

Texte

222/2020

Ableitung eines Indikatorensets zur Umweltverträglichkeit der Energiewende

Endbericht

TEXTE 222/2020

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und
nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3715 43 101 0
FB000372

Ableitung eines Indikatorensets zur Umweltverträglichkeit der Energiewende

Endbericht

von

Benedikt Kauertz, Monika Dittrich, Horst Fehrenbach,
Bernd Franke

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH,
Heidelberg

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

■/umweltbundesamt.de

🌐/umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH
Wilckensstraße 3
69120 Heidelberg

Abschlussdatum:

Juli 2020

Redaktion:

Fachgebiet V 1.5 Energiedaten, Geschäftsstelle der
Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat)
Stefan Rothe

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Dezember 2020

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Ableitung eines Indikatorensets zur Umweltverträglichkeit der Energiewende

Die Energiewende ist eine der größten Aufgaben des 21. Jahrhunderts. Die Herausforderung besteht darin, das Energiesystem umweltverträglich, sicher und wirtschaftlich zu gestalten. Mit der Energiewende sind auf der einen Seite entlastende Wirkungen für die Umwelt und Synergieeffekte für eine nachhaltige Energiewirtschaft verbunden. Auf der anderen Seite können damit auch neue Umwelt- und Gesundheitseffekte sowie Eingriffe in Natur und Landschaft verbunden sein. Um die Veränderungen des Umweltzustandes durch die Energiewende fachlich fundiert darzustellen, wurde in den vergangenen vier Jahren im Auftrag des Umweltbundesamtes durch das ifeu-Heidelberg ein Bewertungsansatz erarbeitet, der eine Beurteilung der Umweltauswirkungen als vielschichtiges Geflecht interdependenter Wirkungszusammenhänge anhand der aus dem UVPG bekannten Schutzgüter (Mensch, Tiere/Pflanzen/ Biodiversität, Wasser, Boden, Fläche, Luft und Klima, Landschaft sowie Kultur- und sonstige Sachgüter) ermöglicht. Dafür werden potenzielle Umweltauswirkungen des Energiesystems identifiziert, durch die im Vorhaben abgeleiteten Indikatoren beschrieben und falls möglich, als Zeitreihe quantifiziert. Die einzelnen Indikatoren werden in Wirkpfaden gebündelt und hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Schutzgüter diskutiert. Im Rahmen dieses F&E Vorhabens erfolgte die wissenschaftlich basierte Konzeption des Monitoringmodells und die Auswahl, Entwicklung und Beurteilung von Indikatoren zur Bemessung der Umweltauswirkungen der Energiewende. Die Ergebnisse des Vorhabens dienen den Akteuren beim UBA und im BMU als Grundlage für die umfassende Bewertung der Veränderungen des Umweltzustandes durch die Energiewende, wie sie bspw. im Monitoringbericht zur Energiewende „Energie der Zukunft“ zu erfolgen hat. Des Weiteren zeigt das Projekt noch vorhandene Wissenslücken auf, formuliert erweiterten Forschungsbedarf und gibt alternative Denkanstöße, die mittel- bis langfristig zum Verfüllen eben solcher Wissenslücken beitragen können.

Abstract: Derivation of a set of indicators for the environmental compatibility of energy system transformation

