmten Energieangebots- und Energienachfragemodellen werden in ökonomische Impulse transformiert. Deren Wirkung auf Produktion, Wertschöpfung und Beschäftigung wird im makroökonomischen Kern des Modells über verschiedene Wirkungszusammenhänge (direkte, indirekte und induzierte Effekte) abgebildet. Der makroökonomische Kern lässt sich vereinfacht als teilweise geschlossenes Input-Output-Mengenmodell beschreiben, welches in einer System-Dynamics-Umgebung implementiert wird. Die regionale Verteilung basiert auf einem hybriden Ansatz: ein Teil der Impulse wird direkt einzelnen Regionen zugewiesen und die darauf entfallende Wertschöpfung berechnet. Sie wird ergänzt durch (nicht direkt regional zugewiesene) Wertschöpfung aus dem makroökonomischen Kern, die mittels eines sich dynamisch entwickelnden Schlüssels top-down auf die Regionen verteilt wird. Durch Vergleich der Modellergebnisse der beiden Szenarien kann die gesamtwirtschaftliche Wirkung der Energiewende, gemessen an Wertschöpfung und Beschäftigung, ermittelt werden.

Die Ergebnisse zeigen eine kleine, aber positive gesamtwirtschaftliche Wirkung der Energiewende: die Beschäftigung liegt im Energiewendeszenario in 2030 um 1,2% höher als im Referenzszenario, die aggregierte Wertschöpfung um 1,4%. Haupttreiber sind hierbei zusätzliche Investitionen insbesondere im Gebäudebereich, darüber hinaus wirkt sich auch die Substitution importierter fossiler Energieträger durch heimisch erzeugte Erneuerbare Energie positiv aus.

Das Modell ermöglicht eine Differenzierung der Impulse und entsprechend der resultierenden Effekte nach den Handlungsfeldern Strom und Industrie, Gebäudewärme und Verkehr. Aufgrund der Sektorkopplung und den zugrunde gelegten integrierten Szenari-

en ist die Zuweisung zu Handlungsfeldern aus methodischer Sicht jedoch nicht eindeutig und erfordert daher die vorgenommene transparente Darstellung. Den Modellergebnissen zufolge hat die Energiewende in den Handlungsfeldern Gebäudewärme und Verkehr einen höheren Anteil am positiven Effekt auf die Wertschöpfung als die Veränderungen im Stromsektor und beim industriellen Energieverbrauch. Die positiven Beschäftigungseffekte sind dagegen gleichmäßiger verteilt.

Im Hinblick auf die Verteilung der Wertschöpfung und Beschäftigung auf Wirtschaftsbereiche zeigt sich, dass die dominanten Effekte der nach Handlungsfeldern differenzierten Ergebnisse auch in den Gesamtergebnissen noch sichtbar sind. Dazu gehören ein starker relativer Wertschöpfungsrückgang des Bergbaus (Strom) und ein starker relativer Wertschöpfungsanstieg der Stromerzeugung (Strom), des Baugewerbes (hauptsächlich Wärme, aber auch Verkehr und teilweise Strom) und der Immobiliendienstleistungen (Wärme).

Die regionale Verteilung der Wertschöpfungseffekte ist für die exemplarisch gewählten Bundesländer Mecklenburg-Vorpommern und Nordrhein-Westfalen detailliert ausgewertet. Diese unterscheiden sich hinsichtlich ihres Anteils an der nationalen Bevölkerung, ihrer Wirtschaftskraft und Wirtschaftsstruktur und somit in drei Aspekten, die für die aus der Top-down-Verteilung resultierende Wertschöpfung relevant sind. Der von einander abweichende regionale Technologiemix ist für die direkt regional zugewiesenen Impulse von Bedeutung. Diese liegen in beiden Regionen in einer ähnlichen Größenordnung und werden sowohl durch Investitionen in neue Stromerzeugungskapazitäten als auch durch Vorleistungen für und Wertschöpfung aus der Stromerzeugung bestimmt. Im Vergleich zum Beitrag der top-down verteilten Wertschöpfung ist der Beitrag der direkt zugewiesenen Wertschöpfung im bevölkerungsreichen und wirtschaftsstarken Nordrhein-Westfalen jedoch gering. In Mecklenburg-Vorpommern, das einen deutlich geringeren Anteil an der gesamtdeutschen Wertschöpfungssteigerung erhält, sind die direkt zugewiesene und die top-down verteilte zusätzliche Wertschöpfung hingegen etwa ausgeglichen.

Alle Bundesländer verzeichnen positive Nettoeffekte auf Wertschöpfung und Beschäftigung durch die Energiewende. Lediglich die Wirkung auf Brandenburg mit der hohen Bedeutung der Braunkohle ist negativ, wenn die Veränderungen im Handlungsfeld Strom separat betrachtet werden. Generell führt die Transformation in diesem Handlungsfeld zur größten Bandbreite an Effekten und trägt so wesentlich zur Verteilung der Gesamteffekte bei. Die ökonomische Wirkung, die sich aus den Veränderungen in den Handlungsfeldern Energie und Gebäudewärme ergibt, ist hingegen gleichmäßiger verteilt. Die Gründe für die unterschiedlichen Ergebnisse sind vielschichtig, sie lassen sich wie für die zwei Beispielregionen gezeigt, anhand von Modellinputs und Ergebnissen im Detail analysieren. Die Wirkung auf die regionale Beschäftigung hängt von der Verteilung der Wertschöpfungsän-

derung auf die Produktionsbereiche in den einzelnen Regionen sowie von den regionalen und sektoralen Beschäftigungsintensitäten ab. In vielen Regionen sind die Abweichungen der Beschäftigung im Energiewendeszenario im Vergleich zur Referenz mit denen der Wertschöpfung vergleichbar. Dies trifft jedoch nicht auf Regionen zu, in denen der Wertschöpfungsanstieg zu großen Teilen auf das Grundstücks- und Wohnungswesen zurückzuführen ist, da dieser nicht beschäftigungswirksam ist. Dies ist insbesondere für die Stadtstaaten der Fall. Auch für Regionen, die ihren Wertschöpfungszuwachs zu großen Teilen im Bereich Stromerzeugung erfahren, fällt der relative Beschäftigungszuwachs geringer aus.

Der Vergleich der regionalen Wertschöpfungsabweichungen mit der aktuellen regionalen Wertschöpfung pro Kopf zeigt deutlich, dass (mit Ausnahme von Brandenburg und Sachsen) vor allem die weniger produktiven Volkswirtschaften der nord- und ostdeutschen Bundesländer überdurchschnittlich profitieren, während die produktiveren westlichen und südlichen Bundesländer eine unterdurchschnittliche Zunahme verzeichnen. Unter den gegebenen Modell- und Szenarioannahmen könnte die Energiewende daher zu einer Konvergenz der Wirtschaftskraft deutscher Regionen beitragen. Es sollte jedoch beachtet werden, dass dieser Effekt im Vergleich zu den im Modell ermittelten regionalen Unterschieden in 2030 sehr klein ist.

## 7.2. Kritische Würdigung und methodischer Ausblick

Die vorliegende Abschätzung der Nettowirkung der Energiewende auf Beschäftigung und Wertschöpfung und deren Verteilung auf Regionen und Wirtschaftsbereiche schließt eine bestehende Forschungslücke (von politischer Relevanz). Von den wenigen bestehenden Arbeiten, die sich mit den regionalen ökonomischen Effekten der Energiewende befassen, hebt sie sich insbesondere durch die systemische Betrachtung der Energiewende unter Einbezug der Energieeffizienz und aller Sektoren, sowie durch eine nach vorne gerichtete Ex-ante-Perspektive ab. Letztere sollte jedoch nicht mit einer Prognose verwechselt werden, sondern immer als Ergebnis einer Simulation unter gegebenen Annahmen und Systemgrenzen interpretiert werden. Daher zeichnet sich die Arbeit durch ein hohes Maß an Transparenz aus. Dies betrifft zum einen die Inputs aus den Energiemodellen und die Annahmen und Datenbasis bei ihrer Transformation zu ökonomischen Impulsen inklusive ihrer regionalen Zuweisung. Auch die Beschreibung des makroökonomische Kerns und der regionalen Verteilung stellt klar die unterstellten Wirkungszusammenhänge und verwendeten Modellparameter, die getroffenen Annahmen bei der Szenarienimplementierung und ihren Einfluss auf die Ergebnisse dar.

Das im Rahmen der Arbeit entwickelte ökonomische Modell ISI-Macro beruht im Wesentlichem auf einem Input-Output-Mengenmodell, und damit auf einer Methodik, die häufig für Folgenabschätzungen eingesetzt wird. Durch die Schließung des Modells innerhalb einer systemdynamischen Umgebung geht ISI-Macro jedoch über ein statisches und offenes Input-Output-Mengenmodell hinaus. Die Anzahl endogener Rückkopplungen wurde bewusst gering gehalten, wodurch sich die Linearität des Modells erhöht. Dadurch werden sowohl die Transparenz als auch die Interpretierbarkeit der Ergebnisse verbessert. Das Modell stützt sich auf einige wichtige exogene Inputs, wie z.B. Exporte oder Arbeitsproduktivität. Viele Modellparameter werden konstant gehalten, insbesondere die Aufteilung auf Gütergruppen und der Inlandsanteil der Produktion. Beim Vergleich zweier Szenarien fällt die fehlende Dynamik jedoch weniger ins Gewicht, da sie in beiden Szenarien hinterlegt ist und somit im Delta (zumindest teilweise) herausfällt. Eine Stärke des Modells ist, dass Modellparameter, die im Basislauf konstant gehalten werden, in den Szenarien aufgrund von Impulsen aus detaillierten Energieangebots- und -nachfragemodellen variieren können. Beispielsweise betrifft dies die Vorleistungsstruktur des Produktionsbereichs Stromversorgung, die basierend auf dem veränderten Strommix angepasst wird. Grundsatzannahmen von Input-Output-Modellen wie linear-limitationale Produktionsfunktionen oder die Homogenität der Gütergruppen treffen generell zwar auch auf ISI-Macro zu, werden aber durch die beschriebene Integration von Impulsen zumindest für die für die Fragestellung besonders relevanten Gütergruppen und Produktionsbereiche abgeschwächt.

Die verwendete Methodik und die konkrete Ausgestaltung der Szenarienimplementierung hat immer Einfluss auf die Ergebnisse der Simulation (vgl. Abschnitte 1.3 und 1.4). Das Vorgehen in der vorliegenden Arbeit ist keynesianisch geprägt. Es stützt sich auf die zumindest für die hier untersuchte mittelfristige Perspektive plausiblen Annahmen, dass sich die Ökonomie unterhalb ihrer Produktionsmöglichkeitengrenze befindet und dass durch die Politik im Energiewendeszenario bestehende Hemmnisse für (rentable) Investitionen abgebaut werden können. Aufbauend auf dieser Argumentationslinie werden die für die Energiewende nötigen Investitionen als zusätzliche Investitionen behandelt, was sich entsprechend positiv auf Wertschöpfung und Beschäftigung auswirkt. Andererseits bleiben die erzielten positiven gesamtwirtschaftlichen Effekte moderat, da hinsichtlich möglicher Innovationseffekte eher eine vorsichtige Haltung eingenommen wurde und weder eine produktivitätssteigernde Wirkung der zusätzlichen Investitionen noch etwaige Wettbewerbsvorteile durch die Etablierung eines „Lead Market“ mit einer entsprechend positiven Wirkung auf die Exporte von Energieerzeugungs- und Energieeffizienztechnologien unterstellt wurden. Die Rentabilität der zusätzlichen Investitionen ist durch die erzielten Energieeinsparungen oder über eine entsprechende Umlage auf die Stückkosten gegeben.

Im Fall von Konsumenten ändert sich dadurch die Konsumstruktur, im Fall der gewerblichen Nachfrage reduziert sich die Wertschöpfung. Mögliche negative Effekte von höheren Energiekosten auf die internationale Wettbewerbsfähigkeit bestimmter Branchen und die damit einhergehende Reduktion von Exporten werden jedoch nicht betrachtet (vgl. Abschnitt 4.4.4). Insgesamt fallen die Ergebnisse positiver aus als es bei Verwendung eines neoklassischen Ansatzes der Fall gewesen wäre. Daher sollten die positiven Effekte eher als zu erreichendes Potenzial betrachtet werden.

Die regionale Verteilung zeichnet sich durch die Zusammenführung zweier Herangehensweisen aus: Erstens, die direkte regionale Zuweisung eines Teils der Impulse basierend auf den Inputs aus den Energiemodellen und weiteren Datenquellen und die Berechnung der zugehörigen Wertschöpfung und Beschäftigung. Zweitens, die Top-down-Verteilung der (nicht direkt regional zugewiesenen) Wertschöpfung basierend auf regionalen Wirtschaftsstrukturen und der Entwicklung des regionalen Arbeitskräftepotenzials. Die Frage der regionalen Verteilung von Wertschöpfungs und Beschäftigungseffekten der Energiewende kann mit diesem Ansatz beantwortet werden. Die Interpretation der Ergebnisse erfordert jedoch ein Verständnis über die Grenzen der Modellierung. Die folgenden Ausführungen fassen die Limitierungen der regionalen Verteilung hinsichtlich Datenbasis und Methodik, ihre Wirkung auf die Ergebnisse und mögliche Verbesserungen zusammen.

Indirekte und induzierte Effekte werden im Modell weitgehend national berechnet und branchenbezogen top-down auf die Regionen verteilt, wobei wirtschaftlich sehr aktive Regionen (gemessen an der Wertschöpfung) absolut stärker betroffen sind. Die Verteilungseffekte wären stärker ausgeprägt, wenn direkt regional zugeordnete ökonomische Impulse die Wertschöpfung der jeweiligen Region auch über indirekte und induzierte Effekte beeinflussen würden. Die Berücksichtigung weiterer indirekter Effekte setzt natürlich voraus, dass die entsprechenden Vorleistungen auch aus der Region beziehbar sind. Allerdings sind intra- und interregionale Lieferquoten (Ulrich, Distelkamp, Lehr et al., 2012) oder eine multiregionale Input-Output-Tabelle (Többen, 2017b) nicht frei verfügbar. Induzierte Effekte entstehen beispielsweise durch vor Ort entstehende Erträge (Löhne, Gewinne, Steuereinnahmen) aus Investitionen in die Windenergie in Mecklenburg-Vorpommern, die wiederum für Produkte aus Mecklenburg-Vorpommern ausgegeben werden. Gleichzeitig würden auch die direkten negativen Effekte verstärkt: So geht die Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“ (2019, S. 52) in ihrem Abschlussbericht davon aus, „dass von jedem direkten Arbeitsplatz in der Braunkohlewirtschaft je ein weiterer indirekter oder induzierter Arbeitsplatz direkt im Revier und ein weiterer außerhalb der engeren geografischen Abgrenzung abhängt.“ Insgesamt würden sich die Wertschöpfungseffekte aus den direkt den Regionen zugewiesenen Impulsen somit verstärken. Die detail-

lierte Analyse für Nordrhein-Westfalen und Mecklenburg-Vorpommern hat gezeigt, dass dies insbesondere für die Regionen mit einem geringeren Anteil an der gesamtdeutschen Wertschöpfung stärker ins Gewicht fällt, wohingegen Regionen, die einen großen Anteil an der gesamtdeutschen Wertschöpfung verzeichnen, stärker durch die Wertschöpfung aus der Top-down-Verteilung beeinflusst sind. Dies legt nahe, dass die mit dem Modell ermittelte positive Wirkung der Energiewende auf die Kohäsion der Regionen durch das direkte regionale Zuweisen weiterer indirekter und induzierter Effekte noch verstärkt würde.

Andererseits ist im Modell hinterlegt, dass ein hoher Anteil der wirtschaftlichen Aktivität aus der Produktion, Installation, dem Betrieb und der Wartung von Energieerzeugungsanlagen in der Region des Anlagenstandorts entsteht. Die Datenbasis stützt sich auf Literaturrecherche und Expertengespräche, und könnte etwa durch Befragungen verbessert werden. Im Modell wird unterstellt, dass erhöhte Produktion in einer Region auch erhöhte Wertschöpfung oder Einkommen in derselben Region bedeutet. Dies ist jedoch nicht notwendigerweise der Fall. Die Verteilung der Gewinne hängt beispielsweise weniger stark vom Sitz der Betreiberfirma, sondern vielmehr vom Wohnort der Anteilseigner ab. Auch Löhne aus Arbeit, die in einer bestimmten Region geleistet wird, können in andere Regionen transferiert werden. Die Ergebnisse für die regionale Wertschöpfung sind daher eher als Potenzial anzusehen und setzen voraus, dass hohe Anteile an der wirtschaftlichen Aktivität und der darauf entfallenden Wertschöpfung in der Region gehalten werden. Hierzu müssten entsprechende Anreize gesetzt werden.

Die Effekte der Energiewende im Stromsektor bauen auf einer räumlichen Differenzierung der Stromerzeugung nach Technologien, der entsprechenden Hersteller und Betreiberfirmen auf. Wie bereits erwähnt, zeigen die Modellierungsergebnisse deutliche Verteilungseffekte der relativen Veränderung der Wertschöpfung durch Impulse, die auf die Energiewende im Stromsystem zurückzuführen sind. Dies steht im Einklang mit den Expost-Analysen (Többen, 2017b) und resultiert aus der Berücksichtigung regionaler Unterschiede in Bezug auf Stromerzeugung und der wirtschaftlichen Aktivitäten zur Herstellung, Installation, Betrieb und Wartung der Technologien. Die Datenbasis für letztere stützt sich auf knappe Daten, Literatur und Expertenwissen und könnte daher durch eine Umfrage noch verbessert werden.

Regionale Unterschiede beim Stromverbrauch werden hingegen nur indirekt berücksichtigt: die Stromausgaben unterscheiden sich für die einzelnen Wirtschaftsbereiche, wobei die regionale Wirtschaftsstruktur über die Top-down-Verteilung abgebildet ist. Unberücksichtigt bleiben regional variierende Strompreise, wobei hierbei insbesondere die Netzentgelte von Bedeutung sind (Hiersig & Wittig, 2015; Hinz, Schmidt & Möst, 2018; Schlesewsky & Winter, 2018). Diese regionale Differenzierung der Stromausgaben ist mit dem verwen-

deten Ansatz jedoch nicht möglich, da er unterstellt, dass sich die Vorleistungsstrukturen eines Produktionsbereiches zwischen den Regionen nicht unterscheiden.

Für Investitionen in Energieeffizienz greift die Top-down-Verteilung. Eine direkte Regionalisierung auch dieser Maßnahmen könnte die regionalen Verteilungseffekte ändern. Das Modell könnte durch die direkte regionale Zuweisung von Impulsen für den Wärme- und Verkehrssektor verbessert werden. Im Hinblick auf Energieeffizienzmaßnahmen in Gebäuden wäre es durch die regionale Differenzierung des Gebäudebestands in den Energiemodellen möglich, die zur Erreichung der politischen Ziele erforderlichen Investitionen regional zu verteilen. Als weitere offene Frage bliebe der Standort der tatsächlich an den Baumaßnahmen beteiligten Unternehmen und der Einkommenstransfer angesichts des hohen Anteils von Wanderarbeitnehmern im Bausektor. Obwohl Weiß et al. (2014) argumentieren, dass es einen hohen lokalen Wertschöpfungsanteil gibt, scheinen bisher keine Daten zu diesem Aspekt veröffentlicht worden zu sein. Zu beachten ist, dass es sich bei Baumaßnahmen um einen temporären auf die Bauzeit begrenzten Effekt handelt, während induzierte Effekte auch noch längerfristig eine Wirkung zeigen können.

Im Gegensatz zum Baugewerbe sind die Auswirkungen der Effizienzmaßnahmen auf den Immobiliensektor langfristiger Art. Die erhöhten (unterstellten) Mieten leiten sich zwar aus der Modernisierungsumlage ab, spiegeln aber auch einen gestiegenen Wert des Gebäudebestands wider, da mit der höheren Energieeffizienz auch gestiegene Wohn- und Lebensqualität verbunden ist. In Realität fallen die Effekte vermutlich etwas geringer aus als mit dem Modell ermittelt. Zum einen, weil die Modernisierungsumlage seit 2019 auf 8 Prozent begrenzt wurde, zum anderen, weil vermutlich nicht auf allen regionalen Wohnungsmärkten eine entsprechende Erhöhung durchzusetzen ist. Im Idealfall könnte die oben genannte Regionalisierung der Investitionen im Gebäudebereich um die offene Frage nach dem tatsächlichen Anstieg der Mieten aufgrund dieser Effizienzmaßnahmen auf der Grundlage der Analyse lokaler Wohnungsmärkte ergänzt werden.

## 7.3. Schlussfolgerungen

Die Modellergebnisse zeigen das Potenzial und die Risiken der Energiewende für die Regionen auf und weisen auf strukturelle Veränderungen von Wertschöpfung und Arbeitskräftebedarf hin. Modellierung ist jedoch immer begrenzt durch die zugrunde gelegten Annahmen und die zur Verfügung stehenden Daten. Für die vorliegende Arbeit wird dies klar herausgearbeitet und entsprechende Hinweise zur Interpretation der Ergebnisse werden gegeben. Was die Politik betrifft, so gibt es mehrere Themen, die eine besondere Berücksichtigung verdienen:

- Sicherstellung ausreichender qualifizierter Personalressourcen: Die Modellierungsergebnisse zeigen auf, in welchen Branchen Arbeitsplätze geschaffen werden. Um von den langfristigen Auswirkungen der Energiewende zu profitieren, sollten politische Entscheidungsträger in Zusammenarbeit mit der Industrie und dem Bildungssektor die nötige berufliche Aus- und Weiterbildung voranbringen. Die Aktivitäten sind vielfältig und reichen von der Bereitstellung der Infrastruktur bis hin zur Ausarbeitung von Curricula für Trainingsprogramme und Zertifizierungen von Programmen.

- Umschulung aktivieren: Dies ist in Regionen notwendig, die unter dem Rückgang des Kohleabbaus oder des Betriebs und der Herstellung konventioneller Energieerzeugungstechnologien leiden, da es sich um einen permanenten Wandel handelt. Menschen, die ihren Arbeitsplatz verloren haben, brauchen Ausbildungsmöglichkeiten und besondere Unterstützung beim Erwerb neuer Qualifikationen.

- Strukturelle Veränderungen: Darüber hinaus stehen die stark betroffenen Regionen jedoch vor der Herausforderung, neue Chancen zu erkennen und gezielte Unterstützung und Anreize für den Aufbau neuer Industrien und Dienstleistungen zu schaffen, z.B. grüne Industrien, IT-Dienstleistungen oder Gesundheitsdienste. Vernetzung, Erfahrungsaustausch auf nationaler oder internationaler Ebene, partizipative Diskussionsforen zu neuen Technologien oder Entwicklungen könnten Impulse für neue Ideen geben oder helfen, Chancen zu erkennen. Auch die alternative Nutzung ehemaliger Kohleabbaugebiete als touristisch attraktive Regionen ist eine solche Chance, die bei der Modellierung nicht berücksichtigt wurde. Im Hinblick auf Strategien für die aktive Gestaltung des Strukturwandels in Braunkohlerevieren gibt die Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“ (2019) zahlreiche weitere Handlungsempfehlungen.

- Ausgleich von Einkommensverlusten: Direkte negative Effekte in einer Region können sich durch induzierte Effekte verstärken, wenn aufgrund weggebrochener Einkommen aus Löhnen, Unternehmensgewinnen und Steuereinnahmen auch die Nachfrage in der Region sinkt. Im Modell wurden die induzierten Effekte nicht der direkt betroffenen Region zugeschrieben sondern top-down verteilt und somit die Risiken negativ betroffener Regionen möglicherweise unterschätzt. Andererseits existieren über soziale Systeme und progressive Steuerausgestaltung bereits Kompensationsmechanismen. Um negative induzierte Effekte zu reduzieren, sollte geprüft werden, ob neben den genannten politischen Instrumenten die Initiierung weiterer Hilfsprogramme und Maßnahmen sinnvoll ist, um Einkommens- und Nachfrageverluste möglichst gering zu halten.