The energy transition is one of the biggest tasks for the 21st century. The challenge is to make the energy system environmentally friendly, reliable and economical. On one side, the transformation of the energy system will reduce the burden on the environment and create synergies for a sustainable energy industry. On the other side, there are new and maybe larger environmental impacts, health effects, changes in ecosystems and land use. In order to present the changes in the state of the environment caused by the energy transition in a technically sound manner, ifeu-Heidelberg has been commissioned by the Federal Environment Agency to develop an evaluation approach for the assessment of the environmental impacts consisting of a multi-layered network of interdependent cause-and-effect relationships on the basis of the protected resources of the Environmental Impact Assessment Act UVPG (humans, animals/plants/ biodiversity, water, soil, land, air, climate, landscape, cultural and other material goods). To this end, potential environmental impacts of the energy system were identified, described with indicators derived in the project and, if possible, quantified as a time series. The individual indicators were grouped by impact pathways and the effects on the protected resources are discussed. Within the framework of this R&D project, the science-based concept of the monitoring model and the selection, development and assessment of indicators for measuring the environmental impacts of the energy transition took place. The results will serve UBA and BMU stakeholders as a basis for a comprehensive assessment of the changes in the environmental status caused by the energy transition, as is required, for example, in the "Energy of the Future" monitoring report on the energy transition. Furthermore, the project identifies remaining gaps in knowledge, formulates expanded research needs, and provides alternative ideas that can help fill mid-term and long-term knowledge gaps.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	14
Tabellenverzeichnis	16
Abkürzungsverzeichnis	18
Zusammenfassung.....	20
Summary	28
1 Hintergrund und Zielsetzung.....	36
1.1 Bearbeitungskonzept	38
1.2 Beteiligung weiterer Fachkreise am Vorhaben.....	39
1.3 Projektverlauf.....	41
1.4 Glossar.....	42
2 Literaturanalyse.....	44
2.1 Grundlegende Literaturanalyse	44
2.2 Diskussion verschiedener existierender Konzepte zur Umweltbewertung.....	49
2.2.1 Der Schutzgutansatz des UVPG.....	49
2.2.2 Der Ökobilanzansatz	50
2.2.3 Materialflussrechnung.....	51
2.2.4 Zusammenschau und Zwischenfazit	52
2.3 Im Rahmen der Literaturanalyse ausgewertete Datenbestände zur Darstellung von Umweltauswirkungen der Energiewende.....	55
2.3.1 Berichtspflichten zu atmosphärischen Emissionen	55
2.3.2 Critical Loads.....	56
2.3.3 Daten zur Umwelt.....	57
2.3.4 Energiedaten der AGEB Daten und der AGEE-Stat	58
2.3.5 DESTATIS Fachserien.....	59
2.3.6 Umweltökonomischen Gesamtrechnungen (UGR)	60
2.4 Beschreibung der aktuellen Umwelteffekte des deutschen Energiesystems.....	61
2.4.1 Umweltauswirkungen der Strom- und Fernwärmeerzeugung	61
2.4.2 Umweltauswirkungen des Verkehrs	62
2.4.3 Umweltauswirkungen der dezentralen Raumwärme/ -kälte in Haushalten und GHD	63
2.4.4 Umweltauswirkungen der Energievorketten.....	64
2.5 Fazit der Literaturanalyse	65
3 Definition und methodische Beschreibung des Monitoringkonzeptes.....	67

3.1	Anforderungsprofil an das Monitoringkonzept	67
3.2	Funktionsweise des Konzepts zum Umweltmonitoring	68
3.2.1	Schutzgüter	69
3.2.2	Wirkpfade	70
3.2.3	Zusammenhang zwischen Wirkpfaden und Schutzgütern	70
3.3	Grundlegende methodische Festlegungen des Monitoringkonzeptes.....	72
3.3.1	Anforderungen an Systemgrenzen und Bilanzrahmen des Monitorings der Energiewende	72
3.3.2	Abgrenzung Systemraum und betrachtete Prozesse	74
3.3.2.1	Die Vorketten.....	75
3.3.2.2	Der Energieeinsatz in Anlagen der öffentlichen Versorgung.....	75
3.3.2.3	Der Energieeinsatz für den Verkehr	76
3.3.2.4	Der Energieeinsatz in Anlagen zur Eigenversorgung	76
3.3.2.5	Die Infrastruktur	76
3.3.2.6	Das Thema Energieeffizienz.....	77
3.3.2.7	Zusammenfassung Systemraum	77
3.3.3	Referenzpunkte/ -jahre.....	94
3.4	Fazit zur Definition des Monitoringkonzeptes.....	95
4	Ableitung der Indikatoren	97
4.1	Grundlegende Anforderungen bei der Ableitung/ Entwicklung der Indikatoren	97
4.1.1	Allgemeine Anforderungen.....	97
4.1.2	Anforderungen an die Daten	98
4.1.3	Vom Bewertungsmodell zum Indikator	98
4.2	Wirkpfad luftgetragene Schadstoffe.....	99
4.2.1	Definition	99
4.2.2	Rechtliche Regelungen.....	99
4.2.3	Berichtspflichten und Daten zur Erfolgskontrolle.....	99
4.2.4	Der Wirkpfad Luftschadstoffe im Bewertungsmodell	100
4.2.5	Systemraum und Ableitung der Indikatoren für den Wirkpfad Luftschadstoffe	100
4.2.5.1	Auswahl der Indikatoren.....	100
4.2.5.2	Systemraum	101
4.2.5.3	Ableitung der Indikatoren.....	102
4.3	Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden	112
4.3.1	Definition	112

4.3.2	Rechtliche Regelungen.....	113
4.3.3	Berichtspflichten und Daten zur Erfolgskontrolle.....	113
4.3.4	Der Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden im Bewertungsmodell.....	114
4.3.5	Systemraum und Ableitung der Indikatoren für den Wirkpfad Emissionen in Wasser inkl. Grundwasser und Boden.....	114
4.3.5.1	Auswahl der Indikatoren.....	114
4.3.5.2	Systemraum	114
4.3.5.3	Ableitung der Indikatoren.....	115
4.4	Wirkpfad Geräusch, Licht- und Wärmeemissionen	121
4.4.1	Definition	121
4.4.2	Rechtliche Regelungen.....	122
4.4.3	Berichtspflichten und Daten zur Erfolgskontrolle.....	124
4.4.4	Der Wirkpfad Geräusch,- Licht- und Wärmeemissionen im Bewertungsmodell.....	124
4.4.5	Systemraum und Ableitung der Indikatoren im Wirkpfad Geräusch,- Licht- und Wärmeemissionen	125
4.4.5.1	Auswahl der Indikatoren.....	125
4.4.5.2	Systemraum	125
4.4.5.3	Ableitung der Indikatoren.....	127
4.5	Wirkpfad Flächeninanspruchnahme	133
4.5.1	Definition	133
4.5.2	Rechtliche Regelungen und politische Ziele zur Flächeninanspruchnahme.....	133
4.5.3	Berichtspflichten und Daten zur Erfolgskontrolle.....	134
4.5.4	Der Wirkpfad Flächeninanspruchnahme im Bewertungsmodell.....	135
4.5.5	Systemraum und Ableitung der Indikatoren für den Wirkpfad Flächeninanspruchnahme.....	137
4.5.5.1	Auswahl der Indikatoren.....	137
4.5.5.2	Systemraum	137
4.5.5.3	Ableitung der Indikatoren.....	139
4.6	Wirkpfad Rohstoffnutzung bzw. Ressourcennutzung.....	147
4.6.1	Definition	147
4.6.2	Rechtliche Regelungen.....	148
4.6.3	Berichtspflichten und Daten zur Erfolgskontrolle.....	149
4.6.4	Der Wirkpfad Rohstoffnutzung im Bewertungsmodell	152
4.6.5	Systemraum und Ableitung der Indikatoren für den Wirkpfad Rohstoffnutzung	153
4.6.5.1	Auswahl der Indikatoren.....	153