- Fokus auf Bildung, Gesundheit, Kreativität: Die Erhöhung der Wertschöpfung durch die Energiewende führt zu höheren Steuereinnahmen. Die Verwendung dieser zusätzlichen Einnahmen für eine bessere frühkindliche Entwicklung, Bildung, Ernährung, Kreativität und Gesundheitsdienste kann zu einem höheren Lebensstandard beitragen, sowie Qualifikationen und Kenntnisse verbessern, die zu innovativen Produkten und Dienstleistungen und schließlich zu weiterem Wirtschaftswachstum führen. Dieser potenziell positive Effekt der Energiewende ist im Modell nicht enthalten.

- Planungssicherheit für Branchen im Wandel: Steigende Energiepreise bieten Anreize für eine effiziente Energienutzung von Industrie und Verbrauchern, schwächen aber gleichzeitig die internationale Wettbewerbsfähigkeit der von höheren Energieausgaben betroffenen nationalen Industriezweigen. Es bedarf eines Kompromisses, um Investitionen in Energieeffizienz anzuregen, strukturelle Veränderungen herbeizuführen und die Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten. So bietet ein transparentes, klar kommuniziertes und begrenztes System von Ausnahmeregelungen für große industrielle Stromverbraucher Planungssicherheit, vermeidet negative Auswirkungen einer plötzlichen Abschaffung der Ausnahmeregelungen (Grave et al., 2015) und stimuliert weiterhin den Übergang in diesen Branchen.

- Erleichterung der Gründung neuer Unternehmen: Das Modell verdeutlicht die positiven Auswirkungen von guten Standortbedingungen für Windkraft auf die regionale Wertschöpfung. Basierend auf Porter (1990) sind Standortbedingungen, einschließlich der natürlichen, nur ein Faktor, der das Wirtschaftswachstum antreibt. Unternehmensstrukturen und -strategien, politische Zielsetzungen und Rahmenbedingungen sind weitere entscheidende Faktoren. Die sich im Zuge der Energiewende ändernden Preise für Energieträger oder Ressourcen in Kombination mit den schnell fortschreitenden Veränderungen in den Bereichen Information, Kommunikation, Material und Biotechnologie eröffnen auch kleinen Unternehmen neue Chancen. Eine langfristige positive regionale Entwicklung beruht nicht allein auf natürlichen Standortbedingungen, sondern auch auf einer flexiblen und offenen Verwaltung und Politik, die ein günstiges Umfeld für Unternehmen und wirtschaftliche Tätigkeiten schafft bzw. unterstützt. Dazu gehören z.B. hochqualifizierte Arbeitskräfte, zuverlässige (IT-)Infrastruktur, effektive und effiziente Verwaltung und Gerichtsbarkeit. Erfolgreiche Regionen erleichtern die Entwicklung von Start-ups und neuen Geschäftsmodellen. Auch wenn eine Berücksichtigung solcher Entwicklungen mit dem Modell nicht möglich ist, kann davon ausgegangen werden, dass in einem im Vergleich zur Referenz

durch mehr Offenheit hinsichtlich struktureller Änderungen geprägten Energiewendeszenario diese Potenziale besser ausgeschöpft werden können.

Die Ergebnisse der Arbeit zeigen: regionalpolitische und energiepolitische Ziele stehen nicht im Konflikt, sondern weisen Synergien auf. Dies setzt jedoch voraus, dass positiv betroffene Regionen ihre Potenziale durch entsprechende Maßnahmen auch ausschöpfen. Negative Effekte beschränken sich auf wenige Branchen. Regionen, in denen ein großer Anteil der Wertschöpfung in diesen Branchen anfällt, sollten Strategien entwickeln, die ihre Vulnerabilität reduzieren. Dennoch sind die aufgezeigten ökonomischen Effekte nur ein kleiner Teil der (regionalen) Wirkungen. Eine systemische Kosten-Nutzen-Analyse schließt viele andere Aspekte (auch nicht oder nur schwer monetarisierbare) mit ein. Auch diese können regional ungleich verteilt sein. Die soziale Verteilungswirkung der Energiewende war nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Vorliegende Ex-post- (z.B. Többen, 2017b) und Ex-ante-Analysen (Bach, Isaak, Kemfert & Wägner, 2019; Sievers & Pfaff, 2016) weisen jedoch darauf hin, dass die derzeitige Ausgestaltung der Energiewende nicht im Einklang mit dem politischen Ziel einer gleichmäßigeren personellen Einkommensverteilung steht. Hier sind geeignete Maßnahmen nötig, um dem entgegenzuwirken. Auch wenn das Hauptziel der Energiewende der Klimaschutz ist, haben die erwünschten regionalen Verteilungswirkungen zukünftig jedenfalls das Potenzial die Akzeptanz für die Energiewende zu stärken.

# Literatur


Atkinson, A. B. (Hrsg.). (2015). *Handbook of income distribution: Vol. 2* (1. ed.). Amsterdam: Elsevier.

Atkinson, A. B. & Bourguignon, F. (Hrsg.). (2000). *Handbook of income distribution: Vol. 1*. Amsterdam: Elsevier.

Bach, S., Isaak, N., Kemfert, C. & Wägner, N. (2019). Lenkung, Aufkommen, Verteilung: Wirkungen von $CO_2$-Bepreisung und Rückvergütung des Klimapakets. (24). Verfügbar unter https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.683685.de/diw_aktuell_24.pdf

Bacharach, M. (1965). Estimating nonnegative matrices from marginal data. *International Economic Review*, *6*(3), 294–310.

Barker, T., Dagoumas, A. & Rubin, J. (2009). The macroeconomic rebound effect and the world economy. *Energy Efficiency*, *2*(4), 411–427. doi:10.1007/s12053-009-9053-y

Beise, M. (2001). *Lead markets: Country-specific success factors of the global diffusion of innovations*. Springer Science & Business Media.

Beise, M. (2004). Lead markets: Country-specific drivers of the global diffusion of innovations. *Research policy*, *33*(6-7), 997–1018.

Beise, M. (2006). *Die Lead-Markt-Strategie: Das Geheimnis weltweit erfolgreicher Innovationen*. Springer Science & Business Media.

Beise, M. & Rennings, K. (2005). Lead markets and regulation: A framework for analyzing the international diffusion of environmental innovations. *Ecological Economics*, *52*(1), 5–17.

Bernake, B. (2015). Why are interest rates so low? Part 3: The Global Savings Glut: Brookings blog 01.04.2015. Verfügbar 16. November 2019 unter https://www.brookings.edu/blog/ben-bernanke/2015/04/01/why-are-interest-rates-so-low-part-3-the-global-savings-glut/

Blümle, G. (1975). *Theorie der Einkommensverteilung: Eine Einführung*. doi:10.1007/978-3-642-61920-5

Böhringer, C., Keller, A. & van der Werf, E. (2013). Are green hopes too rosy? Employment and welfare impacts of renewable energy promotion. *Energy Economics*, *36*, 277–285. doi:10.1016/j.eneco.2012.08.029

Bossel, H. (2004a). *Systeme, Dynamik, Simulation*. BoD–Books on Demand.

Bossel, H. (2004b). *Systemzoo 3*. BoD–Books on Demand.

Breitschopf, B., Nathani, C. & Resch, G. (2013). Employment Impact Assessment Studies-Is There a Best Approach to Assess Employment Impacts of RET Deployment. *Renewable Energy L. & Pol'y Rev.*, 93.

Bröcker, J., Burmeister, J., Preißler-Jebe, J. H. & Alberty, F. (2014). Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte als Folge des Ausbaus Erneuerbarer Energien in Schleswig-Holstein. *Beiträge aus dem Institut für Regionalforschung der Universität Kiel*, *45*.

Bundesnetzagentur. (2015). Kraftwerksliste: Bundesweit; alle Netz- und Umspannebenen: Stand 25.09.2015.

Cagno, E., Worrell, E., Trianni, A. & Pugliese, G. (2013). A novel approach for barriers to industrial energy efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *19*, 290–308. doi:10.1016/j.rser.2012.11.007

Cameron, L. & van der Zwaan, B. (2015). Employment factors for wind and solar energy technologies: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *45*, 160–172.

Candelise, C., Winskel, M. & Gross, R. J. (2013). The dynamics of solar PV costs and prices as a challenge for technology forecasting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *26*, 96–107. doi:10.1016/j.rser.2013.05.012

Capros, P., de Vita, A., Höglund Isaksson, L., Winiwarter, W., Purohit, P., Bottcher, H., ... Witzke, H. P. (2013). EU energy, transport and GHG emissions trends to 2050-Reference scenario 2013. European Commission.

Cowell, F. A. (2000). Measurement of inequality. In A. B. Atkinson & F. Bourguignon (Hrsg.), *Handbook of Income Distribution* (Bd. 1, S. 87–166). doi:10.1016/S1574-0056(00)80005-6

Cox, M., Peichl, A., Pestel, N. & Siegloch, S. (2014). Labor demand effects of rising electricity prices: Evidence for Germany. *Energy Policy*, *75*, 266–277.

Dehnen, N., Mattes, A. & Traber, T. (2015). Die Beschäftigungseffekte der Energiewende: Eine Expertise für den Bundesverband WindEnergie e.V. und die Deutsche Messe AG. DIW Econ GmbH. Berlin.

Destatis. (2008). Güterverzeichnis für Produktionsstatistiken 2009. Wiesbaden. Verfügbar 24. Februar 2017 unter https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Verzeichnis/Gueterverzeichnis3200201099004.pdf?__blob=publicationFile

Destatis. (2014). Einkommens- und Verbrauchsstichprobe 2008: Konsumausgaben privater Haushalte nach Dezilen des Haushaltsnettoeinkommens. Einkommen und Einnahmen sowie Ausgaben privater Haushalte nach Dezilen des Haushaltnettoeinkommens. Sonderauswertung. Wiesbaden.

Destatis. (2015a). Bevölkerung Deutschlands bis 2060: 13. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung. Wiesbaden.

Destatis. (2015b). VGR des Bundes - Input-Output-Rechnung: Fachserie 18 Reihe 2 - 2012: Revision 2014, Stand: August 2015. Wiesbaden.

Destatis. (2016). Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen: Inlandsprodukt und Nationaleinkommen nach ESVG 2010 - Methoden und Grundlagen: Fachserie 18 Reihe S. 30. Wiesbaden.

Destatis. (2017). Glossar zur Volkswitschaftlichen Gesamtrechnung. Verfügbar 27. Februar 2017 unter https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/VGR/_Doorpage/Glossar_VGR.html

Destatis. (2018). Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung: Input-Output-Rechnung 1995-2015.

Dimitropoulos, J. (2007). Energy productivity improvements and the rebound effect: An overview of the state of knowledge. *Energy Policy*, *35*(12), 6354–6363. doi:10.1016/j.enpol.2007.07.028

Duscha, V., Fougeyrollas, A., Nathani, C., Pfaff, M., Ragwitz, M., Resch, G., ... Walz, R. (2016). Renewable energy deployment in Europe up to 2030 and the aim of a triple dividend. *Energy Policy*, *95*, 314–323.

Duscha, V., Ragwitz, M., Breitschopf, B., Schade, W., Walz, R., Pfaff, M., ... Boitier, B. (2014). Employment and growth effects of sustainable energies in the European Union: Support Activities for RES modelling post 2020: Final Report to Contract no.: ENER/C1/428-2012. Verfügbar 29. Juli 2015 unter http://www.eeg.tuwien.ac.at/eeg.tuwien.ac.at_pages/events/iewt/iewt2015/uploads/fullpaper/P_266_Ragwitz_Mario_11-Feb-2015_15:32.pdf

Eckey, H.-F., Kosfeld, R. & Muraro, N. (2009). Effects of population development on the economic level of the regions in Germany. *Review of Economics*, *60*(3), 204–226.

Eckey, H.-F., Kosfeld, R. & Türck, M. (2004). Regionale Produktionsfunktionen mit Spillover-Effekten für Deutschland. Volkswirtschaftliche Diskussionsbeiträge.

Eggertsson, G. B. & Krugman, P. (2012). Debt, Deleveraging, and the Liquidity Trap: A Fisher-Minsky-Koo Approach*. *The Quarterly Journal of Economics*, *127*(3), 1469–1513. doi:10.1093/qje/qjs023

Eggertsson, G. B., Mehrotra, N. R. & Summers, L. H. (2016). Secular Stagnation in the Open Economy. *American Economic Review*, *106*(5), 503–507. doi:10.1257/aer.p20161106

Elsland, R. (2016). *Long-term Energy Demand in the German Residential Sector: Development of an Integrated Modelling Concept to Capture Technological Myopia* (1. Auflage). doi:10.5771/9783845267487

Elsland, R., Boßmann, T., Klingler, A.-L., Herbst, A., Klobasa, M. & Wietschel, M. (2016). Netzentwicklungsplan Strom: Entwicklung der regionalen Stromnachfrage und Lastprofile - Begleitgutachten: Studie im Auftrag der deutschen Übertragungsnetzbetreiber. Fraunhofer ISI, Karlsruhe. Verfügbar 5. Juni 2019 unter https://www.forecast-model.eu/forecast-wAssets/docs/Fraunhofer_ISI_2017_Netzentwicklungsplan_Strom.pdf

Elzen, B., Geels, F. W. & Green, K. (2004). *System innovation and the transition to sustainability: Theory, evidence and policy*. Edward Elgar Publishing.

Europäische Kommission. (2014). Europäisches System Volkswirtschaftlicher Gesamtrechnungen: ESVG 2010. Europäische Kommission, Luxemburg. Verfügbar unter http://bookshop.europa.eu/de/-pbKS0213269/

Europäische Kommission. (2016). Impact assessment accompanying the document Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council for the promotion of the use of energy from renewable sources (recast) and Impact assessment accompanying the document Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2012/27/EU on Energy Efficiency.

Eurostat. (2013). *European system of accounts*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Eurostat. (2015a). Labour force surveys in the EU, candidate and EFTA countries: Main characteristics of national surveys, 2014. Luxembourg. Verfügbar 2. September 2015 unter http://ec.europa.eu/eurostat/documents/3888793/6976602/KS-TC-15-003-EN-N.pdf/d387cf86-cd16-4b23-87fa-1aa53732c721

Eurostat. (2015b). *Regions in the European Union: Nomenclature of territorial units for statistics ; NUTS 2013/EU-28*. Luxembourg: Publ. of the Europ. Union.

Eurostat. (2017a). Glossar: Systematik der Gebietseinheiten für die Statistik (NUTS). Verfügbar 6. Juni 2017 unter http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Glossar:NUTS

Eurostat. (2017b). Glossar: Vollzeitäquivalent (VZÄ). Verfügbar 6. Juni 2017 unter http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Glossary:Full-time_equivalent_(FTE)/de

Falkenberg, D., Weiß, T. & Nehls, G. (2014). Vorbereitung und Begleitung der Erstellung des Erfahrungsberichts 2014 gemäß § 65 EEG: Vorhaben IIe Stromerzeugung aus Windenergie: Wissenschaftlicher Bericht im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Leipziger Institut für Energie, Helmut-Schmidt-Universität und BioConsult SH GmbH & Co.KG.

Fankhaeser, S., Sehlleier, F. & Stern, N. (2008). Climate change, innovation and jobs. *Climate Policy*, *8*(4), 421–429.

Fischer, C. & Newell, R. G. (2008). Environmental and technology policies for climate mitigation. *Journal of Environmental Economics and Management*, *55*(2), 142–162. doi:10.1016/j.jeem.2007.11.001

Fischer, W., Hake, J.-F., Kuckshinrichs, W., Schröder, T. & Venghaus, S. (2016). German energy policy and the way to sustainability: Five controversial issues in the debate on the "Energiewende". *Energy*, *115*, 1580–1591. doi:10.1016/j.energy.2016.05.069

Fleissner, P. (1993). *Input-Output-Analyse*. Wien: Springer.

Forrester, J. W. (1961). *Industrial dynamics*. Cambridge, MA: MIT press.

Forrester, J. W. (1969). *Urban dynamics*. Cambridge, MA: MIT press.

Fraunhofer ISI. (2016). FORECAST- und eLOAD-Website. Verfügbar unter %5Curl% 7Bhttp://www.forecast-model.eu/forecast-en/index.php%7D

Frondel, M., Ritter, N., Schmidt, C. M. & Vance, C. (2010). Economic impacts from the promotion of renewable energy technologies: The German experience. *Energy Policy*, *38*(8), 4048–4056.

Fullerton, D. (2017). *Distributional effects of environmental and energy policy*. Routledge.

Gawel, E., Korte, K. & Tews, K. (2015). Distributional Challenges of Sustainability Policies—The Case of the German Energy Transition. *Sustainability*, *7*(12), 16599–16615. doi:10.3390/su71215834

Grave, K., Hazrat, M., Boeve, S., von Blücher, F., Bourgault, C., Breitschopf, B., ... Flaute, M. (2015). Electricity Costs of Energy Intensive Industries. Ecofys, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI und GWS. Verfügbar 28. Februar 2018 unter http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/x/de/projekte/Strompreiswirkung_330639/Industriestrompreise_englisch.pdf

Grin, J., Rotmans, J. & Schot, J. (2010). *Transitions to sustainable development: New directions in the study of long term transformative change*. Routledge.

Grösche, P. & Schröder, C. (2014). On the redistributive effects of Germany's feed-in tariff. *Empirical Economics*, *46*(4), 1339–1383. doi:10.1007/s00181-013-0728-z

Growitsch, C., Meier, H. & Schleich, S. (2015). Regionale Verteilungswirkungen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes. *Perspektiven der Wirtschaftspolitik*, *16*(1), 72–87.

GTAI. (2013). PV Balance of Systems. Berlin.

Guerra, A.-I. & Sancho, F. (2010). Rethinking economy-wide rebound measures: An unbiased proposal. *Energy Policy*, *38*(11), 6684–6694. doi:10.1016/j.enpol.2010.06.038

Heinbach, K., Aretz, A., Hirschl, B., Prahl, A. & Salecki, S. (2014). Renewable energies and their impact on local value added and employment. *Energy, Sustainability and Society*, *4*(1), 1–10.

Heindl, P. (2014). Ökonomische Aspekte der Lastenverteilung in der Umweltpolitik am Beispiel der Energiewende: Ein Beitrag zum interdisziplinären Dialog: ZEW Discussion Papers. (14-061). Verfügbar unter http://hdl.handle.net/10419/102295

Heindl, P. & Löschel, A. (2015). Social Implications of Green Growth Policies from the Perspective of Energy Sector Reform and its Impact on Households. *SSRN Electronic Journal*. doi:10.2139/ssrn.2578953

Hiersig, R. & Wittig, D. (2015). Gestaltung einer fairen lastenverteilung in den netzkosten- und netzentgeltstrukturen. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, *65*(7), 13–16.

Hillebrand, B., Buttermann, H. G., Behringer, J. M. & Bleuel, M. (2006). The expansion of renewable energies and employment effects in Germany. *Energy Policy*, *34*(18), 3484–3494.

Hinz, F., Schmidt, M. & Möst, D. (2018). Regional distribution effects of different electricity network tariff designs with a distributed generation structure: The case of Germany. *Energy Policy*, *113*, 97–111. doi:10.1016/j.enpol.2017.10.055

Hirschl, B., Aretz, A., Prahl, A., Böther, T., Heinbach, K., Pick, D. & Funcke, S. (2010). Kommunale Wertschöpfung durch Erneuerbare Energien. *Schriftenreihe des IÖW*, *196*(10).

Holub, H.-W. & Schnabl, H. (1994). *Input-Output-Rechnung*. doi:10.1515/9783486811704

International Energy Agency. (2014). *Capturing the Multiple Benefits of Energy Efficiency: A Guide to Quantifying the Value Added*. Paris: OECD Publishing. Verfügbar unter http://gbv.eblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=1825955

International Organisation for Standardisation. (2013). ISO-3166. Verfügbar 8. Juni 2017 unter https://www.iso.org/obp/ui/#iso:code:3166:DE

Isard, W., Azis, I. J., Drennan, M. P., Miller, R. E. & Saltzman, S. (1998). *Methods of Interregional and Regional Analysis*. Florence: Taylor and Francis. Verfügbar unter https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=4907037

IWES. (2016). Windmonitor: Marktanteile Offshore Anlagen Deutschland: Stand 2016. Verfügbar 21. April 2018 unter http://www.windmonitor.de/windmonitor_de/bilder_javascript.html?db_communicate='Windenergieeinspeisung.daten'&p_lang=ger&img_id=413

Jacob, K., Beise, M., Blazejczak, J. M., Edler, D., Haum, R., Jänicke, M., … Rennings, K. (2006). *Lead markets for environmental innovations*. Springer Science & Business Media.

Jaffe, A. B., Newell, R. G. & Stavins, R. N. (2002). Environmental Policy and Technological Change. *Environmental and Resource Economics*, *22*(1/2), 41–70. doi:10.1023/A:1015519401088

Jaffe, A. B. & Stavins, R. N. (1994). The energy-efficiency gap What does it mean? *Energy Policy*, *22*(10), 804–810. doi:10.1016/0301-4215(94)90138-4

Kanbur, R. (2006). The policy significance of inequality decompositions. *The Journal of Economic Inequality*, *4*(3), 367–374. doi:10.1007/s10888-005-9013-5

Kanbur, R. & Venables, A. (Hrsg.). (2005). *Spatial inequality and development* (1. publ). New York: Oxford Univ. Press. Verfügbar unter http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0639/2004025230-d.html

Kelm, T., Schmidt, M., Taumann, M., Püttner, A., Jachmann, H., Capota, M., … Sporer, K. (2014). Vorbereitung und Begleitung der Erstellung des Erfahrungsberichts 2014 gemäß § 65 EEG: Vorhaben IIc Stromerzeugung aus Solarer Strahlungsenergie: Wissenschaftlicher Bericht im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg.

Keuneke, R., Dumont, U., Anderer, P., Massmann, E., Moser, A., Kasper, U., … Heimerl, S. (2014). Vorbereitung und Begleitung der Erstellung des Erfahrungsberichts 2014 gemäß § 65 EEG: Vorhaben IId Wasserkraft: Wissenschaftlicher Bericht im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Ingenieurbüro Flöckmühle.

Köhler, J., Geels, F. W., Kern, F., Markard, J., Onsongo, E., Wieczorek, A., … Wells, P. (2019). An agenda for sustainability transitions research: State of the art and future directions. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, *31*, 1–32. doi:10.1016/j.eist.2019.01.004

Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“. (2019). Abschlussbericht.

Konstantin, P. (2013). *Praxisbuch Energiewirtschaft: Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt* (3., aktual. Aufl. 2013). doi:10.1007/978-3-642-37265-0

Kosfeld, R. & Gückelhorn, F. (2012). Ökonomische Effekte erneuerbarer Energien auf regionaler Ebene. *Raumforschung und Raumordnung*, *70*(5), 437–449.

Krail, M. (2009). *System-Based analysis of income distribution impacts on mobility behaviour: Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2009* (1. Aufl.). Baden-Baden: Nomos.

Kronenberg, T. (2009). Construction of Regional Input-Output Tables Using Nonsurvey Methods. *International Regional Science Review*, *32*(1), 40–64. doi:10.1177/0160017608322555

Krugman, P. (2014). Four observations on secular stagnation. *Secular stagnation: Facts, causes and cures*, 61–68.

Kuhn, A. (2010). Input-Output-Rechnung im Überblick. *Statistisches Bundesamt: Wiesbaden, Germany*.

Ladermann, A. (2018, 6. Juni). Langfristszenarien: Investitionen in Verteilernetz. Delta zwischen Basisszenario und Referenzszenario. Persönliche Mitteilung.

Lehr, U. & Drosdowski, T. (2015). Soziale Verteilungswirkungen der EEG-Umlage unter Berücksichtigung von Einkommensklassen. *GWS Discussion Paper*.

Lehr, U., Lutz, C. & Edler, D. (2012). Green jobs? Economic impacts of renewable energy in Germany. *Energy Policy*, *47*, 358–364.

Lehr, U., Mönnig, A., Wolter, M. I., Lutz, C., Schade, W. & Krail, M. (2011). Die Modelle ASTRA und PANTA RHEI zur Abschätzung gesamtwirtschaftlicher Wirkungen umweltpolitischer Instrumente-ein Vergleich. *GWS Discussion Paper*.