4.6.5.2	Systemraum	153
4.6.5.3	Ableitung der Indikatoren.....	154
4.7	Wirkpfad Direkte Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen.....	159
4.7.1	Definition	159
4.7.2	Rechtliche Regelungen.....	159
4.7.3	Berichtspflichten und Daten zur Erfolgskontrolle.....	160
4.7.4	Der Wirkpfad direkte Auswirkungen auf Pflanzen und Tiere im Bewertungsmodell.....	160
4.7.4.1	Auswahl der Indikatoren.....	160
4.7.4.2	Systemraum	160
4.7.4.3	Ableitung der Indikatoren.....	161
4.8	Exkurs zum Risiko schwerer Unfälle in Kernkraftwerken und zum Risiko durch den Umgang mit hochradioaktiven Abfällen	166
4.9	Gesamtschau der Liste der vorgeschlagenen Indikatoren.....	167
5	Praxistest	169
5.1	Wirkpfad luftgetragene Schadstoffe.....	170
5.1.1	Indikator: Emissionen von Stickoxiden aus dem Energiesystem	170
5.1.1.1	Datengrundlage	170
5.1.1.2	Quantifizierung	170
5.1.1.3	Ergebnisse.....	170
5.1.1.4	Beurteilung	171
5.1.2	Indikator: Emissionen von Schwefeloxiden aus dem Energiesystem	175
5.1.2.1	Datengrundlage	175
5.1.2.2	Quantifizierung	175
5.1.2.3	Ergebnisse.....	175
5.1.2.4	Beurteilung	175
5.1.3	Indikator: Emissionen von Feinstaub aus dem Energiesystem.....	179
5.1.3.1	Datengrundlage	179
5.1.3.2	Quantifizierung	179
5.1.3.3	Ergebnisse.....	179
5.1.3.4	Beurteilung	179
5.1.4	Indikator: Emissionen von Black Carbon (BC) aus dem Energiesystem.....	183
5.1.4.1	Datengrundlage	183
5.1.4.2	Quantifizierung	183
5.1.4.3	Ergebnisse.....	183

5.1.4.4	Beurteilung	183
5.1.5	Indikator: Emissionen von Kohlenmonoxid aus dem Energiesystem	187
5.1.5.1	Datengrundlage	187
5.1.5.2	Quantifizierung	187
5.1.5.3	Ergebnisse	187
5.1.5.4	Beurteilung	187
5.1.6	Indikator: Emissionen von Quecksilber (Hg) aus dem Energiesystem	191
5.1.6.1	Datengrundlage	191
5.1.6.2	Quantifizierung	191
5.1.6.3	Ergebnisse	191
5.1.6.4	Beurteilung	191
5.1.7	Indikator: Emissionen von Ammoniak aus dem Energiesystem	195
5.1.7.1	Datengrundlage	195
5.1.7.2	Quantifizierung	195
5.1.7.3	Ergebnisse	195
5.1.7.4	Beurteilung	195
5.1.8	Indikator: Attributable Todesfälle durch Luftschadstoffe in Deutschland	199
5.1.8.1	Datengrundlage	199
5.1.8.2	Quantifizierung	199
5.1.8.3	Ergebnisse	199
5.1.8.4	Beurteilung	199
5.2	Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden	202
5.2.1	Indikator: Abwasser aus dem Energiesystem	202
5.2.1.1	Datengrundlage	202
5.2.1.2	Quantifizierung	202
5.2.1.3	Ergebnisse	202
5.2.1.4	Beurteilung	202
5.2.2	Indikator: Emissionen von eutrophierenden Stoffen aus dem Energiesystem in die Luft	205
5.2.2.1	Datengrundlage	205
5.2.2.2	Quantifizierung	205
5.2.2.3	Ergebnisse	205
5.2.2.4	Beurteilung	205
5.2.3	Indikator: Emissionen von versauernden Stoffen aus dem Energiesystem in die Luft ..	209

5.2.3.1	Datengrundlage	209
5.2.3.2	Quantifizierung	209
5.2.3.3	Ergebnisse	209
5.2.3.4	Beurteilung	209
5.2.4	Indikator: Stickstoffüberschuss auf Anbauflächen von Energiepflanzen	213
5.2.4.1	Datengrundlage	213
5.2.4.2	Quantifizierung	213
5.2.4.3	Ergebnisse	213
5.2.4.4	Beurteilung	214
5.3	Wirkpfad Geräusch, Licht- und Wärmeemissionen	217
5.3.1	Indikator: Lärmbelastungspotenzialflächen	217
5.3.1.1	Datengrundlage	217
5.3.1.2	Quantifizierung	217
5.3.1.3	Ergebnisse	218
5.3.1.4	Beurteilung	218
5.3.2	Indikator: Entnahme von Kühlwasser durch das Energiesystem	222
5.3.2.1	Datengrundlage	222
5.3.2.2	Quantifizierung	222
5.3.2.3	Ergebnisse	222
5.3.2.4	Beurteilung	222
5.4	Wirkpfad Flächeninanspruchnahme	225
5.4.1	Indikator: Temporäre Flächenbelegung durch das Energiesystem	225
5.4.1.1	Datengrundlage	225
5.4.1.2	Quantifizierung	225
5.4.1.3	Ergebnisse	226
5.4.1.4	Bewertung	226
5.4.2	Indikator: Temporäre Flächenbelegung durch das Energiesystem (Hemerobie- gewichtet)	230
5.4.2.1	Datengrundlage	230
5.4.2.2	Quantifizierung	230
5.4.2.3	Ergebnisse	230
5.4.2.4	Bewertung	230
5.4.3	Indikator: Indirekte Flächeninanspruchnahme mit Auswirkungen auf das Landschaftsbild	234
5.4.3.1	Datengrundlage	234

5.4.3.2	Quantifizierung	234
5.4.3.3	Ergebnisse	234
5.4.3.4	Bewertung	235
5.5	Wirkpfad Rohstoffnutzung.....	238
5.5.1	Indikator: Durch das Energiesystem verbrauchte Rohstoffe nach Rohstoffen bzw. Rohstoffgruppen	238
5.5.1.1	Datengrundlage	238
5.5.1.2	Quantifizierung	238
5.5.1.3	Ergebnisse	239
5.5.1.4	Bewertung	239
5.5.2	Indikator: Materialkonsum im Bereich der Energieinfrastruktur in Deutschland	242
5.5.2.1	Datengrundlage	242
5.5.2.2	Quantifizierung	242
5.5.2.3	Ergebnisse	242
5.5.2.4	Bewertung	242
5.6	Wirkpfad Direkte Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen.....	244
5.6.1	Indikator: Veränderung der Flächeninanspruchnahme zum Vorjahr durch das Energiesystem.....	244
5.6.1.1	Datengrundlage	244
5.6.1.2	Quantifizierung	244
5.6.1.3	Ergebnisse	244
5.6.1.4	Bewertung	244
5.6.2	Indikator: Turbinendurchfluss von Wasserkraftwerken und Kühlwassereinsatz in Wärme- und Kälteanlagen.....	248
5.6.2.1	Datengrundlage	248
5.6.2.2	Quantifizierung	248
5.6.2.3	Ergebnisse	248
5.6.2.4	Bewertung	248
5.6.3	Indikator: Installierte Leistung von Windenergieanlagen in Deutschland nach Standort	252
5.6.3.1	Datengrundlage	252
5.6.3.2	Quantifizierung	252
5.6.3.3	Ergebnisse	252
5.6.3.4	Bewertung	252
5.6.4	Indikator: Übertragungsnetz-Trassen in Deutschland	256

5.6.4.1	Datengrundlage	256
5.6.4.2	Quantifizierung	256
5.6.4.3	Ergebnisse	256
5.6.4.4	Bewertung	256
5.7	Wirkpfad Risiko der Kernenergie	260
5.7.1	Indikator: Nukleare Stromerzeugung in Deutschland und Nachbarländern	260
5.7.1.1	Datengrundlage	260
5.7.1.2	Quantifizierung	260
5.7.1.3	Ergebnisse	260
5.7.1.4	Bewertung	260
5.7.2	Indikator: Kernbrennstoff aus deutschen Leistungsreaktoren, oberirdisch gelagert.....	264
5.7.2.1	Datengrundlage	264
5.7.2.2	Quantifizierung	264
5.7.2.3	Ergebnisse	264
5.7.2.4	Bewertung	264
6	Ergebnisse und Defizitanalyse	267
6.1	Ergebnisse	267
6.2	Systemgrenzen und Treffsicherheit der Indikatoren	269
6.3	Auswirkungen des Energiesystems auf die Schutzgüter des UVPG	271
6.4	Vergleich mit den Umweltzustandsbeschreibungen in der Literatur	273
6.5	Notwendigkeit zur Ausarbeitung weiterer Indikatoren	274
6.5.1	Wo fehlen Indikatorenmodelle zur Beschreibung der Umweltauswirkungen?	274
6.5.2	Wo existieren Indikatorenkonzepte aber es fehlen die Daten?	275
6.5.3	Was fehlt zur Bewertung der Ergebnisse?	276
7	Schlussfolgerungen und Fazit	279
7.1	Schlussfolgerungen der Literaturanalyse	279
7.2	Methodische Festlegungen für das Monitoring	280
7.3	Ableitung der Indikatoren	281
7.4	Ergebnisse und Ausblick auf weitere Arbeiten	281
7.5	Offene Punkte und weiterer Forschungsbedarf	283
8	Quellenverzeichnis	286