Lewney, R., Chewpreecha, U. & Pollitt, H. (2017). Technical report on model development – Representing finance constraints in a post-Keynesian macro-sectoral model: Technical Study on the Macroeconomics of Energy and Climate Policies. Cambridge.

Liu, J. & Goldstein, D. (2013). Understanding China's renewable energy technology exports. *Energy Policy*, *52*, 417–428. doi:10.1016/j.enpol.2012.09.054

Löckener, R., Ulrich, P., Lehr, U., Sundmacher, T., Timmer, B. & Vorderwülbecke, A. (2016). *Energiewende in Baden-Württemberg*. Düsseldorf: Hans-Böckler-Stiftung. Verfügbar unter http://hdl.handle.net/10419/148583

Lutz, C., Flaute, M., Lehr, U., Kemmler, A., Kirchner, A., Maur, A., ... Strassburg, S. (2018). Gesamtwirtschaftliche Effekte der Energiewende. *GWS Research Report*, *2018/04*. Verfügbar 2. Februar 2019 unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/gesamtwirtschaftliche-effekte-der-energiewende.pdf?__blob=publicationFile&v=8

Lutz, C., Lehr, U., Ulrich, P. & Schlesinger, M. (2012). Analyse der gesamtwirtschaftlichen Effekte des Energiemarktes. *GWS Discussion Paper*.

Meadows, D. H. (1972). *The limits to growth*. New York: Universe Books.

Meadows, D. H., Randers, J. & Meadows, D. L. (2006). *Grenzen des wachstums*. Hirzel Stuttgart.

Meyer-Krahmer, F. & Reger, G. (1999). New perspectives on the innovation strategies of multinational enterprises: Lessons for technology policy in Europe. *Research policy*, *28*(7), 751–776. doi:10.1016/S0048-7333(99)00019-0

Mihm, A. (2014). EEG-Umlage: Nordrhein-Westfalen zahlt Bayerns Ökostrom. *Frankfurter Allgemeine Zeitung*. Verfügbar 2. Februar 2018 unter http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/wirtschaftspolitik/eeg-umlage-nordrhein-westfalen-zahlt-bayerns-oekostrom-12783578.html#void

Miller, R. E. & Blair, P. D. (2009). *Input-output analysis: foundations and extensions*. Cambridge University Press.

Mönnig, A., Schneemann, C., Weber, E. & Zika, G. (2020). Das Klimaschutzprogramm 2030: Effekte auf Wirtschaft und Erwerbstätigkeit durch das Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung. Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung der Bundesagentur für Arbeit, Nürnberg. Verfügbar unter http://doku.iab.de/discussionpapers/2020/dp0220.pdf

Monstadt, J. & Scheiner, S. (2014). Allocating greenhouse gas emissions in the German federal system: Regional interests and federal climate governance. *Energy Policy*, *74*, 383–394.

Monstadt, J. & Scheiner, S. (2016). Die Bundesländer in der nationalen Energie- und Klimapolitik: Räumliche Verteilungswirkungen und föderale Politikgestaltung der Energiewende. *Raumforschung und Raumordnung*, *74*(3), 179–197. doi:10.1007/s13147-016-0395-6

Moretti, E. (2013). Real Wage Inequality. *American Economic Journal: Applied Economics*, *5*(1), 65–103. doi:10.1257/app.5.1.65

Nationale Plattform Elektromobilität. (2015). Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland. Berlin.

Neuhoff, K., Bach, S., Diekmann, J., Beznoska, M. & El-Laboudy, T. (2013). Distributional effects of energy transition: Impacts of renewable electricity support in Germany. *Economics of Energy & Environmental Policy*, *2*(1), 41–54.

O'Sullivan, M., Edler, D. & Lehr, U. (2018). Ökonomische Indikatoren des Energiesystems: Methode, Abgrenzung und Ergebnisse für den Zeitraum 2000-2016. DIW Berlin: Politikberatung kompakt.

OECD. (2014). Long-term baseline projections. Verfügbar 30. November 2016 unter http://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=EO95_LTB

Pfaff, M. (2019). *Material flows in the industrial system: Model-based analysis of material consumption in Germany and the effects of efficiency measures* (Diss., Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe).

Pfaff, M. & Walz, R. (2017). BRISKEE - Behavioural Response to Investment Risks in Energy Efficiency: D4.3: Working paper on macroeconomic modelling. Verfügbar 9. November 2019 unter https://www.briskee-cheetah.eu/static/media/uploads/site-3/library/d4-3_macroeconomic-modelling-final_abgabe.pdf

Pfluger, B. (2013). Assessment of least-cost pathways for decarbonising Europe's power supply. *A model-based long-term scenario analysis accounting for the characteristics of renewable energies. Zugl.: Karlsruher Institut für Technologie, KIT, Diss.*

Pfluger, B., Bernath, C., Bossmann, T., Deac, G., Elsland, R., Fleiter, T., ... Reiter, U. (2017a). Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland: Modul 1: Hintergrund, Szenarioarchitektur und übergeordnete Rahmenparameter: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI.

Pfluger, B., Bernath, C., Bossmann, T., Deac, G., Elsland, R., Fleiter, T., ... Reiter, U. (2017b). Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland: Modul 2: Modelle und Modellverbund: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI.

Pfluger, B., Bernath, C., Bossmann, T., Deac, G., Elsland, R., Fleiter, T., ... Reiter, U. (2017c). Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland: Modul 3: Referenzszenario und Basisszenario: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI.

Photon. (2014). *Photon - Das Solarstrom-Magazin*, *2014*(1).

Pollitt, H. & Mercure, J.-F. (2018). The role of money and the financial sector in energy-economy models used for assessing climate and energy policy. *Climate Policy*, *18*(2), 184–197.

Porter, M. (1990). The competitive advantage of nations.

Quitzow, L., Canzler, W., Grundmann, P., Leibenath, M., Moss, T. & Rave, T. (2016). The German Energiewende: What's happening? Introducing the special issue. *Utilities Policy*, *41*, 163–171. doi:10.1016/j.jup.2016.03.002

Quitzow, R., Walz, R., Köhler, J. & Rennings, K. (2014). The concept of "lead markets" revisited: Contribution to environmental innovation theory. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, *10*, 4–19.

Raupach-Sumiya, J., Matsubara, H., Prahl, A., Aretz, A. & Salecki, S. (2015). Regional economic effects of renewable energies-comparing Germany and Japan. *Energy, Sustainability and Society*, *5*(1), 10.

Rennings, K. & Smidt, W. (2010). A Lead Market Approach towards the Emergence and Diffusion of Coal-Fired Power Plant Technology. *Economia politica, Journal of Analytical and Institutional Economics*, (2/2010), 303–328. doi:10.1428/32541

Repenning, J., Schumacher, K., Bergmann, T., Blanck, R., Böttcher, H., Bürger, V., … Wirz, A. (2018). Folgenabschätzung zu den ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Folgewirkungen der Sektorziele für 2030 des Klimaschutzplans 2050 der Bundesregierung.

Reuter, M., Patel, M. K., Eichhammer, W., Lapillonne, B. & Pollier, K. (2020). A comprehensive indicator set for measuring multiple benefits of energy efficiency. *Energy Policy*, *139*, 111284. doi:10.1016/j.enpol.2020.111284

Ringel, M., Schlomann, B., Krail, M. & Rohde, C. (2016). Towards a green economy in Germany? The role of energy efficiency policies. *Applied energy*, *179*, 1293–1303.

Rohde, C. (2018). Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2013 bis 2017. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe.

Rothengatter, W., Schade, W., Kuchenbecker, K., Schade, B., Martino, A., Roda, M., … Clark, J. (2000). Assessment of Transport Strategies. Institut für Wirtschaftspolitik und Wirtschaftsforschung, Karlsruhe, Germany.

Rothengatter, W. & Schaffer, A. (2006). *Makro kompakt: Grundzüge der Makroökonomik*. Heidelberg: Physica-Verlag Heidelberg. Verfügbar unter http://dx.doi.org/10.1007/3-7908-1674-4

Schade, W. (2005). *Strategic Sustainability Analysis: concept and application for the assessment of European Transport Policy: Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2004* (1. Aufl.). Baden-Baden: Nomos.

Schaffer, A. & Brun, S. (2015). Beyond the sun—Socioeconomic drivers of the adoption of small-scale photovoltaic installations in Germany. *Energy Research & Social Science*, *10*, 220–227. doi:10.1016/j.erss.2015.06.010

Schaffer, A., Brun, S. & Düvelmeyer, C. (2015). Drivers and barriers of energy farming in Bavaria – an analysis from farmers' perspective. *Zeitschrift für Umweltpolitik & Umweltrecht*, *38*(2), 232–252.

Schaffer, A. & Düvelmeyer, C. (2016). Regional drivers of on-farm energy production in Bavaria. *Energy Policy*, *95*, 361–369. doi:10.1016/j.enpol.2016.04.047

Scheftelowitz, M., Daniel-Gromke, J., Denysenko, V., Hillebrand, K., Krautz, A., Lenz, V., … Beyrich, W. (2014). Vorbereitung und Begleitung der Erstellung des Erfahrungsberichts 2014 gemäß § 65 EEG: Vorhaben IIa Stromerzeugung aus Biomasse: Wissenschaftlicher Bericht im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH.

Schleich, J. (2009). Barriers to energy efficiency: A comparison across the German commercial and services sector. *Ecological Economics*, *68*(7), 2150–2159. doi:10.1016/j.ecolecon.2009.02.008

Schlesewsky, L. & Winter, S. (2018). An empirical investigation on the distributional impact of network charges in Germany: Discussion Paper, Center for Interdisciplinary Economics. Münster: University of Münster, School of Business and Economics, Center for Interdisciplinary Economics. Verfügbar unter http://hdl.handle.net/10419/179922

Schlömer, C., Bucher, H. & Hoymann, J. (2015). Die Raumordnungsprognose 2035 nach dem Zensus. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR). Bonn.

Schulte, I. & Heindl, P. (2017). Price and income elasticities of residential energy demand in Germany. *Energy Policy*, *102*, 512–528.

Sell, F. L. (2015). *The new economics of income distribution: Introducing equilibrium concepts into a contested field*. doi:10.4337/9781783472376

Sievers, L. (2019). Macroeconomic impact of the German energy transition and its distribution by sectors and regions: Supplementary information 2: Description of the regional economic extension to ISI-Macro. *Ecological Economics*, *160*, 191–204.

Sievers, L., Breitschopf, B., Pfaff, M. & Schaffer, A. (2019). Macroeconomic impact of the German energy transition and its distribution by sectors and regions. *Ecological Economics*, *160*, 191–204.

Sievers, L., Deac, G., Elsland, R., Kockat, J., Kühn, A., Pfaff, M. & Pfluger, B. (2017). Beschäftigungseffekte der Energiewende in Bayern: Projektbericht: Unveröffentlicht. Fraunhofer ISI, Karlsruhe.

Sievers, L., Grimm, A. & Doll, C. (2019). Transformation der Mobilität -Bestimmung der Beschäftigungseffekte in 2035 mit einem Input-Output-Modell: Arbeitspapier 4 des Projektes im Auftrag der Hans-Böckler-Stiftung: Beschäftigungseffekte nachhaltiger Mobilität: Eine systemische Analyse der Perspektiven in Deutschland bis 2035. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe. Verfügbar 6. Februar 2020 unter https://www.m-five.de/pdf/ISI_HBS_NM_AP4_Sektorale_Besch%c3%a4ftigungseffekte_nachhaltiger_Mobilit%c3%a4t.pdf

Sievers, L. & Pfaff, M. (2016). Gesamtwirtschaftliche Nettoeffekte der Energiewende nach Regionen, Wirtschaftszweigen und Einkommensgruppen. Verfügbar unter https://www.impres-projekt.de/impres-de/content/veroeffentlichungen.php

Sievers, L. & Pfaff, M. (2019). Macroeconomic impact of the German energy transition and its distribution by sectors and regions: Supplementary information 1: Description of

the macroeconomic simulation model ISI-Macro. *Ecological Economics*, *160*, 191–204.

Smart, G., Smith, A., Warner, E., Sperstad, I. B., Prinsen, B. & Lacal-Arantegui, R. (2016). IEA Wind Task 26: Offshore Wind Farm Baseline Documentation. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).

Sorrell, S., Dimitropoulos, J. & Sommerville, M. (2009). Empirical estimates of the direct rebound effect: A review. *Energy Policy*, *37*(4), 1356–1371. doi:10.1016/j.enpol.2008.11.026

Sorrell, S., Mallett, A. & Nye, S. (2011). Barriers to industrial energy efficiency: A literature review.

Statistische Ämter des Bundes und der Länder. (2017). Wirtschaftszweiggliederung in den Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen nach WZ2008: Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung der Länder: Mehtode und Definitionen. Verfügbar 6. Juni 2017 unter www.vgrdl.de/VGRdL/MethDef/WZ2008.pdf

Steinbach, J. (2016). *Modellbasierte Untersuchung von Politikinstrumenten zur Förderung erneuerbarer Energien und Energieeffizienz im Gebäudebereich*. Fraunhofer IRB Verlag.

Sterman, J. D. (2000). *Business dynamics*.

Stiftung Offshore. (2019). Status Quo Offshore Windenergie. Verfügbar unter https://www.offshore-stiftung.de/status-quo-offshore-windenergie

Stone, R. & Brown, A. (1962). A Computable Model of Economic Growth. Part 1. Chapman and Hall, London.

Suh, S. (2004). Functions, commodities and environmental impacts in an ecological–economic model. *Ecological Economics*, *48*(4), 451–467.

Summers, L. H. (2015). Demand Side Secular Stagnation. *American Economic Review*, *105*(5), 60–65. doi:10.1257/aer.p20151103

Summers, L. H. (2016). The age of secular stagnation: What it is and what to do about it. *Foreign Aff*, *95*, 2.

Többen, J. (2017a). On the simultaneous estimation of physical and monetary commodity flows. *Economic Systems Research*, *29*(1), 1–24. doi:10.1080/09535314.2016.1271774

Többen, J. (2017b). Regional Net Impacts and Social Distribution Effects of Promoting Renewable Energies in Germany. *Ecological Economics*, *135*, 195–208.

Többen, J. & Kronenberg, T. H. (2015). Construction of Multi-Regional Input–Output Tables Using the Charm Method. *Economic Systems Research*, 1–21.

Többen, J. & Oosterhaven, J. (2017). *Effects of energy- and climate policy in Germany: A multiregional analysis*. Groningen: University of Groningen.

Turner, K. (2009). Negative rebound and disinvestment effects in response to an improvement in energy efficiency in the UK economy. *Energy Economics*, *31*(5), 648–666. doi:10.1016/j.eneco.2009.01.008

Ulrich, P., Distelkamp, M. & Lehr, U. (2012). Employment effects of renewable energy expansion on a regional level—first results of a model-based approach for Germany. *Sustainability*, *4*(2), 227–243.

Ulrich, P., Distelkamp, M., Lehr, U., Bickel, P. & Püttner, A. (2012). Erneuerbar beschäftigt in den Bundesländern! Bericht zur daten-und modellgestützten Abschätzung der aktuellen Bruttobeschäftigung in den Bundesländern. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

Ulrich, P. & Lehr, U. (2013). Erneuerbar beschäftigt in den Bundesländern: Bericht zur aktualisierten Abschätzung der Bruttobeschäftigung 2012 in den Bundesländern. Osnabrück.

Ulrich, P. & Lehr, U. (2014). Erneuerbar beschäftigt in den Bundesländern 2013. Osnabrück.

Ulrich, P. & Lehr, U. (2018). Erneuerbar beschäftigt in den Bundesländern. Osnabrück. Verfügbar unter http://hdl.handle.net/10419/184702

Ürge-Vorsatz, D., Kelemen, A., Tirado-Herrero, S., Thomas, S., Thema, J., Mzavanadze, N., ... Chatterjee, S. (2016). Measuring multiple impacts of low-carbon energy options in a green economy context. *Applied energy*, *179*, 1409–1426. doi:10.1016/j.apenergy.2016.07.027

Varian, H. R. (2014). *Grundzüge der Mikroökonomik*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.

Walz, R. & Ragwitz, M. (2011). *Erneuerbare Energien aus Sicht der Innovationsforschung: Konzeptionelle und empirische Grundlagen einer innovationsorientierten Ausgestaltung der Politik zur Förderung erneuerbarer Energietechnologien*. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag. Verfügbar unter http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-185879.html

Walz, R. & Schleich, J. (2009). *The Economics of Climate Change Policies: Macroeconomic Effects, Structural Adjustments and Technological Change* (1. Aufl.). Heidelberg: Physica-Verlag.

Wei, M., Patadia, S. & Kammen, D. M. (2010). Putting renewables and energy efficiency to work: How many jobs can the clean energy industry generate in the US? *Energy Policy*, *38*(2), 919–931.

Weiß, J., Prahl, A., Neumann, A., Schröder, A., Bettgenhäuser, K., Hermelink, A., ... v. Manteuffel, B. (2014). Kommunale Wertschöpfungseffekte durch energetische Gebäudesanierung (KoWeG). Berlin.

Weisz, H. & Duchin, F. (2006). Physical and monetary input–output analysis: What makes the difference? *Ecological Economics*, *57*(3), 534–541.

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen. (2011). *Welt im Wandel: Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation* (2., veränd. Aufl.). Berlin. Verfügbar unter http://www.wbgu.de/hauptgutachten/hg-2011-transformation/

# A. Anhang

## A.1. Systematik der Gebietseinheiten

Abbildung A.1.: Deutschland NUTS2 Regionen (Quelle: Eurostat, 2015b)

Tabelle A.1.: Systematik der Gebietseinheiten NUTS 2013 (Quellen: Eurostat, 2015b; International Organisation for Standardisation, 2013)

| NUTS2 | | NUTS1 | | |
|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | de11 | de1 | BW | Baden-Württemberg |
| Karlsruhe | de12 | | | |
| Freiburg | de13 | | | |
| Tübingen | de14 | | | |
| Oberbayern | de21 | de2 | BY | Bayern |
| Niederbayern | de22 | | | |
| Oberpfalz | de23 | | | |
| Oberfranken | de24 | | | |
| Mittelfranken | de25 | | | |
| Unterfranken | de26 | | | |
| Schwaben | de27 | | | |
| Berlin | de30 | de3 | BE | Berlin |
| Brandenburg | de40 | de4 | BB | Brandenburg |
| Bremen | de50 | de5 | HB | Bremen |
| Hamburg | de60 | de6 | HH | Hamburg |
| Darmstadt | de71 | de7 | HE | Hessen |
| Gießen | de72 | | | |
| Kassel | de73 | | | |
| Mecklenburg-Vorpommern | de80 | de8 | MV | Mecklenburg-Vorpommern |
| Braunschweig | de91 | de9 | NI | Niedersachsen |
| Hannover | de92 | | | |
| Lüneburg | de93 | | | |
| Weser-Ems | de94 | | | |
| Düsseldorf | dea1 | dea | NW | Nordrhein-Westfalen |
| Köln | dea2 | | | |
| Münster | dea3 | | | |
| Detmold | dea4 | | | |
| Arnsberg | dea5 | | | |
| Koblenz | deb1 | deb | RP | Rheinland-Pfalz |
| Trier | deb2 | | | |
| Rheinhessen-Pfalz | deb3 | | | |
| Saarland | dec0 | dec | SL | Saarland |
| Dresden | ded2 | ded | SN | Sachsen |
| Chemnitz | ded4 | | | |
| Leipzig | ded5 | | | |
| Sachsen-Anhalt | dee0 | dee | ST | Sachsen-Anhalt |
| Schleswig-Holstein | def0 | def | SH | Schleswig-Holstein |
| Thüringen | deg0 | deg | TH | Thüringen |

## A.2. Klassifikation der Wirtschaftszweige

Tabelle A.2.: Gütergruppen und Wirtschafts(unter)abschnitte in ISI-Macro

| Nr. | CPA | Gütergruppe | WUA | WA |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 01 | Erzeugnisse der Landwirtschaft, Jagd und Dienstleistungen | AA | A |
| 2 | 02 | Forstwirtschaftliche Erzeugnisse und Dienstleistungen | | |
| 3 | 03 | Fische, Fischerei- und Aquakulturerzeugnisse | | |
| 4 | 05 | Kohle | BA | B |
| 5 | 06 | Erdöl und Erdgas | | |
| 6 | 07-09 | Erze, Steine u. Erden, sonst. Bergbauerzeugn. u. Dienstleistg. | | |
| 7 | 10-12 | Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerzeugnisse | CA | C |
| 8 | 13-15 | Textilien, Bekleidung, Leder- und Lederwaren | CB | |
| 9 | 16 | Holz, Holz-, Flecht-, Korb- und Korkwaren (ohne Möbel) | CC | |
| 10 | 17 | Papier, Pappe und Waren daraus | | |
| 11 | 18 | Druckereileistungen, bespielte Ton-, Bild- und Datenträger | | |
| 12 | 19 | Kokerei- und Mineralölerzeugnisse | CD | |
| 13 | 20 | Chemische Erzeugnisse | CE | |
| 14 | 21 | Pharmazeutische Erzeugnisse | CF | |
| 15 | 22 | Gummi- und Kunststoffwaren | CG | |
| 16 | 23.1 | Glas und Glaswaren | | |
| 17 | 23.2-23.9 | Keramik, bearbeitete Steine und Erden | | |
| 18 | 24.1-24.3 | Roheisen, Stahl, Erzeugn. der ersten Bearbeitung von Eisen und Stahl | CH | |
| 19 | 24.4 | NE-Metalle und Halbzeug daraus | | |
| 20 | 24.5 | Gießereierzeugnisse | | |
| 21 | 25 | Metallerzeugnisse | | |
| 22 | 26 | DV-Geräte, elektron. u. optische Erzeugnisse | CI | |
| 23 | 27 | Elektrische Ausrüstungen | CJ | |
| 24 | 28 | Maschinen | CK | |
| 25 | 29 | Kraftwagen und Kraftwagenteile | CL | |
| 26 | 30 | Sonstige Fahrzeuge | | |
| 27 | 31-32 | Herstellung von Möbeln und sonstigen Waren | CM | |
| 28 | 33 | Reparatur, Instandh. u. Installation v. Maschinen u. Ausrüstungen | | |
| 29 | 35.1, 35.3 | Elektr. Strom, Dienstleistg. der Elektriz.-, Wärme- und Kälteversorg. | DA | D |
| 30 | 35.2 | Industriell erzeugte Gase, Dienstleistungen der Gasversorgung | | |
| 31 | 36 | Wasser, Dienstleistungen der Wasserversorgung | EA | E |
| 32 | 37-39 | Dienstleistg. d. Abwasser-, Abfallentsorg. u. Rückgewinnung | | |
| 33 | 41 | Hochbauarbeiten | FA | F |
| 34 | 42 | Tiefbauarbeiten | | |
| 35 | 43 | Vorb. Baustellen-, Bauinstallations- und sonstige Ausbauarbeiten | | |
| 36 | 45 | Handelsleistungen mit Kfz, Instandhaltung und Reparatur an Kfz | GA | G |
| 37 | 46 | Großhandelsleistungen (ohne Handelsleistungen mit Kfz) | | |
| 38 | 47 | Einzelhandelsleistungen (ohne Handelsleistungen mit Kfz) | | |