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Bearbeitungskonzept.....	39
Abbildung 2:	Zeitplan, Arbeitsablauf und Meilensteine	41
Abbildung 3:	In den ausgewerteten Literaturstellen adressierte Themen.....	46
Abbildung 4:	Schnittmengen unterschiedlicher Umweltbewertungskonzepte	54
Abbildung 5:	Funktionsweise des Konzepts zum Umweltmonitoring	69
Abbildung 6:	Schutzgutbetroffenheit über den Wirkpfad	71
Abbildung 7:	Systemraum der Umweltbewertung	78
Abbildung 8:	Zu betrachtender Systemraum für den Wirkpfad Luftschadstoffe	102
Abbildung 9:	Betrachteter Systemraum für den Wirkpfad Luftschadstoffe.....	108
Abbildung 10:	Zu betrachtender Systemraum für den Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden.....	115
Abbildung 11:	Betrachteter Systemraum für den Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden.....	120
Abbildung 12:	Zu betrachtender Systemraum für den Wirkpfad Geräusch,- Licht- und Wärmeemissionen.....	126
Abbildung 13:	Betrachteter Systemraum für den Wirkpfad Geräusch,- Licht- und Wärme-emissionen	131
Abbildung 14:	Zu betrachtender Systemraum für den Wirkpfad Flächeninanspruchnahme	138
Abbildung 15:	Spezifische Flächenbelegungsfaktoren für verschiedene Energieträger zur Stromerzeugung für den Indikator A (ohne Biomasse)	141
Abbildung 16:	Spezifische Flächenbelegungsfaktoren für verschiedene Energieträger zur Stromerzeugung für den Indikator B.....	143
Abbildung 17:	Landschaftsbildbewertung: Beispiel Stadt Freiburg.....	144
Abbildung 18:	Betrachteter Systemraum für den Indikator zur Abbildung der indirekten Flächeninanspruchnahme mit Auswirkungen auf das Landschaftsbild.....	146
Abbildung 19:	Zu betrachtender Systemraum für den Wirkpfad Rohstoffnutzung	154
Abbildung 20:	Betrachteter Systemraum für den Wirkpfad Rohstoffnutzungen.....	158
Abbildung 21:	Zu betrachtender Systemraum für den Wirkpfad direkte Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen.....	162
Abbildung 22:	Betrachteter Systemraum für den Wirkpfad direkte Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen.....	165
Abbildung 23:	Emissionen von Stickoxiden (als NO ₂)	172
Abbildung 24:	Emissionen von Schwefeloxiden (als SO ₂)	176
Abbildung 25:	Emissionen von Feinstaub (PM 2,5)	180
Abbildung 26:	Emissionen von Black Carbon (BC)	184
Abbildung 27:	Emissionen von Kohlenmonoxid (CO)	188
Abbildung 28:	Emissionen von Quecksilber (Hg)	192