Tabelle A.2.: Gütergruppen und Wirtschafts(unter)abschnitte in ISI-Macro (Fortsetzung)

| Nr. | CPA | Gütergruppe | WUA | WA |
|---|---|---|---|---|
| 39 | 49 | Landverkehrs- und Transportleistungen in Rohrfernleitungen | HA | H |
| 40 | 50 | Schifffahrtsleistungen | | |
| 41 | 51 | Luftfahrtleistungen | | |
| 42 | 52 | Lagereileistungen, sonstige Dienstleistungen für den Verkehr | | |
| 43 | 53 | Post-, Kurier- und Expressdienstleistungen | | |
| 44 | 55-56 | Beherbergungs- und Gastronomiedienstleistungen | IA | I |
| 45 | 58 | Dienstleistungen des Verlagswesen | JA | J |
| 46 | 59-60 | Dienstleistg. v. audiovisuell. Medien, Musikverlag. u. RF-veranstaltern | | |
| 47 | 61 | Telekommunikationsdienstleistungen | JB | |
| 48 | 62-63 | IT- und Informationsdienstleistungen | JC | |
| 49 | 64 | Finanzdienstleistungen | KA | K |
| 50 | 65 | Dienstleistungen von Versicherungen und Pensionskassen | | |
| 51 | 66 | Mit Finanz- und Versicherungsdienstleistg. verbundene Dienstleistg. | | |
| 52 | 68 | Dienstleistungen des Grundstücks- und Wohnungswesens | LA | L |
| 53 | 69-70 | Dienstleistungen der Rechts-, Steuer- und Unternehmensberatung | MA | M |
| 54 | 71 | Dienstleistg. v. Architektur- u. Ing.büros u.d..techn.,physik.U.suchung | | |
| 55 | 72 | Forschungs- und Entwicklungsleistungen | MB | |
| 56 | 73 | Werbe- und Marktforschungsleistungen | MC | |
| 57 | 74-75 | Sonst. freiberuf., wiss., techn. u. veterinärmedizinische Dienstleistg. | | |
| 58 | 77 | Dienstleistungen der Vermietung von beweglichen Sachen | NA | N |
| 59 | 78 | Dienstleistungen der Vermittlung und Überlassung von Arbeitskräften | | |
| 60 | 79 | Dienstleistg. v. Reisebüros, -veranstaltern u. sonst. Reservierungen | | |
| 61 | 80-82 | Wach-, Sicherheitsdienstlg., wirtschaftl. Dienstleistg. a.n.g | | |
| 62 | 84.1-84.2 | Dienstleistungen der öffentlichen Verwaltung und der Verteidigung | OA | O |
| 63 | 84.3 | Dienstleistungen der Sozialversicherung | | |
| 64 | 85 | Erziehungs- und Unterrichtsdienstleistungen | PA | P |
| 65 | 86 | Dienstleistungen des Gesundheitswesens | QA | Q |
| 66 | 87-88 | Dienstleistungen von Heimen und des Sozialwesens | QB | |
| 67 | 90-92 | Dienstleistungen der Kunst, der Kultur und des Glücksspiels | RA | R |
| 68 | 93 | Dienstleistungen des Sports, der Unterhaltung und der Erholung | | |
| 69 | 94 | Dienstleistg. d. Interessenvertr., kirchl. u. sonst. Vereinigungen | SA | S |
| 70 | 95 | Reparaturarbeiten an DV-Geräten und Gebrauchsgütern | | |
| 71 | 96 | Sonstige überwiegend persönliche Dienstleistungen | | |
| 72 | 97-98 | Waren und Dienstleistungen privater Haushalte o.a.S. | TA | T |

# A.3. Bruttowertschöpfung nach Wirtschaftsunterabschnitten und Bundesländern

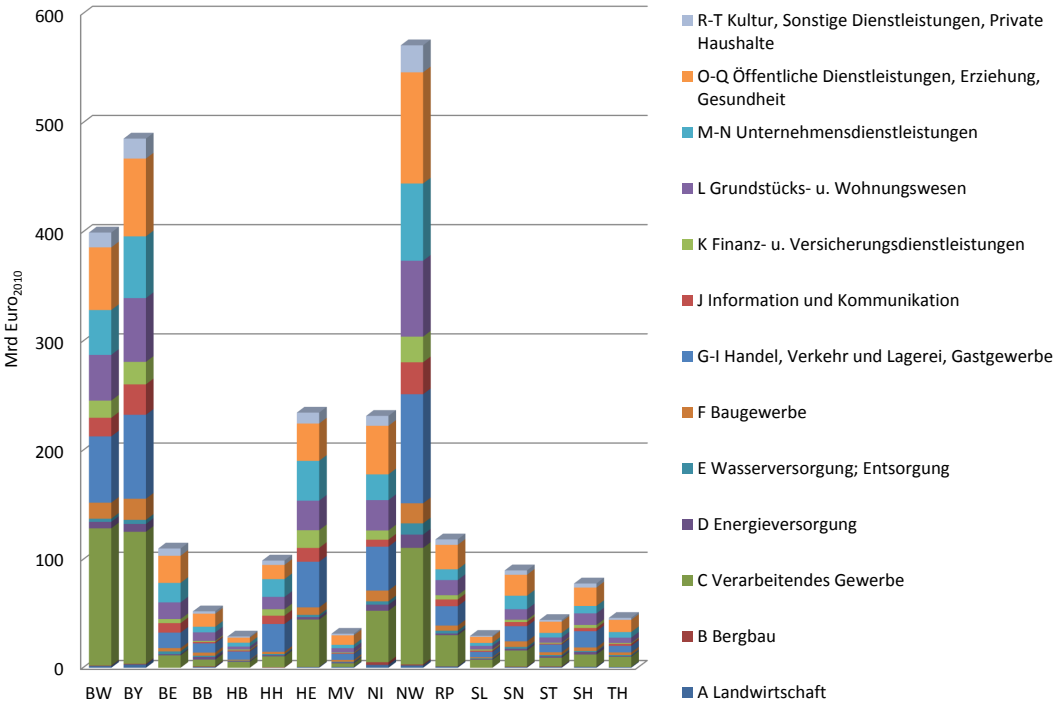



Abbildung A.2.: Bruttowertschöpfung je Bundesland und Wirtschaftsabschnitt in Milliarden Euro in 2020

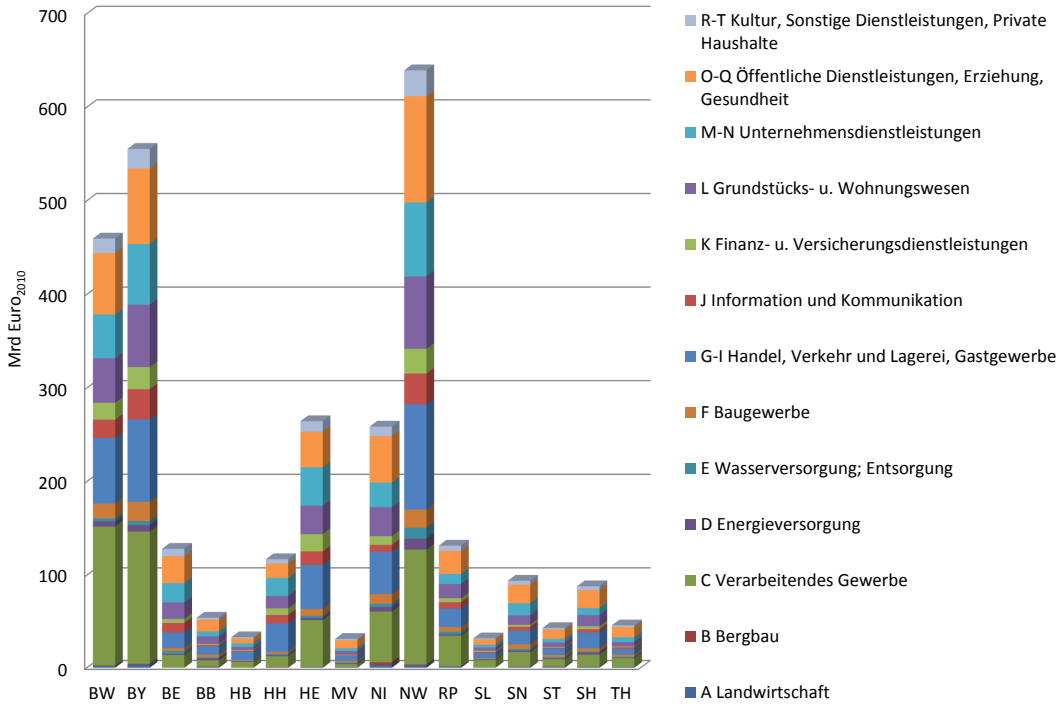



Abbildung A.3.: Bruttowertschöpfung je Bundesland und Wirtschaftsabschnitt in Milliarden Euro in 2030

## A.4. Zugebaute Stromerzeugungskapazitäten nach Technologien und Regionen

Tabelle A.3.: Braunkohle: Zugebaute Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen

| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Karlsruhe | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Freiburg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Tübingen | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberbayern | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Niederbayern | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberpfalz | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberfranken | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mittelfranken | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Unterfranken | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Schwaben | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Berlin | 5 | 10874 | 0 | 0 |
| Brandenburg | 13459 | 254239 | 0 | 0 |
| Bremen | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hamburg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Darmstadt | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Gießen | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kassel | 18 | 2494 | 0 | 0 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Braunschweig | 580 | 23875 | 0 | 0 |
| Hannover | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Lüneburg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Weser-Ems | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Düsseldorf | 185529 | 3120 | 0 | 0 |
| Köln | 189086 | 3180 | 0 | 0 |
| Münster | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Detmold | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Arnsberg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Koblenz | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Trier | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rheinhessen-Pfalz | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Saarland | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Dresden | 54114 | 6538 | 0 | 0 |
| Chemnitz | 3315 | 397 | 0 | 0 |
| Leipzig | 39019 | 4714 | 0 | 0 |
| Sachsen-Anhalt | 11383 | 44451 | 0 | 0 |
| Schleswig-Holstein | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Thüringen | 1116 | 1120 | 0 | 0 |
| Summe | 497623 | 355000 | 0 | 0 |

Tabelle A.4.: Steinkohle: Zugebaute Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen

| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 35722 | 32072 | 50097 | 2324 |
| Karlsruhe | 80434 | 72217 | 112802 | 5233 |
| Freiburg | 1001 | 899 | 1404 | 65 |
| Tübingen | 446 | 400 | 625 | 29 |
| Oberbayern | 17321 | 15551 | 24291 | 1127 |
| Niederbayern | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberpfalz | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberfranken | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mittelfranken | 375 | 336 | 525 | 24 |
| Unterfranken | 550 | 475 | 756 | 33 |
| Schwaben | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Berlin | 21868 | 20748 | 19720 | 7059 |
| Brandenburg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Bremen | 15989 | 7037 | 16019 | 0 |
| Hamburg | 15926 | 7010 | 15957 | 0 |
| Darmstadt | 26032 | 24064 | 36657 | 1659 |
| Gießen | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kassel | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 14266 | 13248 | 12921 | 4423 |
| Braunschweig | 41792 | 20576 | 47078 | 813 |
| Hannover | 3185 | 4062 | 4738 | 166 |
| Lüneburg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Weser-Ems | 14475 | 6644 | 14781 | 1 |
| Düsseldorf | 56110 | 29288 | 61043 | 0 |
| Köln | 1528 | 798 | 1662 | 0 |
| Münster | 50426 | 26321 | 54859 | 0 |
| Detmold | 13704 | 19100 | 21401 | 807 |
| Arnsberg | 75627 | 51481 | 88800 | 811 |
| Koblenz | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Trier | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rheinhessen-Pfalz | 288 | 259 | 404 | 19 |
| Saarland | 47474 | 42624 | 66578 | 3089 |
| Dresden | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Chemnitz | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Leipzig | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sachsen-Anhalt | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Schleswig-Holstein | 19226 | 8491 | 19257 | 18 |
| Thüringen | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Summe | 553763 | 403700 | 672375 | 27700 |

Tabelle A.5.: Erdgas: Zugebaute Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen

| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 0 | 15229 | 16027 | 17579 |
| Karlsruhe | 0 | 16889 | 17774 | 19495 |
| Freiburg | 0 | 4691 | 4937 | 5415 |
| Tübingen | 0 | 892 | 938 | 1029 |
| Oberbayern | 0 | 98218 | 103361 | 113373 |
| Niederbayern | 0 | 4481 | 4716 | 5173 |
| Oberpfalz | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberfranken | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mittelfranken | 0 | 33434 | 35185 | 38593 |
| Unterfranken | 0 | 10029 | 10554 | 13025 |
| Schwaben | 0 | 2485 | 2615 | 2868 |
| Berlin | 0 | 0 | 0 | 22552 |
| Brandenburg | 0 | 0 | 0 | 19999 |
| Bremen | 0 | 0 | 0 | 47 |
| Hamburg | 0 | 0 | 0 | 72 |
| Darmstadt | 0 | 36168 | 38062 | 47228 |
| Gießen | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kassel | 0 | 0 | 0 | 10609 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 1 | 0 | 0 | 6310 |
| Braunschweig | 0 | 0 | 0 | 5167 |
| Hannover | 0 | 0 | 0 | 10806 |
| Lüneburg | 0 | 0 | 0 | 2353 |
| Weser-Ems | 0 | 0 | 0 | 25915 |
| Düsseldorf | 0 | 0 | 0 | 54083 |
| Köln | 0 | 0 | 0 | 63140 |
| Münster | 0 | 0 | 0 | 7747 |
| Detmold | 0 | 0 | 0 | 25007 |
| Arnsberg | 0 | 0 | 0 | 59307 |
| Koblenz | 0 | 593 | 624 | 1757 |
| Trier | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rheinhessen-Pfalz | 2 | 61296 | 64505 | 70754 |
| Saarland | 0 | 3724 | 3919 | 4299 |
| Dresden | 0 | 0 | 0 | 16130 |
| Chemnitz | 0 | 8 | 9 | 4617 |
| Leipzig | 0 | 0 | 0 | 8989 |
| Sachsen-Anhalt | 0 | 0 | 0 | 24273 |
| Schleswig-Holstein | 0 | 0 | 0 | 511 |
| Thüringen | 0 | 262 | 276 | 18980 |
| Summe | 0 | 288400 | 303500 | 727200 |

Tabelle A.6.: PV-Aufdachanlagen: Zugebaute Kapazität in kW nach Regionen

| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 66670 | 2651 | 0 | 2782 |
| Karlsruhe | 71644 | 704 | 8399 | 3763 |
| Freiburg | 123545 | 2659 | 75616 | 19558 |
| Tübingen | 155592 | 1600 | 88435 | 19118 |
| Oberbayern | 436054 | 2672 | 336728 | 53523 |
| Niederbayern | 24715 | 2964 | 0 | 3830 |
| Oberpfalz | 27640 | 2196 | 0 | 2206 |
| Oberfranken | 1551 | 825 | 0 | 844 |
| Mittelfranken | 0 | 2102 | 0 | 2102 |
| Unterfranken | 7040 | 1439 | 0 | 1619 |
| Schwaben | 134596 | 1596 | 91413 | 13505 |
| Berlin | 0 | 0 | 61973 | 427 |
| Brandenburg | 0 | 419 | 154401 | 1796 |
| Bremen | 0 | 11 | 4172 | 366 |
| Hamburg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Darmstadt | 116702 | 278 | 0 | 406 |
| Gießen | 0 | 383 | 14346 | 1606 |
| Kassel | 0 | 880 | 3864 | 2469 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 0 | 488 | 45579 | 1017 |
| Braunschweig | 0 | 271 | 28419 | 3157 |
| Hannover | 0 | 236 | 16115 | 1933 |
| Lüneburg | 0 | 591 | 11314 | 2178 |
| Weser-Ems | 0 | 1142 | 55435 | 5111 |
| Düsseldorf | 72 | 14 | 247915 | 4813 |
| Köln | 11957 | 84 | 212556 | 5835 |
| Münster | 0 | 355 | 125758 | 2926 |
| Detmold | 0 | 459 | 33775 | 2810 |
| Arnsberg | 0 | 601 | 166941 | 4273 |
| Koblenz | 6256 | 395 | 35344 | 1269 |
| Trier | 12947 | 370 | 1293 | 1289 |
| Rheinhessen-Pfalz | 73678 | 400 | 0 | 511 |
| Saarland | 42041 | 91 | 0 | 91 |
| Dresden | 0 | 30 | 45424 | 514 |
| Chemnitz | 0 | 121 | 80306 | 944 |
| Leipzig | 0 | 39 | 36091 | 423 |
| Sachsen-Anhalt | 0 | 195 | 151133 | 2214 |
| Schleswig-Holstein | 0 | 1203 | 29325 | 5650 |
| Thüringen | 0 | 359 | 96241 | 2205 |
| Summe | 1312698 | 30822 | 2258310 | 179082 |

Tabelle A.7.: PV-Freiflächenanlagen: Zugebaute Kapazität in kW nach Regionen

| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 0 | 44 | 19077 | 1040 |
| Karlsruhe | 0 | 37 | 12300 | 471 |
| Freiburg | 121 | 175 | 11480 | 451 |
| Tübingen | 25227 | 0 | 82283 | 1441 |
| Oberbayern | 40481 | 132 | 109008 | 2378 |
| Niederbayern | 0 | 33 | 64427 | 2537 |
| Oberpfalz | 0 | 232 | 40458 | 1911 |
| Oberfranken | 0 | 64 | 10546 | 497 |
| Mittelfranken | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Unterfranken | 0 | 0 | 2283 | 164 |
| Schwaben | 39331 | 0 | 87905 | 1636 |
| Berlin | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Brandenburg | 0 | 0 | 0 | 11 |
| Bremen | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hamburg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Darmstadt | 0 | 0 | 4524 | 216 |
| Gießen | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kassel | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 0 | 0 | 0 | 53 |
| Braunschweig | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hannover | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Lüneburg | 0 | 0 | 394 | 13 |
| Weser-Ems | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Düsseldorf | 0 | 0 | 0 | 5 |
| Köln | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Münster | 0 | 500 | 0 | 500 |
| Detmold | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Arnsberg | 0 | 65 | 0 | 65 |
| Koblenz | 0 | 0 | 0 | 155 |
| Trier | 0 | 40 | 621 | 152 |
| Rheinhessen-Pfalz | 0 | 684 | 23744 | 1886 |
| Saarland | 0 | 0 | 1917 | 183 |
| Dresden | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Chemnitz | 0 | 0 | 0 | 4 |
| Leipzig | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sachsen-Anhalt | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Schleswig-Holstein | 0 | 77 | 0 | 77 |
| Thüringen | 0 | 34 | 0 | 34 |
| Summe | 105160 | 2117 | 470967 | 15883 |

Tabelle A.8.: Onshore-Wind: Zugebaute Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen

| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 0 | 0 | 0 | 7618 |
| Karlsruhe | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Freiburg | 0 | 603 | 0 | 603 |
| Tübingen | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberbayern | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Niederbayern | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberpfalz | 0 | 949 | 1186 | 0 |
| Oberfranken | 0 | 0 | 0 | 14372 |
| Mittelfranken | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Unterfranken | 0 | 0 | 0 | 622 |
| Schwaben | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Berlin | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Brandenburg | 0 | 7330 | 1586 | 7579 |
| Bremen | 4082 | 3747 | 5247 | 6378 |
| Hamburg | 0 | 1653 | 0 | 2482 |
| Darmstadt | 0 | 0 | 0 | 1591 |
| Gießen | 298 | 2742 | 1306 | 1936 |
| Kassel | 662 | 6081 | 2896 | 4293 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 141589 | 154356 | 149917 | 186173 |
| Braunschweig | 1302 | 12003 | 5744 | 8487 |
| Hannover | 7244 | 101737 | 102171 | 108892 |
| Lüneburg | 116539 | 129613 | 156410 | 219596 |
| Weser-Ems | 240375 | 167403 | 350757 | 282729 |
| Düsseldorf | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Köln | 0 | 0 | 12834 | 355 |
| Münster | 0 | 0 | 21458 | 593 |
| Detmold | 2253 | 20705 | 9863 | 14617 |
| Arnsberg | 556 | 11445 | 5662 | 8214 |
| Koblenz | 0 | 1181 | 4913 | 9121 |
| Trier | 0 | 0 | 2045 | 7805 |
| Rheinhessen-Pfalz | 0 | 0 | 0 | 2637 |
| Saarland | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Dresden | 0 | 9759 | 11649 | 69745 |
| Chemnitz | 0 | 1442 | 1803 | 28049 |
| Leipzig | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sachsen-Anhalt | 150 | 1934 | 1350 | 6254 |
| Schleswig-Holstein | 537090 | 180487 | 586920 | 292986 |
| Thüringen | 857 | 10578 | 7131 | 48210 |
| Summe | 1052996 | 825745 | 1442848 | 1341936 |

Tabelle A.9.: Offshore-Wind: Zugebaute Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen

| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Karlsruhe | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Freiburg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Tübingen | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberbayern | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Niederbayern | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberpfalz | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberfranken | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mittelfranken | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Unterfranken | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Schwaben | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Berlin | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Brandenburg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Bremen | 150732 | 0 | 150718 | 75420 |
| Hamburg | 150732 | 0 | 150718 | 75420 |
| Darmstadt | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Gießen | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kassel | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 61000 | 0 | 61000 | 471200 |
| Braunschweig | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hannover | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Lüneburg | 150732 | 0 | 150718 | 75420 |
| Weser-Ems | 150732 | 0 | 150718 | 75420 |
| Düsseldorf | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Köln | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Münster | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Detmold | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Arnsberg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Koblenz | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Trier | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rheinhessen-Pfalz | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Saarland | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Dresden | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Chemnitz | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Leipzig | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sachsen-Anhalt | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Schleswig-Holstein | 150732 | 0 | 150718 | 75420 |
| Thüringen | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Summe | 814660 | 0 | 814590 | 848300 |

## A.5. Stillgelegte Stromerzeugungskapazitäten nach Technologien und Regionen

Tabelle A.10.: Braunkohle: Stillgelegte Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen

| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Karlsruhe | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Freiburg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Tübingen | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberbayern | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Niederbayern | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberpfalz | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberfranken | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mittelfranken | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Unterfranken | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Schwaben | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Berlin | 6360 | 10874 | 6360 | 10874 |
| Brandenburg | 147770 | 254240 | 147770 | 254234 |
| Bremen | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hamburg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Darmstadt | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Gießen | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kassel | 1051 | 2494 | 1051 | 2497 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Braunschweig | 9797 | 23875 | 9797 | 23905 |
| Hannover | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Lüneburg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Weser-Ems | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Düsseldorf | 453659 | 3120 | 453659 | 3135 |
| Köln | 462357 | 3180 | 462357 | 3195 |
| Münster | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Detmold | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Arnsberg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Koblenz | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Trier | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rheinhessen-Pfalz | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Saarland | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Dresden | 0 | 6538 | 0 | 6520 |
| Chemnitz | 0 | 397 | 0 | 396 |
| Leipzig | 0 | 4714 | 0 | 4701 |
| Sachsen-Anhalt | 23262 | 44450 | 23262 | 44461 |
| Schleswig-Holstein | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Thüringen | 410 | 1120 | 410 | 1121 |
| Summe | 1104667 | 355001 | 1104666 | 355040 |

Tabelle A.11.: Steinkohle: Stillgelegte Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen

| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 40657 | 70560 | 40643 | 70561 |
| Karlsruhe | 91547 | 158879 | 91514 | 158881 |
| Freiburg | 1139 | 1977 | 1139 | 1977 |
| Tübingen | 507 | 880 | 507 | 880 |
| Oberbayern | 19714 | 34213 | 19707 | 34213 |
| Niederbayern | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberpfalz | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberfranken | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mittelfranken | 426 | 740 | 426 | 740 |
| Unterfranken | 754 | 1051 | 754 | 1051 |
| Schwaben | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Berlin | 8078 | 40066 | 8023 | 40081 |
| Brandenburg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Bremen | 34560 | 5325 | 34549 | 5333 |
| Hamburg | 34426 | 5304 | 34414 | 5312 |
| Darmstadt | 38891 | 54710 | 38883 | 54711 |
| Gießen | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kassel | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 6283 | 25291 | 6248 | 25300 |
| Braunschweig | 78308 | 44226 | 78277 | 44196 |
| Hannover | 17146 | 10205 | 17148 | 10206 |
| Lüneburg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Weser-Ems | 36850 | 11259 | 36842 | 11264 |
| Düsseldorf | 220443 | 133818 | 220442 | 133806 |
| Köln | 6004 | 3644 | 6004 | 3644 |
| Münster | 198113 | 120263 | 198113 | 120252 |
| Detmold | 82642 | 52660 | 82653 | 52665 |
| Arnsberg | 326063 | 200440 | 326074 | 200431 |
| Koblenz | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Trier | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rheinhessen-Pfalz | 328 | 570 | 328 | 570 |
| Saarland | 54033 | 93774 | 54014 | 93775 |
| Dresden | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Chemnitz | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Leipzig | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sachsen-Anhalt | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Schleswig-Holstein | 41458 | 6486 | 41444 | 6496 |
| Thüringen | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Summe | 1338369 | 1076340 | 1338144 | 1076344 |

Tabelle A.12.: Erdgas: Stillgelegte Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen

| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 29488 | 7094 | 29487 | 7093 |
| Karlsruhe | 32702 | 7867 | 32701 | 7867 |
| Freiburg | 9083 | 2185 | 9083 | 2185 |
| Tübingen | 1727 | 415 | 1726 | 415 |
| Oberbayern | 190177 | 45748 | 190167 | 45747 |
| Niederbayern | 8677 | 2087 | 8677 | 2087 |
| Oberpfalz | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberfranken | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mittelfranken | 64738 | 15573 | 64735 | 15573 |
| Unterfranken | 24361 | 4980 | 24360 | 4980 |
| Schwaben | 4811 | 1157 | 4811 | 1157 |
| Berlin | 39931 | 62822 | 39930 | 62811 |
| Brandenburg | 29876 | 50994 | 29875 | 50988 |
| Bremen | 1744 | 48 | 1744 | 48 |
| Hamburg | 2651 | 73 | 2651 | 73 |
| Darmstadt | 85832 | 18197 | 85828 | 18198 |
| Gießen | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kassel | 37494 | 1428 | 37493 | 1432 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 13062 | 17483 | 13062 | 17480 |
| Braunschweig | 17956 | 1390 | 17956 | 1392 |
| Hannover | 41213 | 2032 | 41212 | 2037 |
| Lüneburg | 48879 | 2343 | 48878 | 2350 |
| Weser-Ems | 231200 | 15546 | 231197 | 15582 |
| Düsseldorf | 78614 | 26632 | 78612 | 26641 |
| Köln | 91780 | 31092 | 91778 | 31103 |
| Münster | 11261 | 3815 | 11261 | 3816 |
| Detmold | 78017 | 5148 | 78015 | 5157 |
| Arnsberg | 109094 | 25268 | 109091 | 25281 |
| Koblenz | 2736 | 799 | 2736 | 799 |
| Trier | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rheinhessen-Pfalz | 118685 | 28551 | 118679 | 28550 |
| Saarland | 7211 | 1735 | 7210 | 1735 |
| Dresden | 10094 | 29199 | 10093 | 29205 |
| Chemnitz | 2900 | 8345 | 2899 | 8347 |
| Leipzig | 5625 | 16272 | 5624 | 16275 |
| Sachsen-Anhalt | 33231 | 45368 | 33229 | 45370 |
| Schleswig-Holstein | 18588 | 529 | 18587 | 532 |
| Thüringen | 21661 | 28508 | 21659 | 28514 |
| Summe | 1505099 | 510721 | 1505045 | 510822 |

Tabelle A.13.: PV-Aufdachanlagen: Stillgelegte Kapazität in kW nach Regionen

| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 0 | 14040 | 26715 | 14040 |
| Karlsruhe | 0 | 7502 | 0 | 7502 |
| Freiburg | 0 | 8953 | 0 | 8953 |
| Tübingen | 0 | 11407 | 0 | 11407 |
| Oberbayern | 0 | 19297 | 0 | 19297 |
| Niederbayern | 0 | 16238 | 31420 | 16238 |
| Oberpfalz | 0 | 9473 | 22269 | 9473 |
| Oberfranken | 0 | 4575 | 7929 | 4575 |
| Mittelfranken | 0 | 9008 | 10673 | 9008 |
| Unterfranken | 0 | 7344 | 10951 | 7344 |
| Schwaben | 0 | 13922 | 0 | 13922 |
| Berlin | 69 | 403 | 0 | 403 |
| Brandenburg | 9528 | 1399 | 0 | 1399 |
| Bremen | 246 | 136 | 0 | 136 |
| Hamburg | 0 | 304 | 0 | 304 |
| Darmstadt | 0 | 3528 | 1731 | 3528 |
| Gießen | 4913 | 2228 | 0 | 2228 |
| Kassel | 15127 | 3291 | 0 | 3291 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 7997 | 925 | 0 | 925 |
| Braunschweig | 4604 | 1559 | 0 | 1559 |
| Hannover | 6602 | 1909 | 0 | 1909 |
| Lüneburg | 2763 | 2553 | 0 | 2553 |
| Weser-Ems | 24443 | 5887 | 0 | 5887 |
| Düsseldorf | 0 | 3010 | 0 | 3010 |
| Köln | 0 | 2623 | 0 | 2623 |
| Münster | 4883 | 5137 | 0 | 5137 |
| Detmold | 6933 | 5174 | 0 | 5174 |
| Arnsberg | 10575 | 3311 | 0 | 3311 |
| Koblenz | 0 | 1942 | 0 | 1942 |
| Trier | 0 | 1137 | 0 | 1137 |
| Rheinhessen-Pfalz | 0 | 3979 | 305 | 3979 |
| Saarland | 0 | 796 | 1366 | 796 |
| Dresden | 2339 | 582 | 0 | 582 |
| Chemnitz | 1009 | 979 | 0 | 979 |
| Leipzig | 1782 | 513 | 0 | 513 |
| Sachsen-Anhalt | 5584 | 1446 | 0 | 1446 |
| Schleswig-Holstein | 27217 | 4358 | 0 | 4358 |
| Thüringen | 4214 | 2169 | 0 | 2169 |
| Summe | 140827 | 183037 | 113358 | 183037 |

Tabelle A.14.: PV-Freiflächenanlagen: Stillgelegte Kapazität in kW nach Regionen

| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 6979 | 216 | 0 | 216 |
| Karlsruhe | 363 | 411 | 0 | 411 |
| Freiburg | 0 | 366 | 0 | 366 |
| Tübingen | 0 | 786 | 0 | 786 |
| Oberbayern | 0 | 1803 | 0 | 1803 |
| Niederbayern | 1063 | 2350 | 0 | 2350 |
| Oberpfalz | 3447 | 1108 | 0 | 1108 |
| Oberfranken | 802 | 154 | 0 | 154 |
| Mittelfranken | 0 | 514 | 0 | 514 |
| Unterfranken | 1999 | 721 | 0 | 721 |
| Schwaben | 0 | 1278 | 0 | 1278 |
| Berlin | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Brandenburg | 297 | 0 | 0 | 0 |
| Bremen | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hamburg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Darmstadt | 1126 | 464 | 0 | 464 |
| Gießen | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kassel | 0 | 50 | 0 | 50 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 1661 | 423 | 0 | 423 |
| Braunschweig | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hannover | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Lüneburg | 392 | 99 | 0 | 99 |
| Weser-Ems | 50 | 85 | 0 | 85 |
| Düsseldorf | 138 | 0 | 0 | 0 |
| Köln | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Münster | 0 | 581 | 0 | 581 |
| Detmold | 0 | 45 | 0 | 45 |
| Arnsberg | 0 | 65 | 0 | 65 |
| Koblenz | 4045 | 413 | 0 | 413 |
| Trier | 2323 | 40 | 0 | 40 |
| Rheinhessen-Pfalz | 7684 | 1434 | 0 | 1434 |
| Saarland | 2882 | 260 | 0 | 260 |
| Dresden | 0 | 141 | 0 | 141 |
| Chemnitz | 113 | 415 | 0 | 415 |
| Leipzig | 0 | 905 | 0 | 905 |
| Sachsen-Anhalt | 0 | 605 | 0 | 605 |
| Schleswig-Holstein | 0 | 209 | 0 | 209 |
| Thüringen | 0 | 275 | 0 | 275 |
| Summe | 35365 | 16217 | 0 | 16217 |

Tabelle A.15.: Onshore-Wind: Stillgelegte Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen

| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 0 | 13939 | 0 | 13939 |
| Karlsruhe | 0 | 3800 | 0 | 3800 |
| Freiburg | 0 | 9561 | 0 | 9561 |
| Tübingen | 0 | 4667 | 0 | 4667 |
| Oberbayern | 0 | 2680 | 0 | 2680 |
| Niederbayern | 0 | 663 | 0 | 663 |
| Oberpfalz | 0 | 2702 | 0 | 2702 |
| Oberfranken | 0 | 4761 | 0 | 4761 |
| Mittelfranken | 0 | 5203 | 0 | 5203 |
| Unterfranken | 0 | 2228 | 0 | 2228 |
| Schwaben | 0 | 3088 | 0 | 3088 |
| Berlin | 0 | 920 | 0 | 920 |
| Brandenburg | 0 | 245129 | 0 | 245129 |
| Bremen | 0 | 3163 | 0 | 3163 |
| Hamburg | 368 | 2305 | 0 | 2305 |
| Darmstadt | 0 | 6674 | 0 | 6674 |
| Gießen | 0 | 12535 | 0 | 12535 |
| Kassel | 0 | 18913 | 0 | 18913 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 0 | 112318 | 0 | 112318 |
| Braunschweig | 0 | 39772 | 0 | 39772 |
| Hannover | 0 | 94503 | 0 | 94503 |
| Lüneburg | 0 | 109769 | 0 | 109769 |
| Weser-Ems | 0 | 195919 | 0 | 195919 |
| Düsseldorf | 0 | 19405 | 0 | 19405 |
| Köln | 0 | 29026 | 0 | 29026 |
| Münster | 0 | 54478 | 0 | 54478 |
| Detmold | 0 | 47933 | 0 | 47933 |
| Arnsberg | 0 | 38839 | 0 | 38839 |
| Koblenz | 1900 | 23843 | 0 | 23843 |
| Trier | 0 | 35021 | 0 | 35021 |
| Rheinhessen-Pfalz | 0 | 23568 | 0 | 23568 |
| Saarland | 0 | 6361 | 0 | 6361 |
| Dresden | 275 | 32374 | 0 | 32374 |
| Chemnitz | 0 | 20836 | 0 | 20836 |
| Leipzig | 0 | 22675 | 0 | 22675 |
| Sachsen-Anhalt | 0 | 212744 | 0 | 212744 |
| Schleswig-Holstein | 0 | 171900 | 0 | 171900 |
| Thüringen | 0 | 50957 | 0 | 50957 |
| Summe | 2543 | 1685169 | 0 | 1685169 |

Tabelle A.16.: Biomasse: Stillgelegte Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen

| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 0 | 4212 | 0 | 4212 |
| Karlsruhe | 0 | 7508 | 0 | 7508 |
| Freiburg | 0 | 3127 | 0 | 3127 |
| Tübingen | 0 | 3896 | 0 | 3896 |
| Oberbayern | 0 | 4949 | 0 | 4949 |
| Niederbayern | 0 | 4168 | 0 | 4168 |
| Oberpfalz | 0 | 4517 | 0 | 4517 |
| Oberfranken | 0 | 4167 | 0 | 4167 |
| Mittelfranken | 0 | 4168 | 0 | 4168 |
| Unterfranken | 0 | 4339 | 0 | 4339 |
| Schwaben | 0 | 4383 | 0 | 4383 |
| Berlin | 0 | 966 | 0 | 966 |
| Brandenburg | 0 | 9634 | 0 | 9634 |
| Bremen | 0 | 217 | 0 | 217 |
| Hamburg | 0 | 661 | 0 | 661 |
| Darmstadt | 0 | 2352 | 0 | 2352 |
| Gießen | 0 | 1237 | 0 | 1237 |
| Kassel | 0 | 1174 | 0 | 1174 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 0 | 7811 | 0 | 7811 |
| Braunschweig | 0 | 4753 | 0 | 4753 |
| Hannover | 0 | 6174 | 0 | 6174 |
| Lüneburg | 0 | 8141 | 0 | 8141 |
| Weser-Ems | 0 | 9653 | 0 | 9653 |
| Düsseldorf | 0 | 2911 | 0 | 2911 |
| Köln | 0 | 2633 | 0 | 2633 |
| Münster | 0 | 3217 | 0 | 3217 |
| Detmold | 0 | 2466 | 0 | 2466 |
| Arnsberg | 0 | 4099 | 0 | 4099 |
| Koblenz | 0 | 1357 | 0 | 1357 |
| Trier | 0 | 1029 | 0 | 1029 |
| Rheinhessen-Pfalz | 0 | 1302 | 0 | 1302 |
| Saarland | 0 | 445 | 0 | 445 |
| Dresden | 0 | 1824 | 0 | 1824 |
| Chemnitz | 0 | 1824 | 0 | 1824 |
| Leipzig | 0 | 2714 | 0 | 2714 |
| Sachsen-Anhalt | 0 | 8923 | 0 | 8923 |
| Schleswig-Holstein | 0 | 12022 | 0 | 12022 |
| Thüringen | 0 | 5121 | 0 | 5121 |
| Summe | 0 | 154095 | 0 | 154095 |

## A.6. Installierte Stromerzeugungskapazitäten nach Technologien und Regionen

Tabelle A.17.: Braunkohle: Installierte Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen

| | 2012 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Karlsruhe | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Freiburg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Tübingen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberbayern | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Niederbayern | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberpfalz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberfranken | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mittelfranken | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Unterfranken | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Schwaben | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Berlin | 164000 | 119510 | 113154 | 119477 | 15254 |
| Brandenburg | 4454390 | 3514210 | 3379889 | 3420000 | 984124 |
| Bremen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hamburg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Darmstadt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Gießen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kassel | 33500 | 26272 | 25239 | 26143 | 2618 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Braunschweig | 338314 | 273789 | 264572 | 269732 | 44786 |
| Hannover | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Lüneburg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Weser-Ems | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Düsseldorf | 5820500 | 3943590 | 3675460 | 2644887 | 2163015 |
| Köln | 5932100 | 4019203 | 3745932 | 2695601 | 2204489 |
| Münster | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Detmold | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Arnsberg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Koblenz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Trier | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rheinhessen-Pfalz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Saarland | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Dresden | 2610980 | 2989776 | 3043890 | 2610980 | 2552298 |
| Chemnitz | 158425 | 181629 | 184945 | 158425 | 154864 |
| Leipzig | 1882660 | 2155793 | 2194812 | 1882660 | 1840348 |
| Sachsen-Anhalt | 1173670 | 1090521 | 1078644 | 1010839 | 587425 |
| Schleswig-Holstein | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Thüringen | 62472 | 67411 | 68120 | 59601 | 49100 |
| Summe | 22631011 | 18381704 | 17774658 | 14898345 | 10598320 |

Tabelle A.18.: Steinkohle: Installierte Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen

| | 2012 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 1659600 | 1625054 | 1273728 | 1725779 | 1121101 |
| Karlsruhe | 3736900 | 3659114 | 2868040 | 3885914 | 2524370 |
| Freiburg | 46500 | 45532 | 35688 | 48354 | 31412 |
| Tübingen | 20700 | 20269 | 15887 | 21525 | 13983 |
| Oberbayern | 804700 | 787949 | 617599 | 836788 | 543594 |
| Niederbayern | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberpfalz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberfranken | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mittelfranken | 17400 | 17038 | 13354 | 18094 | 11754 |
| Unterfranken | 24800 | 23374 | 17983 | 24814 | 15651 |
| Schwaben | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Berlin | 777000 | 873529 | 713453 | 858877 | 573381 |
| Brandenburg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Bremen | 769000 | 638997 | 635840 | 639294 | 572770 |
| Hamburg | 766000 | 636505 | 633361 | 636800 | 570535 |
| Darmstadt | 1295000 | 1204982 | 916314 | 1279415 | 799722 |
| Gießen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kassel | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 514000 | 569881 | 469478 | 560711 | 379489 |
| Braunschweig | 1133300 | 877687 | 628328 | 914911 | 493271 |
| Hannover | 272000 | 174270 | 105021 | 185132 | 82362 |
| Lüneburg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Weser-Ems | 757000 | 600376 | 536462 | 602572 | 479144 |
| Düsseldorf | 3782000 | 2631669 | 1526567 | 2666205 | 1302552 |
| Köln | 103000 | 71672 | 41575 | 72612 | 35474 |
| Münster | 3398900 | 2365093 | 1371932 | 2396124 | 1170602 |
| Detmold | 1271000 | 788440 | 417460 | 842240 | 314263 |
| Arnsberg | 5446500 | 3693445 | 2102382 | 3785579 | 1751725 |
| Koblenz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Trier | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rheinhessen-Pfalz | 13400 | 13121 | 10284 | 13934 | 9052 |
| Saarland | 2205600 | 2159689 | 1692778 | 2293552 | 1489939 |
| Dresden | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Chemnitz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Leipzig | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sachsen-Anhalt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Schleswig-Holstein | 924000 | 768376 | 764182 | 768694 | 688203 |
| Thüringen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Summe | 29738300 | 24246060 | 17407695 | 25077919 | 14974349 |

Tabelle A.19.: Erdgas: Installierte Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen

| | 2012 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 517551 | 311139 | 354873 | 423332 | 504245 |
| Karlsruhe | 573964 | 345052 | 393554 | 469474 | 559206 |
| Freiburg | 159422 | 95840 | 109312 | 130399 | 155323 |
| Tübingen | 30303 | 18217 | 20778 | 24786 | 29523 |
| Oberbayern | 3337840 | 2006624 | 2288678 | 2730188 | 3252016 |
| Niederbayern | 152292 | 91554 | 104423 | 124567 | 148376 |
| Oberpfalz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberfranken | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mittelfranken | 1136230 | 683072 | 779085 | 929379 | 1107015 |
| Unterfranken | 393264 | 222737 | 243822 | 296621 | 355219 |
| Schwaben | 84446 | 50767 | 57903 | 69072 | 82274 |
| Berlin | 1210980 | 931478 | 326149 | 931470 | 529210 |
| Brandenburg | 942273 | 733156 | 244335 | 733150 | 424368 |
| Bremen | 16488 | 4282 | 2108 | 4282 | 2531 |
| Hamburg | 25066 | 6511 | 3205 | 6510 | 3848 |
| Darmstadt | 1428900 | 828086 | 903999 | 1094531 | 1308032 |
| Gießen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kassel | 389253 | 126804 | 76462 | 126803 | 171902 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 354717 | 263286 | 92881 | 263284 | 149696 |
| Braunschweig | 192844 | 67156 | 36693 | 67155 | 83173 |
| Hannover | 447407 | 158922 | 99418 | 158921 | 196622 |
| Lüneburg | 477710 | 135567 | 65603 | 135565 | 86711 |
| Weser-Ems | 2637850 | 1019484 | 648376 | 1019468 | 881262 |
| Düsseldorf | 1944370 | 1394084 | 1075789 | 1394082 | 1562441 |
| Köln | 2270010 | 1627564 | 1255960 | 1627561 | 1824115 |
| Münster | 278515 | 199691 | 154098 | 199691 | 223807 |
| Detmold | 913865 | 367759 | 243414 | 367757 | 468395 |
| Arnsberg | 2140330 | 1376690 | 1040186 | 1376690 | 1573831 |
| Koblenz | 58711 | 39557 | 34963 | 43923 | 50426 |
| Trier | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rheinhessen-Pfalz | 2083070 | 1252289 | 1428313 | 1703847 | 2029509 |
| Saarland | 126557 | 76083 | 86777 | 103517 | 123303 |
| Dresden | 427020 | 356373 | 83486 | 356370 | 228603 |
| Chemnitz | 122268 | 101974 | 24041 | 102034 | 65578 |
| Leipzig | 237964 | 198595 | 46524 | 198593 | 127392 |
| Sachsen-Anhalt | 869859 | 637259 | 195723 | 637253 | 414147 |
| Schleswig-Holstein | 176022 | 45911 | 22558 | 45910 | 27131 |
| Thüringen | 536421 | 384807 | 108933 | 386734 | 279543 |
| Summe | 26693782 | 16158369 | 12652422 | 18282917 | 19028773 |

Tabelle A.20.: Kernenergie: Installierte Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen

| | 2012 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 784356 | 784356 | 0 | 784356 | 0 |
| Karlsruhe | 2139440 | 839440 | 0 | 839440 | 0 |
| Freiburg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Tübingen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberbayern | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Niederbayern | 844231 | 844231 | 0 | 844231 | 0 |
| Oberpfalz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberfranken | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mittelfranken | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Unterfranken | 1350000 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Schwaben | 2889970 | 1539970 | 0 | 1539970 | 0 |
| Berlin | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Brandenburg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Bremen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hamburg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Darmstadt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Gießen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kassel | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Braunschweig | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hannover | 1824950 | 1824950 | 0 | 1824950 | 0 |
| Lüneburg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Weser-Ems | 1493480 | 1493480 | 0 | 1493480 | 0 |
| Düsseldorf | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Köln | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Münster | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Detmold | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Arnsberg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Koblenz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Trier | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rheinhessen-Pfalz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Saarland | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Dresden | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Chemnitz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Leipzig | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sachsen-Anhalt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Schleswig-Holstein | 780574 | 780574 | 0 | 780574 | 0 |
| Thüringen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Summe | 12107001 | 8107001 | 0 | 8107001 | 0 |

Tabelle A.21.: PV-Aufdachanlagen: Installierte Kapazität in kW nach Regionen

| | 2012 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 1193740 | 1660427 | 1624602 | 1006738 | 878702 |
| Karlsruhe | 698945 | 1200451 | 1210920 | 757739 | 732488 |
| Freiburg | 750328 | 1615143 | 1682040 | 1279643 | 1450706 |
| Tübingen | 1078650 | 2167794 | 2235130 | 1697692 | 1855529 |
| Oberbayern | 1705240 | 4757618 | 5044047 | 4062336 | 4707098 |
| Niederbayern | 1588100 | 1761106 | 1666354 | 1368158 | 1225059 |
| Oberpfalz | 844943 | 1038424 | 1000572 | 689057 | 601384 |
| Oberfranken | 422356 | 433212 | 401010 | 366854 | 325345 |
| Mittelfranken | 613607 | 613607 | 551450 | 538898 | 466068 |
| Unterfranken | 537617 | 586894 | 540783 | 460963 | 398485 |
| Schwaben | 1243460 | 2185632 | 2209292 | 1883353 | 1971011 |
| Berlin | 44399 | 43918 | 40226 | 478209 | 540404 |
| Brandenburg | 373934 | 307238 | 288891 | 1454741 | 1612717 |
| Bremen | 22340 | 20615 | 19247 | 51546 | 57792 |
| Hamburg | 27465 | 27465 | 24729 | 27465 | 24729 |
| Darmstadt | 440978 | 1257892 | 1345337 | 428862 | 399029 |
| Gießen | 273767 | 239374 | 217861 | 374188 | 382936 |
| Kassel | 477791 | 371906 | 335078 | 504839 | 501306 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 189483 | 133503 | 121571 | 508533 | 554939 |
| Braunschweig | 249751 | 217526 | 201336 | 448682 | 491484 |
| Hannover | 371173 | 324963 | 303308 | 483975 | 500311 |
| Lüneburg | 415465 | 396124 | 375699 | 494660 | 502602 |
| Weser-Ems | 1277460 | 1106362 | 1039213 | 1665507 | 1713956 |
| Düsseldorf | 490982 | 491487 | 464597 | 2226387 | 2490527 |
| Köln | 411350 | 495047 | 484154 | 1899242 | 2140706 |
| Münster | 835792 | 801611 | 753692 | 1716098 | 1821962 |
| Detmold | 594979 | 546448 | 497080 | 831403 | 843899 |
| Arnsberg | 488714 | 414689 | 379723 | 1657301 | 1832899 |
| Koblenz | 378938 | 422731 | 415065 | 626343 | 655635 |
| Trier | 192803 | 283431 | 289468 | 201857 | 204521 |
| Rheinhessen-Pfalz | 481255 | 997001 | 1038461 | 479119 | 447602 |
| Saarland | 199022 | 493306 | 528996 | 189464 | 181748 |
| Dresden | 167767 | 151398 | 144091 | 485733 | 530540 |
| Chemnitz | 153368 | 146303 | 137567 | 715509 | 795496 |
| Leipzig | 105198 | 92726 | 86679 | 357838 | 393114 |
| Sachsen-Anhalt | 355580 | 316492 | 299651 | 1413511 | 1571553 |
| Schleswig-Holstein | 861214 | 670692 | 615074 | 1066487 | 1107435 |
| Thüringen | 367488 | 337989 | 317482 | 1041178 | 1137744 |
| Summe | 20925442 | 29128543 | 28930474 | 35940106 | 38049461 |

Tabelle A.22.: PV-Freiflächenanlagen: Installierte Kapazität in kW nach Regionen

| | 2012 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 232372 | 183520 | 174991 | 365912 | 392403 |
| Karlsruhe | 121921 | 119378 | 115644 | 208022 | 220855 |
| Freiburg | 104648 | 105494 | 103891 | 185008 | 197254 |
| Tübingen | 165007 | 341597 | 359747 | 740989 | 829166 |
| Oberbayern | 324856 | 608222 | 633666 | 1087912 | 1202095 |
| Niederbayern | 602513 | 595072 | 573161 | 1053499 | 1119610 |
| Oberpfalz | 208230 | 184100 | 172774 | 491438 | 539123 |
| Oberfranken | 171226 | 165614 | 163998 | 245047 | 258681 |
| Mittelfranken | 250918 | 250918 | 246290 | 250918 | 246290 |
| Unterfranken | 307287 | 293291 | 284806 | 323270 | 320541 |
| Schwaben | 430900 | 706216 | 734041 | 1046238 | 1137364 |
| Berlin | 5666 | 5666 | 5666 | 5666 | 5666 |
| Brandenburg | 1663650 | 1661570 | 1661274 | 1663650 | 1663754 |
| Bremen | 853 | 853 | 853 | 853 | 853 |
| Hamburg | 3793 | 3793 | 3793 | 3793 | 3793 |
| Darmstadt | 93025 | 85142 | 79839 | 124690 | 126980 |
| Gießen | 48920 | 48920 | 48920 | 48920 | 48920 |
| Kassel | 84030 | 84030 | 83578 | 84030 | 83578 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 561921 | 550296 | 544828 | 561921 | 558587 |
| Braunschweig | 76183 | 76183 | 76183 | 76183 | 76183 |
| Hannover | 101389 | 101389 | 101389 | 101389 | 101389 |
| Lüneburg | 76323 | 73575 | 72288 | 79080 | 78700 |
| Weser-Ems | 295726 | 295373 | 294561 | 295726 | 294978 |
| Düsseldorf | 68096 | 67128 | 66989 | 68096 | 68143 |
| Köln | 54192 | 54192 | 54192 | 54192 | 54192 |
| Münster | 90665 | 90665 | 89939 | 90665 | 89939 |
| Detmold | 85976 | 85976 | 85570 | 85976 | 85570 |
| Arnsberg | 17079 | 17079 | 17079 | 17079 | 17079 |
| Koblenz | 110267 | 81954 | 74194 | 110267 | 107944 |
| Trier | 104248 | 87986 | 85663 | 108593 | 110223 |
| Rheinhessen-Pfalz | 154208 | 100419 | 85993 | 320417 | 348232 |
| Saarland | 54783 | 34609 | 29387 | 68200 | 69427 |
| Dresden | 301820 | 301820 | 300552 | 301820 | 300552 |
| Chemnitz | 158110 | 157321 | 153474 | 158110 | 154414 |
| Leipzig | 311526 | 311526 | 303380 | 311526 | 303380 |
| Sachsen-Anhalt | 915936 | 915936 | 910491 | 915936 | 910491 |
| Schleswig-Holstein | 423217 | 423217 | 422034 | 423217 | 422034 |
| Thüringen | 370241 | 370241 | 368068 | 370241 | 368068 |
| Summe | 9151721 | 9640284 | 9583186 | 12448489 | 12916452 |

Tabelle A.23.: Onshore-Wind: Installierte Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen

| | 2012 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 287798 | 287798 | 162352 | 287798 | 230917 |
| Karlsruhe | 97068 | 97068 | 62872 | 97068 | 62872 |
| Freiburg | 118216 | 118216 | 37590 | 118216 | 37590 |
| Tübingen | 73383 | 73383 | 31380 | 73383 | 31380 |
| Oberbayern | 41415 | 41415 | 17300 | 41415 | 17300 |
| Niederbayern | 11342 | 11342 | 5375 | 11342 | 5375 |
| Oberpfalz | 95759 | 95759 | 79975 | 104060 | 80924 |
| Oberfranken | 181699 | 181699 | 138854 | 181699 | 268202 |
| Mittelfranken | 207028 | 207028 | 160201 | 207028 | 160201 |
| Unterfranken | 236949 | 236949 | 216894 | 236949 | 222489 |
| Schwaben | 60493 | 60493 | 32705 | 60493 | 32705 |
| Berlin | 17500 | 17500 | 9220 | 17500 | 9220 |
| Brandenburg | 4540250 | 4540250 | 2400062 | 4551352 | 2414988 |
| Bremen | 93390 | 121962 | 131305 | 130121 | 164304 |
| Hamburg | 28966 | 26393 | 20154 | 28966 | 30561 |
| Darmstadt | 168289 | 168289 | 108225 | 168289 | 122545 |
| Gießen | 261310 | 263398 | 175557 | 270452 | 176363 |
| Kassel | 306813 | 311444 | 196611 | 327089 | 198400 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 2098620 | 3089743 | 3609674 | 3148039 | 3962651 |
| Braunschweig | 633670 | 642786 | 394163 | 673879 | 398055 |
| Hannover | 1323240 | 1373945 | 1446295 | 2038437 | 2270109 |
| Lüneburg | 1998520 | 2814293 | 3109428 | 3093390 | 4238243 |
| Weser-Ems | 2943440 | 4626065 | 4609796 | 5398739 | 6530786 |
| Düsseldorf | 321040 | 321040 | 146398 | 321040 | 146398 |
| Köln | 442137 | 442137 | 180903 | 531972 | 286762 |
| Münster | 828031 | 828031 | 337734 | 978236 | 514732 |
| Detmold | 744184 | 759954 | 517158 | 813225 | 523246 |
| Arnsberg | 587541 | 591433 | 345440 | 627178 | 357213 |
| Koblenz | 680195 | 666894 | 461031 | 714584 | 586995 |
| Trier | 626010 | 626010 | 310821 | 640325 | 397430 |
| Rheinhessen-Pfalz | 560880 | 560880 | 348773 | 560880 | 372510 |
| Saarland | 160112 | 160112 | 102862 | 160112 | 102862 |
| Dresden | 463180 | 461255 | 257443 | 544720 | 892709 |
| Chemnitz | 321040 | 321040 | 146494 | 333658 | 400379 |
| Leipzig | 328450 | 328450 | 124371 | 328450 | 124371 |
| Sachsen-Anhalt | 3793070 | 3794120 | 1896976 | 3802522 | 1945462 |
| Schleswig-Holstein | 3273260 | 7032890 | 7647263 | 7381700 | 9058394 |
| Thüringen | 942777 | 948774 | 586222 | 992695 | 975108 |
| Summe | 29897065 | 37250238 | 30565873 | 39997000 | 38350748 |

Tabelle A.24.: Offshore-Wind: Installierte Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen

| | 2012 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Karlsruhe | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Freiburg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Tübingen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberbayern | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Niederbayern | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberpfalz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberfranken | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mittelfranken | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Unterfranken | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Schwaben | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Berlin | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Brandenburg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Bremen | 0 | 1055124 | 1205856 | 1055026 | 1884529 |
| Hamburg | 0 | 1055124 | 1205856 | 1055026 | 1884529 |
| Darmstadt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Gießen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kassel | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 0 | 426999 | 487998 | 426999 | 4728997 |
| Braunschweig | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hannover | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Lüneburg | 0 | 1055124 | 1205856 | 1055026 | 1884529 |
| Weser-Ems | 0 | 1055124 | 1205856 | 1055026 | 1884529 |
| Düsseldorf | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Köln | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Münster | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Detmold | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Arnsberg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Koblenz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Trier | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rheinhessen-Pfalz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Saarland | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Dresden | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Chemnitz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Leipzig | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sachsen-Anhalt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Schleswig-Holstein | 0 | 1055124 | 1205856 | 1055026 | 1884529 |
| Thüringen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Summe | 0 | 5702619 | 6517278 | 5702129 | 14151639 |

Tabelle A.25.: Wasserkraftanlagen: Installierte Kapazität in kW nach Regionen

| | 2012 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 75733 | 75733 | 75733 | 75733 | 75733 |
| Karlsruhe | 243086 | 243086 | 243086 | 243086 | 243086 |
| Freiburg | 348579 | 348579 | 348579 | 348579 | 348579 |
| Tübingen | 113088 | 113088 | 113088 | 113088 | 113088 |
| Oberbayern | 955780 | 955780 | 955780 | 955780 | 955780 |
| Niederbayern | 512293 | 512293 | 512293 | 512293 | 512293 |
| Oberpfalz | 113035 | 113035 | 113035 | 113035 | 113035 |
| Oberfranken | 77479 | 77479 | 77479 | 77479 | 77479 |
| Mittelfranken | 83051 | 83051 | 83051 | 83051 | 83051 |
| Unterfranken | 94535 | 94535 | 94535 | 94535 | 94535 |
| Schwaben | 245523 | 245523 | 245523 | 245523 | 245523 |
| Berlin | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Brandenburg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Bremen | 20200 | 20200 | 20200 | 20200 | 20200 |
| Hamburg | 202 | 202 | 202 | 202 | 202 |
| Darmstadt | 23562 | 23562 | 23562 | 23562 | 23562 |
| Gießen | 42521 | 42521 | 42521 | 42521 | 42521 |
| Kassel | 86017 | 86017 | 86017 | 86017 | 86017 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 321 | 321 | 321 | 321 | 321 |
| Braunschweig | 27794 | 27794 | 27794 | 27794 | 27794 |
| Hannover | 28594 | 28594 | 28594 | 28594 | 28594 |
| Lüneburg | 27264 | 27264 | 27264 | 27264 | 27264 |
| Weser-Ems | 26094 | 26094 | 26094 | 26094 | 26094 |
| Düsseldorf | 36352 | 36352 | 36352 | 36352 | 36352 |
| Köln | 79662 | 79662 | 79662 | 79662 | 79662 |
| Münster | 36352 | 36352 | 36352 | 36352 | 36352 |
| Detmold | 49599 | 49599 | 49599 | 49599 | 49599 |
| Arnsberg | 62964 | 62964 | 62964 | 62964 | 62964 |
| Koblenz | 151720 | 151720 | 151720 | 151720 | 151720 |
| Trier | 109267 | 109267 | 109267 | 109267 | 109267 |
| Rheinhessen-Pfalz | 13415 | 13415 | 13415 | 13415 | 13415 |
| Saarland | 11057 | 11057 | 11057 | 11057 | 11057 |
| Dresden | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Chemnitz | 158 | 158 | 158 | 158 | 158 |
| Leipzig | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sachsen-Anhalt | 7779 | 7779 | 7779 | 7779 | 7779 |
| Schleswig-Holstein | 9474 | 9474 | 9474 | 9474 | 9474 |
| Thüringen | 15416 | 15416 | 15416 | 15416 | 15416 |
| Summe | 3727964 | 3727964 | 3727964 | 3727964 | 3727964 |

Tabelle A.26.: Biomasse: Installierte Stromerzeugungskapazität in kW nach Regionen

| | 2012 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 174516 | 174516 | 136608 | 174516 | 136608 |
| Karlsruhe | 311087 | 311087 | 243513 | 311087 | 243513 |
| Freiburg | 129548 | 129548 | 101408 | 129548 | 101408 |
| Tübingen | 161443 | 161443 | 126375 | 161443 | 126375 |
| Oberbayern | 205062 | 205062 | 160519 | 205062 | 160519 |
| Niederbayern | 172704 | 172704 | 135189 | 172704 | 135189 |
| Oberpfalz | 187168 | 187168 | 146512 | 187168 | 146512 |
| Oberfranken | 172632 | 172632 | 135133 | 172632 | 135133 |
| Mittelfranken | 172704 | 172704 | 135189 | 172704 | 135189 |
| Unterfranken | 179770 | 179770 | 140721 | 179770 | 140721 |
| Schwaben | 181605 | 181605 | 142157 | 181605 | 142157 |
| Berlin | 40023 | 40023 | 31329 | 40023 | 31329 |
| Brandenburg | 399167 | 399167 | 312457 | 399167 | 312457 |
| Bremen | 8970 | 8970 | 7021 | 8970 | 7021 |
| Hamburg | 27387 | 27387 | 21437 | 27387 | 21437 |
| Darmstadt | 97442 | 97442 | 76276 | 97442 | 76276 |
| Gießen | 51265 | 51265 | 40129 | 51265 | 40129 |
| Kassel | 48632 | 48632 | 38067 | 48632 | 38067 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 323618 | 323618 | 253320 | 323618 | 253320 |
| Braunschweig | 196931 | 196931 | 154151 | 196931 | 154151 |
| Hannover | 255791 | 255791 | 200223 | 255791 | 200223 |
| Lüneburg | 337224 | 337224 | 263957 | 337224 | 263957 |
| Weser-Ems | 399858 | 399858 | 312985 | 399858 | 312985 |
| Düsseldorf | 120618 | 120618 | 94416 | 120618 | 94416 |
| Köln | 109091 | 109091 | 85393 | 109091 | 85393 |
| Münster | 133287 | 133287 | 104332 | 133287 | 104332 |
| Detmold | 102176 | 102176 | 79980 | 102176 | 79980 |
| Arnsberg | 169816 | 169816 | 132926 | 169816 | 132926 |
| Koblenz | 56242 | 56242 | 44025 | 56242 | 44025 |
| Trier | 42630 | 42630 | 33369 | 42630 | 33369 |
| Rheinhessen-Pfalz | 53930 | 53930 | 42216 | 53930 | 42216 |
| Saarland | 18451 | 18451 | 14443 | 18451 | 14443 |
| Dresden | 75556 | 75556 | 59141 | 75556 | 59141 |
| Chemnitz | 75557 | 75557 | 59142 | 75557 | 59142 |
| Leipzig | 112412 | 112412 | 87990 | 112412 | 87990 |
| Sachsen-Anhalt | 369659 | 369659 | 289355 | 369659 | 289355 |
| Schleswig-Holstein | 497982 | 497982 | 389787 | 497982 | 389787 |
| Thüringen | 212154 | 212154 | 166063 | 212154 | 166063 |
| Summe | 6384105 | 6384105 | 4997250 | 6384105 | 4997250 |

# A.7. Investitionen in Stromerzeugungsanlagen nach Technologien und Regionen

Tabelle A.27.: Braunkohle: Investitionen in Stromerzeugungsanlagen in Tausend Euro nach Regionen (direkt zugewiesener Impuls)

| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Karlsruhe | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Freiburg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Tübingen | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberbayern | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Niederbayern | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberpfalz | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberfranken | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mittelfranken | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Unterfranken | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Schwaben | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Berlin | 1 | 2868 | 0 | 0 |
| Brandenburg | 3550 | 67067 | 0 | 0 |
| Bremen | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hamburg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Darmstadt | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Gießen | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kassel | 5 | 658 | 0 | 0 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Braunschweig | 153 | 6298 | 0 | 0 |
| Hannover | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Lüneburg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Weser-Ems | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Düsseldorf | 48942 | 823 | 0 | 0 |
| Köln | 49880 | 839 | 0 | 0 |
| Münster | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Detmold | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Arnsberg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Koblenz | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Trier | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rheinhessen-Pfalz | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Saarland | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Dresden | 14275 | 1725 | 0 | 0 |
| Chemnitz | 874 | 105 | 0 | 0 |
| Leipzig | 10293 | 1244 | 0 | 0 |
| Sachsen-Anhalt | 3003 | 11726 | 0 | 0 |
| Schleswig-Holstein | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Thüringen | 294 | 296 | 0 | 0 |
| Summe | 131271 | 93647 | 0 | 0 |

Tabelle A.28.: Steinkohle: Investitionen in Stromerzeugungsanlagen in Tausend Euro nach Regionen (direkt zugewiesener Impuls)

| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 8429 | 7568 | 11821 | 548 |
| Karlsruhe | 18980 | 17041 | 26618 | 1235 |
| Freiburg | 236 | 212 | 331 | 15 |
| Tübingen | 105 | 94 | 147 | 7 |
| Oberbayern | 4087 | 3670 | 5732 | 266 |
| Niederbayern | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberpfalz | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberfranken | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mittelfranken | 88 | 79 | 124 | 6 |
| Unterfranken | 130 | 112 | 178 | 8 |
| Schwaben | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Berlin | 5160 | 4896 | 4653 | 1666 |
| Brandenburg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Bremen | 3773 | 1661 | 3780 | 0 |
| Hamburg | 3758 | 1654 | 3765 | 0 |
| Darmstadt | 6143 | 5678 | 8650 | 391 |
| Gießen | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kassel | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 3366 | 3126 | 3049 | 1044 |
| Braunschweig | 9861 | 4855 | 11109 | 192 |
| Hannover | 751 | 958 | 1118 | 39 |
| Lüneburg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Weser-Ems | 3416 | 1568 | 3488 | 0 |
| Düsseldorf | 13240 | 6911 | 14404 | 0 |
| Köln | 361 | 188 | 392 | 0 |
| Münster | 11899 | 6211 | 12945 | 0 |
| Detmold | 3234 | 4507 | 5050 | 190 |
| Arnsberg | 17845 | 12148 | 20954 | 191 |
| Koblenz | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Trier | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rheinhessen-Pfalz | 68 | 61 | 95 | 4 |
| Saarland | 11202 | 10058 | 15710 | 729 |
| Dresden | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Chemnitz | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Leipzig | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sachsen-Anhalt | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Schleswig-Holstein | 4537 | 2004 | 4544 | 4 |
| Thüringen | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Summe | 130670 | 95260 | 158658 | 6536 |

Tabelle A.29.: Erdgas: Investitionen in Stromerzeugungsanlagen in Tausend Euro nach Regionen (direkt zugewiesener Impuls)

| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 0 | 1901 | 2040 | 2194 |
| Karlsruhe | 0 | 2108 | 2263 | 2433 |
| Freiburg | 0 | 585 | 629 | 676 |
| Tübingen | 0 | 111 | 119 | 128 |
| Oberbayern | 0 | 12257 | 13160 | 14148 |
| Niederbayern | 0 | 559 | 600 | 646 |
| Oberpfalz | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberfranken | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mittelfranken | 0 | 4172 | 4480 | 4816 |
| Unterfranken | 0 | 1252 | 1344 | 1625 |
| Schwaben | 0 | 310 | 333 | 358 |
| Berlin | 0 | 0 | 0 | 2814 |
| Brandenburg | 0 | 0 | 0 | 2496 |
| Bremen | 0 | 0 | 0 | 6 |
| Hamburg | 0 | 0 | 0 | 9 |
| Darmstadt | 0 | 4514 | 4846 | 5894 |
| Gießen | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kassel | 0 | 0 | 0 | 1324 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 0 | 0 | 0 | 787 |
| Braunschweig | 0 | 0 | 0 | 645 |
| Hannover | 0 | 0 | 0 | 1348 |
| Lüneburg | 0 | 0 | 0 | 294 |
| Weser-Ems | 0 | 0 | 0 | 3234 |
| Düsseldorf | 0 | 0 | 0 | 6749 |
| Köln | 0 | 0 | 0 | 7880 |
| Münster | 0 | 0 | 0 | 967 |
| Detmold | 0 | 0 | 0 | 3121 |
| Arnsberg | 0 | 0 | 0 | 7401 |
| Koblenz | 0 | 74 | 79 | 219 |
| Trier | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rheinhessen-Pfalz | 0 | 7649 | 8213 | 8830 |
| Saarland | 0 | 465 | 499 | 536 |
| Dresden | 0 | 0 | 0 | 2013 |
| Chemnitz | 0 | 1 | 1 | 576 |
| Leipzig | 0 | 0 | 0 | 1122 |
| Sachsen-Anhalt | 0 | 0 | 0 | 3029 |
| Schleswig-Holstein | 0 | 0 | 0 | 64 |
| Thüringen | 0 | 33 | 35 | 2369 |
| Summe | 0 | 35991 | 38641 | 90750 |

Tabelle A.30.: PV-Aufdachanlagen: Investitionen in Tausend Euro nach Regionen (direkt zugewiesener Impuls)

| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 64038 | 1880 | 52436 | 5213 |
| Karlsruhe | 36278 | 323 | 4599 | 1729 |
| Freiburg | 63505 | 1229 | 40329 | 9000 |
| Tübingen | 79054 | 733 | 45780 | 8700 |
| Oberbayern | 264196 | 1890 | 246404 | 28163 |
| Niederbayern | 34655 | 1836 | 38217 | 4614 |
| Oberpfalz | 16479 | 1048 | 4415 | 1317 |
| Oberfranken | 3355 | 430 | 4429 | 716 |
| Mittelfranken | 3194 | 1022 | 5495 | 1365 |
| Unterfranken | 3760 | 655 | 373 | 759 |
| Schwaben | 67943 | 726 | 46346 | 6132 |
| Berlin | 847 | 12 | 32651 | 264 |
| Brandenburg | 16448 | 496 | 106015 | 2591 |
| Bremen | 0 | 5 | 2100 | 166 |
| Hamburg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Darmstadt | 60401 | 163 | 2854 | 399 |
| Gießen | 11809 | 437 | 27537 | 2258 |
| Kassel | 77522 | 2129 | 135311 | 11175 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 505 | 227 | 23810 | 499 |
| Braunschweig | 0 | 123 | 14305 | 1427 |
| Hannover | 1890 | 144 | 11363 | 1093 |
| Lüneburg | 0 | 267 | 5695 | 985 |
| Weser-Ems | 2382 | 570 | 32002 | 2620 |
| Düsseldorf | 7236 | 167 | 137176 | 3110 |
| Köln | 17574 | 296 | 126870 | 4138 |
| Münster | 725 | 177 | 64548 | 1417 |
| Detmold | 435 | 217 | 17749 | 1327 |
| Arnsberg | 27918 | 895 | 132060 | 5554 |
| Koblenz | 3149 | 179 | 17790 | 574 |
| Trier | 6517 | 167 | 651 | 583 |
| Rheinhessen-Pfalz | 37086 | 181 | 0 | 231 |
| Saarland | 21161 | 41 | 0 | 41 |
| Dresden | 1991 | 39 | 26290 | 379 |
| Chemnitz | 46604 | 659 | 120598 | 3939 |
| Leipzig | 0 | 18 | 18167 | 191 |
| Sachsen-Anhalt | 0 | 88 | 76074 | 1001 |
| Schleswig-Holstein | 1755 | 580 | 17779 | 2765 |
| Thüringen | 24965 | 532 | 91392 | 3144 |
| Summe | 1005378 | 20581 | 1729610 | 119578 |

Tabelle A.31.: PV-Freiflächenanlagen: Investitionen in Tausend Euro nach Regionen (direkt zugewiesener Impuls)

| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 2263 | 55 | 15775 | 593 |
| Karlsruhe | 45 | 10 | 3841 | 128 |
| Freiburg | 173 | 48 | 4010 | 135 |
| Tübingen | 7486 | 0 | 24449 | 374 |
| Oberbayern | 14884 | 70 | 45284 | 885 |
| Niederbayern | 926 | 26 | 23202 | 786 |
| Oberpfalz | 103 | 62 | 12428 | 506 |
| Oberfranken | 298 | 22 | 4451 | 171 |
| Mittelfranken | 183 | 4 | 819 | 26 |
| Unterfranken | 9 | 0 | 714 | 43 |
| Schwaben | 11639 | 0 | 26032 | 423 |
| Berlin | 49 | 1 | 220 | 6 |
| Brandenburg | 636 | 11 | 2850 | 84 |
| Bremen | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hamburg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Darmstadt | 320 | 6 | 2772 | 102 |
| Gießen | 528 | 10 | 2364 | 76 |
| Kassel | 5491 | 105 | 24590 | 789 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 20 | 0 | 90 | 16 |
| Braunschweig | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hannover | 116 | 2 | 520 | 16 |
| Lüneburg | 0 | 0 | 116 | 3 |
| Weser-Ems | 294 | 6 | 1316 | 43 |
| Düsseldorf | 356 | 7 | 1592 | 52 |
| Köln | 523 | 10 | 2344 | 75 |
| Münster | 30 | 129 | 135 | 133 |
| Detmold | 18 | 0 | 81 | 3 |
| Arnsberg | 2017 | 55 | 9033 | 306 |
| Koblenz | 0 | 0 | 0 | 40 |
| Trier | 0 | 10 | 184 | 39 |
| Rheinhessen-Pfalz | 0 | 176 | 7022 | 486 |
| Saarland | 0 | 0 | 567 | 47 |
| Dresden | 53 | 1 | 239 | 4 |
| Chemnitz | 1582 | 18 | 7086 | 137 |
| Leipzig | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sachsen-Anhalt | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Schleswig-Holstein | 69 | 21 | 307 | 29 |
| Thüringen | 893 | 20 | 4000 | 96 |
| Summe | 51006 | 887 | 228435 | 6652 |

Tabelle A.32.: Onshore-Wind: Investitionen in Stromerzeugungsanlagen in Tausend Euro nach Regionen (direkt zugewiesener Impuls)

| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 0 | 0 | 0 | 2106 |
| Karlsruhe | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Freiburg | 0 | 167 | 0 | 167 |
| Tübingen | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberbayern | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Niederbayern | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberpfalz | 0 | 262 | 345 | 0 |
| Oberfranken | 0 | 0 | 0 | 3973 |
| Mittelfranken | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Unterfranken | 0 | 0 | 0 | 172 |
| Schwaben | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Berlin | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Brandenburg | 182582 | 138205 | 250641 | 223401 |
| Bremen | 36392 | 27294 | 49764 | 44435 |
| Hamburg | 54162 | 40854 | 74215 | 66336 |
| Darmstadt | 0 | 0 | 0 | 440 |
| Gießen | 87 | 758 | 380 | 535 |
| Kassel | 192 | 1681 | 842 | 1187 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 157814 | 129680 | 203427 | 192869 |
| Braunschweig | 378 | 3318 | 1669 | 2346 |
| Hannover | 2105 | 28121 | 29693 | 30099 |
| Lüneburg | 33869 | 35827 | 45456 | 60699 |
| Weser-Ems | 284019 | 206004 | 395388 | 337733 |
| Düsseldorf | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Köln | 0 | 0 | 3730 | 98 |
| Münster | 0 | 0 | 6236 | 164 |
| Detmold | 655 | 5723 | 2866 | 4040 |
| Arnsberg | 162 | 3163 | 1646 | 2270 |
| Koblenz | 0 | 326 | 1428 | 2521 |
| Trier | 0 | 0 | 594 | 2157 |
| Rheinhessen-Pfalz | 0 | 0 | 0 | 729 |
| Saarland | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Dresden | 0 | 2697 | 3385 | 19278 |
| Chemnitz | 0 | 399 | 524 | 7753 |
| Leipzig | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sachsen-Anhalt | 451007 | 336885 | 618317 | 548339 |
| Schleswig-Holstein | 346778 | 192113 | 431858 | 312116 |
| Thüringen | 249 | 2924 | 2072 | 13326 |
| Summe | 1550451 | 1156400 | 2124476 | 1879290 |

Tabelle A.33.: Offshore-Wind: Investitionen in Stromerzeugungsanlagen in Tausend Euro nach Regionen (direkt zugewiesener Impuls)

| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
|---|---|---|---|---|
| Stuttgart | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Karlsruhe | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Freiburg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Tübingen | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberbayern | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Niederbayern | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberpfalz | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberfranken | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mittelfranken | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Unterfranken | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Schwaben | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Berlin | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Brandenburg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Bremen | 373553 | 0 | 373520 | 234151 |
| Hamburg | 917090 | 0 | 917010 | 772461 |
| Darmstadt | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Gießen | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kassel | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 94507 | 0 | 94507 | 596488 |
| Braunschweig | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hannover | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Lüneburg | 233529 | 0 | 233508 | 95473 |
| Weser-Ems | 322433 | 0 | 322404 | 183523 |
| Düsseldorf | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Köln | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Münster | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Detmold | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Arnsberg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Koblenz | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Trier | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rheinhessen-Pfalz | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Saarland | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Dresden | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Chemnitz | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Leipzig | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sachsen-Anhalt | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Schleswig-Holstein | 233529 | 0 | 233508 | 95473 |
| Thüringen | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Summe | 2174643 | 0 | 2174456 | 1977570 |

## A.8. Inputs für die Stromerzeugung nach Technologien und Regionen

Tabelle A.34.: Braunkohle: Inputs für die Stromerzeugung nach Regionen

| | Vorleistungen in Tsd Euro | | | | Bruttowertschöpfung in Tsd Euro | | | | Arbeitskräftebedarf in VZÄ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
| Stuttgart | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Karlsruhe | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Freiburg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Tübingen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberbayern | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Niederbayern | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberpfalz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberfranken | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mittelfranken | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Unterfranken | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Schwaben | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Berlin | 11400 | 10794 | 11397 | 1455 | 13769 | 13037 | 13765 | 1757 | 8 | 6 | 8 | 1 |
| Brandenburg | 335220 | 322408 | 326234 | 93876 | 404880 | 389405 | 394026 | 113383 | 234 | 187 | 228 | 54 |
| Bremen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hamburg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Darmstadt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Gießen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kassel | 2506 | 2408 | 2494 | 250 | 3027 | 2908 | 3012 | 302 | 2 | 1 | 2 | 0 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Braunschweig | 26117 | 25238 | 25730 | 4272 | 31544 | 30482 | 31076 | 5160 | 18 | 15 | 18 | 2 |
| Hannover | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Lüneburg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Weser-Ems | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Düsseldorf | 376179 | 350602 | 252296 | 206330 | 454350 | 423458 | 304723 | 249206 | 263 | 203 | 176 | 120 |
| Köln | 383392 | 357324 | 257133 | 210286 | 463062 | 431578 | 310566 | 253984 | 268 | 207 | 180 | 122 |
| Münster | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Detmold | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Arnsberg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Koblenz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Trier | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rheinhessen-Pfalz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Saarland | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Dresden | 285195 | 290357 | 249061 | 243464 | 344459 | 350694 | 300817 | 294056 | 199 | 168 | 174 | 141 |
| Chemnitz | 17326 | 17642 | 15112 | 14773 | 20926 | 21308 | 18253 | 17842 | 12 | 10 | 11 | 9 |
| Leipzig | 205641 | 209363 | 179587 | 175551 | 248374 | 252869 | 216906 | 212031 | 144 | 121 | 126 | 102 |
| Sachsen-Anhalt | 104025 | 102892 | 96424 | 56034 | 125641 | 124273 | 116461 | 67679 | 73 | 60 | 67 | 33 |
| Schleswig-Holstein | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Thüringen | 6430 | 6498 | 5685 | 4684 | 7767 | 7848 | 6867 | 5657 | 4 | 4 | 4 | 3 |

Tabelle A.35.: Steinkohle: Inputs für die Stromerzeugung nach Regionen

| | Vorleistungen in Tsd Euro | | | | Bruttowertschöpfung in Tsd Euro | | | | Arbeitskräftebedarf in VZÄ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
| Stuttgart | 36011 | 28226 | 38243 | 24844 | 173155 | 135720 | 183887 | 119457 | 148 | 97 | 158 | 85 |
| Karlsruhe | 81086 | 63556 | 86112 | 55940 | 389890 | 305598 | 414056 | 268979 | 334 | 217 | 355 | 191 |
| Freiburg | 1009 | 791 | 1072 | 696 | 4852 | 3803 | 5152 | 3347 | 4 | 3 | 4 | 2 |
| Tübingen | 449 | 352 | 477 | 310 | 2160 | 1693 | 2294 | 1490 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| Oberbayern | 17461 | 13686 | 18543 | 12046 | 83958 | 65807 | 89162 | 57922 | 72 | 47 | 76 | 41 |
| Niederbayern | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberpfalz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberfranken | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mittelfranken | 378 | 296 | 401 | 260 | 1815 | 1423 | 1928 | 1252 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| Unterfranken | 518 | 399 | 550 | 347 | 2491 | 1916 | 2644 | 1668 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| Schwaben | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Berlin | 19357 | 15810 | 19033 | 12706 | 93077 | 76021 | 91516 | 61096 | 80 | 54 | 78 | 43 |
| Brandenburg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Bremen | 14160 | 14090 | 14167 | 12693 | 68087 | 67751 | 68119 | 61030 | 58 | 48 | 58 | 43 |
| Hamburg | 14105 | 14035 | 14111 | 12643 | 67822 | 67487 | 67853 | 60792 | 58 | 48 | 58 | 43 |
| Darmstadt | 26702 | 20306 | 28352 | 17722 | 128395 | 97636 | 136326 | 85213 | 110 | 69 | 117 | 61 |
| Gießen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kassel | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 12629 | 10404 | 12425 | 8409 | 60723 | 50024 | 59745 | 40436 | 52 | 36 | 51 | 29 |
| Braunschweig | 19450 | 13924 | 20274 | 10931 | 93520 | 66950 | 97487 | 52559 | 80 | 48 | 84 | 37 |
| Hannover | 3862 | 2327 | 4103 | 1825 | 18569 | 11190 | 19726 | 8776 | 16 | 8 | 17 | 6 |
| Lüneburg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Weser-Ems | 13304 | 11888 | 13353 | 10618 | 63972 | 57162 | 64206 | 51054 | 55 | 41 | 55 | 36 |
| Düsseldorf | 58318 | 33829 | 59083 | 28865 | 280412 | 162660 | 284092 | 138791 | 240 | 116 | 244 | 99 |
| Köln | 1588 | 921 | 1609 | 786 | 7637 | 4430 | 7737 | 3780 | 7 | 3 | 7 | 3 |
| Münster | 52410 | 30402 | 53098 | 25941 | 252008 | 146184 | 255314 | 124731 | 216 | 104 | 219 | 89 |
| Detmold | 17472 | 9251 | 18664 | 6964 | 84011 | 44482 | 89743 | 33486 | 72 | 32 | 77 | 24 |
| Arnsberg | 81847 | 46589 | 83888 | 38818 | 393548 | 224015 | 403365 | 186652 | 337 | 159 | 346 | 133 |
| Koblenz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Trier | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rheinhessen-Pfalz | 291 | 228 | 309 | 201 | 1398 | 1096 | 1485 | 965 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Saarland | 47859 | 37512 | 50825 | 33017 | 230122 | 180371 | 244385 | 158757 | 197 | 128 | 210 | 113 |
| Dresden | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Chemnitz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Leipzig | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sachsen-Anhalt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Schleswig-Holstein | 17027 | 16934 | 17034 | 15251 | 81873 | 81426 | 81907 | 73330 | 70 | 58 | 70 | 52 |
| Thüringen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabelle A.36.: Erdgas: Inputs für die Stromerzeugung nach Regionen

| | Vorleistungen in Tsd Euro | | | | Bruttowertschöpfung in Tsd Euro | | | | Arbeitskräftebedarf in VZÄ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
| Stuttgart | 3173 | 3619 | 4317 | 5142 | 21056 | 23652 | 28548 | 33571 | 21 | 20 | 29 | 29 |
| Karlsruhe | 3519 | 4013 | 4788 | 5703 | 23351 | 26230 | 31660 | 37230 | 24 | 22 | 32 | 32 |
| Freiburg | 977 | 1115 | 1330 | 1584 | 6486 | 7286 | 8794 | 10341 | 7 | 6 | 9 | 9 |
| Tübingen | 186 | 212 | 253 | 301 | 1233 | 1385 | 1671 | 1966 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| Oberbayern | 20464 | 23340 | 27842 | 33164 | 135795 | 152538 | 184114 | 216506 | 137 | 130 | 187 | 185 |
| Niederbayern | 934 | 1065 | 1270 | 1513 | 6196 | 6960 | 8400 | 9878 | 6 | 6 | 9 | 8 |
| Oberpfalz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberfranken | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mittelfranken | 6966 | 7945 | 9478 | 11289 | 46226 | 51925 | 62674 | 73701 | 47 | 44 | 64 | 63 |
| Unterfranken | 2271 | 2486 | 3025 | 3623 | 15073 | 16261 | 20007 | 23640 | 15 | 14 | 20 | 20 |
| Schwaben | 518 | 590 | 704 | 839 | 3436 | 3859 | 4658 | 5478 | 3 | 3 | 5 | 5 |
| Berlin | 9499 | 3326 | 9499 | 5397 | 63036 | 22072 | 63036 | 35275 | 64 | 19 | 64 | 30 |
| Brandenburg | 7477 | 2492 | 7477 | 4328 | 49615 | 16535 | 49615 | 28241 | 50 | 14 | 50 | 24 |
| Bremen | 44 | 21 | 44 | 26 | 290 | 143 | 290 | 170 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hamburg | 66 | 33 | 66 | 39 | 441 | 217 | 441 | 259 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Darmstadt | 8445 | 9219 | 11162 | 13339 | 56039 | 60313 | 73832 | 87074 | 57 | 51 | 75 | 74 |
| Gießen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kassel | 1293 | 780 | 1293 | 1753 | 8581 | 5174 | 8581 | 11380 | 9 | 4 | 9 | 10 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 2685 | 947 | 2685 | 1527 | 17817 | 6286 | 17817 | 9980 | 18 | 5 | 18 | 9 |
| Braunschweig | 685 | 374 | 685 | 848 | 4545 | 2483 | 4545 | 5505 | 5 | 2 | 5 | 5 |
| Hannover | 1621 | 1014 | 1621 | 2005 | 10755 | 6728 | 10755 | 13048 | 11 | 6 | 11 | 11 |
| Lüneburg | 1383 | 669 | 1382 | 884 | 9174 | 4440 | 9174 | 5812 | 9 | 4 | 9 | 5 |
| Weser-Ems | 10397 | 6612 | 10397 | 8987 | 68992 | 43878 | 68991 | 59019 | 70 | 37 | 70 | 50 |
| Düsseldorf | 14217 | 10971 | 14217 | 15934 | 94342 | 72802 | 94342 | 104444 | 96 | 61 | 96 | 89 |
| Köln | 16598 | 12808 | 16598 | 18602 | 110143 | 84995 | 110143 | 121937 | 112 | 71 | 112 | 104 |
| Münster | 2036 | 1571 | 2036 | 2282 | 13514 | 10428 | 13514 | 14961 | 14 | 9 | 14 | 13 |
| Detmold | 3750 | 2482 | 3750 | 4777 | 24888 | 16473 | 24887 | 31101 | 25 | 14 | 25 | 27 |
| Arnsberg | 14039 | 10608 | 14039 | 16050 | 93165 | 70393 | 93165 | 105091 | 94 | 59 | 94 | 89 |
| Koblenz | 403 | 357 | 448 | 514 | 2677 | 2352 | 2968 | 3365 | 3 | 2 | 3 | 3 |
| Trier | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rheinhessen-Pfalz | 12771 | 14566 | 17376 | 20697 | 84747 | 95195 | 114901 | 135117 | 86 | 81 | 117 | 115 |
| Saarland | 776 | 885 | 1056 | 1257 | 5149 | 5784 | 6981 | 8209 | 5 | 5 | 7 | 7 |
| Dresden | 3634 | 851 | 3634 | 2331 | 24117 | 5650 | 24117 | 15085 | 24 | 5 | 24 | 13 |
| Chemnitz | 1040 | 245 | 1041 | 669 | 6901 | 1627 | 6905 | 4328 | 7 | 1 | 7 | 4 |
| Leipzig | 2025 | 474 | 2025 | 1299 | 13440 | 3148 | 13439 | 8406 | 14 | 3 | 14 | 7 |
| Sachsen-Anhalt | 6499 | 1996 | 6499 | 4223 | 43125 | 13245 | 43125 | 27447 | 44 | 11 | 44 | 24 |
| Schleswig-Holstein | 468 | 230 | 468 | 277 | 3107 | 1527 | 3107 | 1824 | 3 | 1 | 3 | 2 |
| Thüringen | 3924 | 1111 | 3944 | 2851 | 26041 | 7366 | 26170 | 18462 | 26 | 6 | 26 | 16 |

Tabelle A.37.: Kernenergie: Inputs für die Stromerzeugung nach Regionen

| | Vorleistungen in Tsd Euro | | | | Bruttowertschöpfung in Tsd Euro | | | | Arbeitskräftebedarf in VZÄ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
| Stuttgart | 36118 | 0 | 36118 | 0 | 143449 | 0 | 143449 | 0 | 90 | 0 | 90 | 0 |
| Karlsruhe | 38655 | 0 | 38655 | 0 | 153523 | 0 | 153523 | 0 | 96 | 0 | 96 | 0 |
| Freiburg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Tübingen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberbayern | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Niederbayern | 38875 | 0 | 38875 | 0 | 154400 | 0 | 154400 | 0 | 96 | 0 | 96 | 0 |
| Oberpfalz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberfranken | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mittelfranken | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Unterfranken | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Schwaben | 70913 | 0 | 70913 | 0 | 281642 | 0 | 281642 | 0 | 176 | 0 | 176 | 0 |
| Berlin | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Brandenburg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Bremen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hamburg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Darmstadt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Gießen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kassel | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Braunschweig | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hannover | 84035 | 0 | 84035 | 0 | 333761 | 0 | 333761 | 0 | 208 | 0 | 208 | 0 |
| Lüneburg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Weser-Ems | 68772 | 0 | 68772 | 0 | 273139 | 0 | 273139 | 0 | 171 | 0 | 171 | 0 |
| Düsseldorf | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Köln | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Münster | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Detmold | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Arnsberg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Koblenz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Trier | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rheinhessen-Pfalz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Saarland | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Dresden | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Chemnitz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Leipzig | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sachsen-Anhalt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Schleswig-Holstein | 35944 | 0 | 35944 | 0 | 142757 | 0 | 142757 | 0 | 89 | 0 | 89 | 0 |
| Thüringen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabelle A.38.: PV-Aufdachanlagen: Inputs für die Stromerzeugung nach Regionen

| | Vorleistungen in Tsd Euro | | | | Bruttowertschöpfung in Tsd Euro | | | | Arbeitskräftebedarf in VZÄ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
| Stuttgart | 22260 | 22043 | 13083 | 11457 | 164704 | 159036 | 102420 | 88686 | 46 | 37 | 28 | 20 |
| Karlsruhe | 16333 | 16707 | 9933 | 9683 | 117593 | 117030 | 76557 | 72859 | 33 | 28 | 21 | 17 |
| Freiburg | 22253 | 23552 | 17403 | 20134 | 156497 | 160127 | 125398 | 136289 | 45 | 39 | 35 | 33 |
| Tübingen | 29763 | 31155 | 22967 | 25561 | 210692 | 213990 | 167117 | 176516 | 60 | 51 | 47 | 43 |
| Oberbayern | 66287 | 71434 | 56235 | 66418 | 456416 | 476060 | 391969 | 437118 | 132 | 116 | 113 | 108 |
| Niederbayern | 23139 | 22027 | 17780 | 15973 | 177602 | 166707 | 139190 | 123656 | 49 | 38 | 38 | 28 |
| Oberpfalz | 13777 | 13404 | 8955 | 7845 | 103895 | 98925 | 70101 | 60620 | 29 | 23 | 19 | 14 |
| Oberfranken | 5646 | 5243 | 4767 | 4240 | 43975 | 40457 | 37322 | 32884 | 12 | 9 | 10 | 7 |
| Mittelfranken | 7974 | 7195 | 7003 | 6086 | 62425 | 55566 | 54825 | 46880 | 17 | 13 | 15 | 11 |
| Unterfranken | 7699 | 7142 | 5990 | 5201 | 59262 | 54062 | 46896 | 40127 | 16 | 12 | 13 | 9 |
| Schwaben | 29780 | 30538 | 25410 | 27025 | 213836 | 213115 | 185817 | 189446 | 61 | 51 | 52 | 45 |
| Berlin | 571 | 523 | 6848 | 7860 | 4468 | 4092 | 44728 | 49694 | 1 | 1 | 13 | 12 |
| Brandenburg | 3993 | 3760 | 20484 | 23053 | 31257 | 29283 | 138225 | 150718 | 9 | 7 | 40 | 37 |
| Bremen | 268 | 250 | 713 | 812 | 2097 | 1955 | 4980 | 5438 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| Hamburg | 357 | 321 | 357 | 321 | 2794 | 2516 | 2794 | 2516 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Darmstadt | 17540 | 19052 | 5573 | 5191 | 120585 | 127051 | 43630 | 40492 | 35 | 31 | 12 | 9 |
| Gießen | 3111 | 2836 | 5009 | 5191 | 24353 | 22066 | 37160 | 37351 | 7 | 5 | 10 | 9 |
| Kassel | 4833 | 4367 | 6600 | 6600 | 37836 | 33865 | 51115 | 50049 | 10 | 8 | 14 | 12 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 1735 | 1587 | 7075 | 7837 | 13582 | 12244 | 48851 | 52391 | 4 | 3 | 14 | 13 |
| Braunschweig | 2827 | 2620 | 6121 | 6811 | 22130 | 20414 | 43848 | 46823 | 6 | 5 | 12 | 11 |
| Hannover | 4223 | 3945 | 6454 | 6744 | 33060 | 30797 | 48217 | 49061 | 9 | 7 | 13 | 12 |
| Lüneburg | 5148 | 4890 | 6544 | 6713 | 40300 | 38071 | 49608 | 49632 | 11 | 9 | 14 | 12 |
| Weser-Ems | 14378 | 13521 | 22211 | 23087 | 112556 | 105433 | 165932 | 168437 | 31 | 24 | 46 | 39 |
| Düsseldorf | 6388 | 6039 | 31468 | 35756 | 49997 | 47256 | 210810 | 231444 | 14 | 11 | 62 | 57 |
| Köln | 6556 | 6453 | 26855 | 30750 | 49607 | 48236 | 179766 | 198547 | 14 | 11 | 53 | 49 |
| Münster | 10417 | 9799 | 23588 | 25404 | 81552 | 76586 | 166627 | 174109 | 22 | 17 | 48 | 42 |
| Detmold | 7101 | 6466 | 11150 | 11458 | 55593 | 50453 | 82445 | 82318 | 15 | 11 | 23 | 19 |
| Arnsberg | 5389 | 4943 | 23245 | 26117 | 42188 | 38478 | 158039 | 171440 | 11 | 9 | 46 | 42 |
| Koblenz | 5558 | 5483 | 8501 | 9012 | 42611 | 41604 | 61484 | 63426 | 12 | 10 | 17 | 15 |
| Trier | 3816 | 3940 | 2636 | 2693 | 28015 | 28274 | 20454 | 20370 | 8 | 7 | 6 | 5 |
| Rheinhessen-Pfalz | 13710 | 14489 | 6226 | 5824 | 96766 | 99393 | 48743 | 45406 | 28 | 24 | 13 | 10 |
| Saarland | 6841 | 7440 | 2462 | 2363 | 47525 | 50283 | 19275 | 18467 | 14 | 12 | 5 | 4 |
| Dresden | 1967 | 1873 | 6777 | 7511 | 15402 | 14651 | 46541 | 50050 | 4 | 3 | 13 | 12 |
| Chemnitz | 1901 | 1789 | 10120 | 11428 | 14884 | 13965 | 67709 | 73983 | 4 | 3 | 20 | 18 |
| Leipzig | 1205 | 1127 | 5019 | 5599 | 9434 | 8808 | 34120 | 36872 | 3 | 2 | 10 | 9 |
| Sachsen-Anhalt | 4113 | 3897 | 19915 | 22480 | 32198 | 30435 | 134238 | 146696 | 9 | 7 | 39 | 36 |
| Schleswig-Holstein | 8716 | 8010 | 14159 | 14862 | 68233 | 62268 | 106643 | 108776 | 19 | 14 | 30 | 25 |
| Thüringen | 4392 | 4131 | 14515 | 16106 | 34385 | 32208 | 99833 | 107149 | 9 | 7 | 29 | 26 |

Tabelle A.39.: PV-Freiflächenanlagen: Inputs für die Stromerzeugung nach Regionen

| | Vorleistungen in Tsd Euro | | | | Bruttowertschöpfung in Tsd Euro | | | | Arbeitskräftebedarf in VZÄ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
| Stuttgart | 2748 | 2619 | 5321 | 5627 | 14049 | 13387 | 26948 | 28409 | 4 | 3 | 7 | 7 |
| Karlsruhe | 1788 | 1730 | 3013 | 3154 | 9139 | 8845 | 15239 | 15900 | 2 | 2 | 4 | 4 |
| Freiburg | 1579 | 1548 | 2675 | 2811 | 8069 | 7906 | 13523 | 14158 | 2 | 2 | 4 | 3 |
| Tübingen | 4905 | 5110 | 10411 | 11457 | 24744 | 25687 | 52137 | 57113 | 7 | 6 | 15 | 14 |
| Oberbayern | 8771 | 9039 | 15383 | 16712 | 44305 | 45508 | 77205 | 83492 | 12 | 11 | 22 | 20 |
| Niederbayern | 8912 | 8582 | 15240 | 15962 | 45556 | 43871 | 77057 | 80417 | 12 | 10 | 21 | 19 |
| Oberpfalz | 2757 | 2579 | 7022 | 7556 | 14094 | 13175 | 35366 | 37877 | 4 | 3 | 10 | 9 |
| Oberfranken | 2480 | 2454 | 3582 | 3739 | 12679 | 12541 | 18171 | 18919 | 3 | 3 | 5 | 4 |
| Mittelfranken | 3758 | 3688 | 3758 | 3688 | 19209 | 18855 | 19209 | 18855 | 5 | 4 | 5 | 4 |
| Unterfranken | 4392 | 4265 | 4822 | 4769 | 22453 | 21803 | 24621 | 24335 | 6 | 5 | 7 | 5 |
| Schwaben | 10248 | 10560 | 14935 | 16003 | 51871 | 53306 | 75192 | 80251 | 14 | 12 | 21 | 19 |
| Berlin | 85 | 85 | 85 | 85 | 434 | 434 | 434 | 434 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Brandenburg | 24883 | 24879 | 24914 | 24916 | 127202 | 127179 | 127361 | 127366 | 34 | 28 | 34 | 28 |
| Bremen | 13 | 13 | 13 | 13 | 65 | 65 | 65 | 65 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hamburg | 57 | 57 | 57 | 57 | 290 | 290 | 290 | 290 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Darmstadt | 1275 | 1196 | 1830 | 1844 | 6518 | 6112 | 9293 | 9341 | 2 | 1 | 3 | 2 |
| Gießen | 733 | 733 | 733 | 733 | 3745 | 3745 | 3745 | 3745 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Kassel | 1258 | 1252 | 1258 | 1252 | 6433 | 6398 | 6433 | 6398 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 8241 | 8159 | 8415 | 8363 | 42128 | 41709 | 43018 | 42751 | 11 | 9 | 11 | 9 |
| Braunschweig | 1141 | 1141 | 1141 | 1141 | 5832 | 5832 | 5832 | 5832 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| Hannover | 1518 | 1518 | 1518 | 1518 | 7762 | 7762 | 7762 | 7762 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Lüneburg | 1102 | 1083 | 1181 | 1174 | 5633 | 5534 | 6032 | 5993 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| Weser-Ems | 4423 | 4411 | 4429 | 4417 | 22612 | 22550 | 22639 | 22582 | 6 | 5 | 6 | 5 |
| Düsseldorf | 1005 | 1003 | 1020 | 1020 | 5139 | 5128 | 5213 | 5216 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Köln | 812 | 812 | 812 | 812 | 4149 | 4149 | 4149 | 4149 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Münster | 1358 | 1328 | 1358 | 1328 | 6941 | 6775 | 6941 | 6775 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Detmold | 1288 | 1281 | 1288 | 1281 | 6582 | 6551 | 6582 | 6551 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| Arnsberg | 256 | 253 | 256 | 253 | 1307 | 1293 | 1307 | 1293 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Koblenz | 1227 | 1111 | 1651 | 1611 | 6274 | 5680 | 8442 | 8229 | 2 | 1 | 2 | 2 |
| Trier | 1318 | 1281 | 1621 | 1638 | 6736 | 6549 | 8279 | 8359 | 2 | 1 | 2 | 2 |
| Rheinhessen-Pfalz | 1504 | 1262 | 4601 | 4882 | 7688 | 6431 | 23205 | 24497 | 2 | 1 | 7 | 6 |
| Saarland | 518 | 440 | 1005 | 1012 | 2649 | 2250 | 5114 | 5134 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| Dresden | 4520 | 4501 | 4520 | 4501 | 23106 | 23009 | 23106 | 23009 | 6 | 5 | 6 | 5 |
| Chemnitz | 2356 | 2298 | 2368 | 2312 | 12044 | 11749 | 12104 | 11820 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Leipzig | 4665 | 4543 | 4665 | 4543 | 23849 | 23225 | 23849 | 23225 | 6 | 5 | 6 | 5 |
| Sachsen-Anhalt | 13717 | 13635 | 13717 | 13635 | 70120 | 69703 | 70120 | 69703 | 19 | 15 | 19 | 15 |
| Schleswig-Holstein | 6338 | 6317 | 6338 | 6317 | 32399 | 32292 | 32399 | 32292 | 9 | 7 | 9 | 7 |
| Thüringen | 5545 | 5511 | 5545 | 5511 | 28344 | 28170 | 28344 | 28170 | 8 | 6 | 8 | 6 |

Tabelle A.40.: Onshore-Wind: Inputs für die Stromerzeugung nach Regionen

| | Vorleistungen in Tsd Euro | | | | Bruttowertschöpfung in Tsd Euro | | | | Arbeitskräftebedarf in VZÄ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
| Stuttgart | 14516 | 8189 | 14516 | 11445 | 35256 | 19888 | 35256 | 27814 | 11 | 5 | 11 | 7 |
| Karlsruhe | 4896 | 3171 | 4896 | 3171 | 11891 | 7702 | 11891 | 7702 | 4 | 2 | 4 | 2 |
| Freiburg | 5963 | 1880 | 5963 | 1880 | 14482 | 4567 | 14482 | 4567 | 4 | 1 | 4 | 1 |
| Tübingen | 3701 | 1583 | 3701 | 1583 | 8990 | 3844 | 8990 | 3844 | 3 | 1 | 3 | 1 |
| Oberbayern | 2089 | 873 | 2089 | 873 | 5073 | 2119 | 5073 | 2119 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| Niederbayern | 572 | 271 | 572 | 271 | 1389 | 658 | 1389 | 658 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberpfalz | 4830 | 4009 | 5242 | 4073 | 11731 | 9738 | 12733 | 9894 | 3 | 2 | 4 | 2 |
| Oberfranken | 9165 | 7003 | 9165 | 13147 | 22258 | 17010 | 22258 | 31962 | 7 | 4 | 7 | 8 |
| Mittelfranken | 10442 | 8080 | 10442 | 8080 | 25361 | 19625 | 25361 | 19625 | 8 | 5 | 8 | 5 |
| Unterfranken | 11951 | 10940 | 11951 | 11205 | 29027 | 26570 | 29027 | 27217 | 9 | 7 | 9 | 7 |
| Schwaben | 3051 | 1650 | 3051 | 1650 | 7411 | 4006 | 7411 | 4006 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| Berlin | 883 | 465 | 883 | 465 | 2144 | 1129 | 2144 | 1129 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| Brandenburg | 229000 | 120860 | 229552 | 121595 | 556189 | 293556 | 557530 | 295343 | 166 | 73 | 166 | 73 |
| Bremen | 6130 | 6495 | 6535 | 8082 | 14890 | 15785 | 15875 | 19645 | 4 | 4 | 5 | 5 |
| Hamburg | 1331 | 973 | 1461 | 1476 | 3233 | 2366 | 3548 | 3589 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Darmstadt | 8488 | 5459 | 8488 | 6139 | 20616 | 13258 | 20616 | 14913 | 6 | 3 | 6 | 4 |
| Gießen | 13284 | 8780 | 13634 | 8835 | 32263 | 21331 | 33115 | 21463 | 10 | 5 | 10 | 5 |
| Kassel | 15705 | 9751 | 16482 | 9873 | 38144 | 23696 | 40033 | 23990 | 11 | 6 | 12 | 6 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 155096 | 176989 | 157993 | 193893 | 376752 | 430269 | 383791 | 471394 | 113 | 109 | 115 | 120 |
| Braunschweig | 32414 | 19554 | 33959 | 19812 | 78726 | 47518 | 82481 | 48140 | 23 | 12 | 25 | 12 |
| Hannover | 69261 | 70205 | 102278 | 110903 | 168222 | 170729 | 248452 | 269644 | 50 | 44 | 74 | 69 |
| Lüneburg | 141335 | 152588 | 155202 | 206863 | 343318 | 370938 | 377016 | 502970 | 103 | 94 | 113 | 128 |
| Weser-Ems | 232066 | 226397 | 270458 | 319464 | 563736 | 550352 | 657027 | 776693 | 169 | 140 | 197 | 198 |
| Düsseldorf | 16193 | 7384 | 16193 | 7384 | 39328 | 17934 | 39328 | 17934 | 12 | 4 | 12 | 4 |
| Köln | 22300 | 9124 | 26764 | 14365 | 54163 | 22161 | 65009 | 34896 | 16 | 5 | 19 | 9 |
| Münster | 41764 | 17035 | 49227 | 25796 | 101435 | 41373 | 119571 | 62666 | 30 | 10 | 36 | 16 |
| Detmold | 38319 | 25521 | 40966 | 25936 | 93068 | 62028 | 99500 | 63028 | 28 | 16 | 30 | 16 |
| Arnsberg | 29828 | 17116 | 31604 | 17760 | 72445 | 41596 | 76761 | 43156 | 22 | 10 | 23 | 11 |
| Koblenz | 33637 | 23222 | 36016 | 29331 | 81696 | 56404 | 87477 | 71260 | 24 | 14 | 26 | 18 |
| Trier | 31575 | 15677 | 32286 | 19825 | 76687 | 38076 | 78416 | 48167 | 23 | 9 | 23 | 12 |
| Rheinhessen-Pfalz | 28290 | 17591 | 28290 | 18719 | 68709 | 42725 | 68709 | 45469 | 20 | 11 | 20 | 11 |
| Saarland | 8076 | 5188 | 8076 | 5188 | 19614 | 12601 | 19614 | 12601 | 6 | 3 | 6 | 3 |
| Dresden | 23265 | 12727 | 27413 | 43099 | 56505 | 30930 | 66585 | 104831 | 17 | 8 | 20 | 27 |
| Chemnitz | 16193 | 7351 | 16820 | 19439 | 39328 | 17856 | 40851 | 47274 | 12 | 4 | 12 | 12 |
| Leipzig | 16566 | 6273 | 16566 | 6273 | 40236 | 15236 | 40236 | 15236 | 12 | 4 | 12 | 4 |
| Sachsen-Anhalt | 191366 | 95627 | 191784 | 97950 | 464785 | 232260 | 465799 | 237912 | 139 | 58 | 139 | 59 |
| Schleswig-Holstein | 351903 | 377180 | 369234 | 445029 | 854915 | 916760 | 897030 | 1081813 | 257 | 232 | 270 | 275 |
| Thüringen | 47850 | 29282 | 50032 | 47857 | 116216 | 71142 | 121519 | 116338 | 35 | 18 | 36 | 30 |

Tabelle A.41.: Offshore-Wind: Inputs für die Stromerzeugung nach Regionen

| | Vorleistungen in Tsd Euro | | | | Bruttowertschöpfung in Tsd Euro | | | | Arbeitskräftebedarf in VZÄ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
| Stuttgart | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Karlsruhe | 0 | 0 | 0 | 0 | 106570 | 120934 | 106561 | 246265 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Freiburg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Tübingen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberbayern | 0 | 0 | 0 | 0 | 182527 | 207130 | 182512 | 421789 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Niederbayern | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberpfalz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oberfranken | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mittelfranken | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Unterfranken | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Schwaben | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Berlin | 0 | 0 | 0 | 0 | 110911 | 125861 | 110902 | 256297 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Brandenburg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Bremen | 98122 | 111348 | 98113 | 166788 | 234912 | 266716 | 234892 | 533761 | 158 | 150 | 158 | 234 |
| Hamburg | 98122 | 111348 | 98113 | 166788 | 467951 | 531166 | 467911 | 1072274 | 158 | 150 | 158 | 234 |
| Darmstadt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Gießen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kassel | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 39709 | 45061 | 39709 | 391516 | 7003 | 8003 | 7003 | 77556 | 64 | 61 | 64 | 588 |
| Braunschweig | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hannover | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Lüneburg | 98122 | 111348 | 98113 | 166788 | 17304 | 19776 | 17302 | 30906 | 158 | 150 | 158 | 234 |
| Weser-Ems | 98122 | 111348 | 98113 | 166788 | 199008 | 225972 | 198991 | 450794 | 158 | 150 | 158 | 234 |
| Düsseldorf | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Köln | 0 | 0 | 0 | 0 | 63378 | 71920 | 63372 | 146455 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Münster | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Detmold | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Arnsberg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Koblenz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Trier | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rheinhessen-Pfalz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Saarland | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Dresden | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Chemnitz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Leipzig | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sachsen-Anhalt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Schleswig-Holstein | 98122 | 111348 | 98113 | 166788 | 110850 | 125931 | 110840 | 247074 | 158 | 150 | 158 | 234 |
| Thüringen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabelle A.42.: Wasserkraft: Inputs für die Stromerzeugung nach Regionen

| | Vorleistungen in Tsd Euro | | | | Bruttowertschöpfung in Tsd Euro | | | | Arbeitskräftebedarf in VZÄ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
| Stuttgart | 4045 | 4045 | 4045 | 4045 | 17552 | 17552 | 17552 | 17552 | 13 | 11 | 13 | 11 |
| Karlsruhe | 12983 | 12983 | 12983 | 12983 | 56337 | 56337 | 56337 | 56337 | 43 | 36 | 43 | 36 |
| Freiburg | 18617 | 18617 | 18617 | 18617 | 80786 | 80786 | 80786 | 80786 | 62 | 51 | 62 | 51 |
| Tübingen | 6040 | 6040 | 6040 | 6040 | 26209 | 26209 | 26209 | 26209 | 20 | 17 | 20 | 17 |
| Oberbayern | 51047 | 51047 | 51047 | 51047 | 221510 | 221510 | 221510 | 221510 | 170 | 141 | 170 | 141 |
| Niederbayern | 27361 | 27361 | 27361 | 27361 | 118728 | 118728 | 118728 | 118728 | 91 | 75 | 91 | 75 |
| Oberpfalz | 6037 | 6037 | 6037 | 6037 | 26197 | 26197 | 26197 | 26197 | 20 | 17 | 20 | 17 |
| Oberfranken | 4138 | 4138 | 4138 | 4138 | 17957 | 17957 | 17957 | 17957 | 14 | 11 | 14 | 11 |
| Mittelfranken | 4436 | 4436 | 4436 | 4436 | 19248 | 19248 | 19248 | 19248 | 15 | 12 | 15 | 12 |
| Unterfranken | 5049 | 5049 | 5049 | 5049 | 21909 | 21909 | 21909 | 21909 | 17 | 14 | 17 | 14 |
| Schwaben | 13113 | 13113 | 13113 | 13113 | 56902 | 56902 | 56902 | 56902 | 44 | 36 | 44 | 36 |
| Berlin | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Brandenburg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Bremen | 1079 | 1079 | 1079 | 1079 | 4682 | 4682 | 4682 | 4682 | 4 | 3 | 4 | 3 |
| Hamburg | 11 | 11 | 11 | 11 | 47 | 47 | 47 | 47 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Darmstadt | 1258 | 1258 | 1258 | 1258 | 5461 | 5461 | 5461 | 5461 | 4 | 3 | 4 | 3 |
| Gießen | 2271 | 2271 | 2271 | 2271 | 9855 | 9855 | 9855 | 9855 | 8 | 6 | 8 | 6 |
| Kassel | 4594 | 4594 | 4594 | 4594 | 19935 | 19935 | 19935 | 19935 | 15 | 13 | 15 | 13 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 17 | 17 | 17 | 17 | 74 | 74 | 74 | 74 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Braunschweig | 1484 | 1484 | 1484 | 1484 | 6441 | 6441 | 6441 | 6441 | 5 | 4 | 5 | 4 |
| Hannover | 1527 | 1527 | 1527 | 1527 | 6627 | 6627 | 6627 | 6627 | 5 | 4 | 5 | 4 |
| Lüneburg | 1456 | 1456 | 1456 | 1456 | 6319 | 6319 | 6319 | 6319 | 5 | 4 | 5 | 4 |
| Weser-Ems | 1394 | 1394 | 1394 | 1394 | 6048 | 6048 | 6048 | 6048 | 5 | 4 | 5 | 4 |
| Düsseldorf | 1941 | 1941 | 1941 | 1941 | 8425 | 8425 | 8425 | 8425 | 6 | 5 | 6 | 5 |
| Köln | 4255 | 4255 | 4255 | 4255 | 18462 | 18462 | 18462 | 18462 | 14 | 12 | 14 | 12 |
| Münster | 1941 | 1941 | 1941 | 1941 | 8425 | 8425 | 8425 | 8425 | 6 | 5 | 6 | 5 |
| Detmold | 2649 | 2649 | 2649 | 2649 | 11495 | 11495 | 11495 | 11495 | 9 | 7 | 9 | 7 |
| Arnsberg | 3363 | 3363 | 3363 | 3363 | 14592 | 14592 | 14592 | 14592 | 11 | 9 | 11 | 9 |
| Koblenz | 8103 | 8103 | 8103 | 8103 | 35162 | 35162 | 35162 | 35162 | 27 | 22 | 27 | 22 |
| Trier | 5836 | 5836 | 5836 | 5836 | 25324 | 25324 | 25324 | 25324 | 19 | 16 | 19 | 16 |
| Rheinhessen-Pfalz | 716 | 716 | 716 | 716 | 3109 | 3109 | 3109 | 3109 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Saarland | 591 | 591 | 591 | 591 | 2563 | 2563 | 2563 | 2563 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Dresden | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Chemnitz | 8 | 8 | 8 | 8 | 37 | 37 | 37 | 37 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Leipzig | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sachsen-Anhalt | 415 | 415 | 415 | 415 | 1803 | 1803 | 1803 | 1803 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Schleswig-Holstein | 506 | 506 | 506 | 506 | 2196 | 2196 | 2196 | 2196 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| Thüringen | 823 | 823 | 823 | 823 | 3573 | 3573 | 3573 | 3573 | 3 | 2 | 3 | 2 |

Tabelle A.43.: Biomasse: Inputs für die Stromerzeugung nach Regionen

| | Vorleistungen in Tsd Euro | | | | Bruttowertschöpfung in Tsd Euro | | | | Arbeitskräftebedarf in VZÄ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 | Ref 2020 | Ref 2030 | EW 2020 | EW 2030 |
| Stuttgart | 45828 | 35873 | 45828 | 35873 | 71688 | 56116 | 71688 | 56116 | 166 | 108 | 166 | 108 |
| Karlsruhe | 81691 | 63947 | 81691 | 63947 | 127790 | 100031 | 127790 | 100031 | 296 | 192 | 296 | 192 |
| Freiburg | 34019 | 26630 | 34019 | 26630 | 53216 | 41657 | 53216 | 41657 | 123 | 80 | 123 | 80 |
| Tübingen | 42395 | 33186 | 42395 | 33186 | 66318 | 51913 | 66318 | 51913 | 153 | 100 | 153 | 100 |
| Oberbayern | 53849 | 42152 | 53849 | 42152 | 84236 | 65939 | 84236 | 65939 | 195 | 127 | 195 | 127 |
| Niederbayern | 45352 | 35501 | 45352 | 35501 | 70944 | 55534 | 70944 | 55534 | 164 | 107 | 164 | 107 |
| Oberpfalz | 49150 | 38474 | 49150 | 38474 | 76886 | 60185 | 76886 | 60185 | 178 | 115 | 178 | 115 |
| Oberfranken | 45333 | 35486 | 45333 | 35486 | 70914 | 55510 | 70914 | 55510 | 164 | 107 | 164 | 107 |
| Mittelfranken | 45352 | 35501 | 45352 | 35501 | 70944 | 55534 | 70944 | 55534 | 164 | 107 | 164 | 107 |
| Unterfranken | 47208 | 36953 | 47208 | 36953 | 73847 | 57806 | 73847 | 57806 | 171 | 111 | 171 | 111 |
| Schwaben | 47689 | 37330 | 47689 | 37330 | 74600 | 58396 | 74600 | 58396 | 173 | 112 | 173 | 112 |
| Berlin | 10510 | 8227 | 10510 | 8227 | 16441 | 12869 | 16441 | 12869 | 38 | 25 | 38 | 25 |
| Brandenburg | 104821 | 82051 | 104821 | 82051 | 163971 | 128352 | 163971 | 128352 | 379 | 246 | 379 | 246 |
| Bremen | 2355 | 1844 | 2355 | 1844 | 3685 | 2884 | 3685 | 2884 | 9 | 6 | 9 | 6 |
| Hamburg | 7192 | 5629 | 7192 | 5629 | 11250 | 8806 | 11250 | 8806 | 26 | 17 | 26 | 17 |
| Darmstadt | 25588 | 20030 | 25588 | 20030 | 40028 | 31333 | 40028 | 31333 | 93 | 60 | 93 | 60 |
| Gießen | 13462 | 10538 | 13462 | 10538 | 21059 | 16484 | 21059 | 16484 | 49 | 32 | 49 | 32 |
| Kassel | 12771 | 9996 | 12771 | 9996 | 19977 | 15637 | 19977 | 15637 | 46 | 30 | 46 | 30 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 84982 | 66522 | 84982 | 66522 | 132937 | 104060 | 132937 | 104060 | 307 | 200 | 307 | 200 |
| Braunschweig | 51714 | 40480 | 51714 | 40480 | 80896 | 63323 | 80896 | 63323 | 187 | 122 | 187 | 122 |
| Hannover | 67171 | 52579 | 67171 | 52579 | 105075 | 82248 | 105075 | 82248 | 243 | 158 | 243 | 158 |
| Lüneburg | 88555 | 69315 | 88555 | 69315 | 138526 | 108429 | 138526 | 108429 | 320 | 208 | 320 | 208 |
| Weser-Ems | 105003 | 82190 | 105003 | 82190 | 164255 | 128569 | 164255 | 128569 | 380 | 247 | 380 | 247 |
| Düsseldorf | 31674 | 24794 | 31674 | 24794 | 49548 | 38784 | 49548 | 38784 | 115 | 74 | 115 | 74 |
| Köln | 28647 | 22424 | 28647 | 22424 | 44813 | 35078 | 44813 | 35078 | 104 | 67 | 104 | 67 |
| Münster | 35001 | 27398 | 35001 | 27398 | 54752 | 42858 | 54752 | 42858 | 127 | 82 | 127 | 82 |
| Detmold | 26831 | 21003 | 26831 | 21003 | 41972 | 32855 | 41972 | 32855 | 97 | 63 | 97 | 63 |
| Arnsberg | 44594 | 34906 | 44594 | 34906 | 69758 | 54604 | 69758 | 54604 | 161 | 105 | 161 | 105 |
| Koblenz | 14769 | 11561 | 14769 | 11561 | 23103 | 18085 | 23103 | 18085 | 53 | 35 | 53 | 35 |
| Trier | 11195 | 8763 | 11195 | 8763 | 17512 | 13708 | 17512 | 13708 | 41 | 26 | 41 | 26 |
| Rheinhessen-Pfalz | 14162 | 11086 | 14162 | 11086 | 22154 | 17341 | 22154 | 17341 | 51 | 33 | 51 | 33 |
| Saarland | 4845 | 3793 | 4845 | 3793 | 7579 | 5933 | 7579 | 5933 | 18 | 11 | 18 | 11 |
| Dresden | 19841 | 15530 | 19841 | 15530 | 31037 | 24294 | 31037 | 24294 | 72 | 47 | 72 | 47 |
| Chemnitz | 19841 | 15531 | 19841 | 15531 | 31037 | 24294 | 31037 | 24294 | 72 | 47 | 72 | 47 |
| Leipzig | 29519 | 23106 | 29519 | 23106 | 46177 | 36145 | 46177 | 36145 | 107 | 69 | 107 | 69 |
| Sachsen-Anhalt | 97072 | 75984 | 97072 | 75984 | 151850 | 118862 | 151850 | 118862 | 351 | 228 | 351 | 228 |
| Schleswig-Holstein | 130770 | 102358 | 130770 | 102358 | 204563 | 160118 | 204563 | 160118 | 473 | 307 | 473 | 307 |
| Thüringen | 55712 | 43608 | 55712 | 43608 | 87149 | 68216 | 87149 | 68216 | 202 | 131 | 202 | 131 |