Abbildung 29:	Emissionen von Ammoniak (NH ₃).....	196
Abbildung 30:	Attributable Todesfälle durch Luftschadstoffe in Deutschland	200
Abbildung 31:	Emissionen von Abwasser aus dem Energiesystem Deutschlands	203
Abbildung 32:	Emission eutrophierender Luftschadstoffe aus dem Energiesystem	206
Abbildung 33:	Emission versauernder Luftschadstoffe aus der Energiewirtschaft.....	210
Abbildung 34:	Stickstoffüberschuss auf Anbauflächen von Energiepflanzen.....	214
Abbildung 35:	Lärmbelastungspotenzialflächen >40 dB(A) nachts durch das Energiesystem	219
Abbildung 36:	Entnahme von Kühlwasser zur Energieversorgung.....	223
Abbildung 37:	Temporäre Flächeninanspruchnahme durch das Energiesystem	227
Abbildung 38:	Temporäre Flächenbelegung durch das Energiesystem (Hemerobie-gewichtet)	231
Abbildung 39:	Indirekte Flächeninanspruchnahme mit Auswirkungen auf das Landschaftsbild durch das Energiesystem.....	235
Abbildung 40:	Durch das Energiesystem verbrauchte Rohstoffe nach Rohstoffen bzw. Rohstoffgruppen	239
Abbildung 41:	Materialkonsum im Bereich der Energieinfrastruktur in Deutschland.....	243
Abbildung 42:	Veränderung der Flächeninanspruchnahme zum Vorjahr durch das Energiesystem	245
Abbildung 43:	Turbinendurchfluss von Wasserkraftwerken und Kühlwassereinsatz in Wärmekraftwerken.....	249
Abbildung 44:	Installierte Leistung von Windenergieanlagen in Deutschland nach Standort	253
Abbildung 45:	Länge der Übertragungsnetz-Trassen in Deutschland	257
Abbildung 46:	Nukleare Bruttostromerzeugung in Deutschland und Nachbarländern.....	261
Abbildung 47:	Kernbrennstoff aus deutschen Leistungsreaktoren, oberirdisch gelagert.....	265
Abbildung 48:	Matrix zur Zusammenfassung der Ergebnisse.....	268
Abbildung 49:	Matrix zu Beurteilung der Treffsicherheit der Indikatoren	270

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	In den ausgewerteten Literaturstellen adressierte Themen.....	46
Tabelle 2:	Matrix zur Identifikation der potenziellen Umweltauswirkungen des Systemraumbestandteils „Vorkette“	79
Tabelle 3:	Matrix zur Identifikation der potenziellen Umweltauswirkungen des Systemraumbestandteils „Energieeinsatz in Anlagen zur öffentlichen Versorgung“	84
Tabelle 4:	Matrix zur Identifikation der potenziellen Umweltauswirkungen des Systemraumbestandteils „Energieeinsatz im Verkehr“	87
Tabelle 5:	Matrix zur Identifikation der potenziellen Umweltauswirkungen des Systemraumbestandteils „Energieeinsatz in Anlagen zur Eigenversorgung“	87
Tabelle 6:	Matrix zur Identifikation der potenziellen Umweltauswirkungen des Systemraumbestandteils „Infrastruktur“	90
Tabelle 7:	Vor- und Nachteile der verschiedenen Datengrundlagen und Modellierungsansätze	103
Tabelle 8:	Repräsentativität für die Bereiche der Energiewende	109
Tabelle 9:	Datengrundlage für eine Auswahl der im Rahmen des Projekts Flächenrucksack bearbeiteten Energieträger.....	135
Tabelle 10:	Berechnungsweg für den Indikator A für den Strombereich	140
Tabelle 11:	Im Rahmen des Projekts Flächenrucksack bearbeitete Hemerobiefaktoren zur Charakterisierung die Flächenbelegung durch Energieträger in artifizielle-Fläche-Äquivalente (aF-Äq.) (Werte z.T. vorläufig, noch in Bearbeitung)	142
Tabelle 12:	Rohstoffe im Bestand (t) und jährlicher Materialbedarf für die Energieverteilung und Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie nach MaRes (t/a), Daten für 2008	150
Tabelle 13:	Umgesiedelte Personen und als nicht bewohnbar deklarierte Flächen bei schweren Unfällen in Kernkraftwerken	167
Tabelle 14:	Emissionen von Stickoxiden (als NO ₂), in kt/a.....	173
Tabelle 15:	Emissionen von Schwefeloxiden (als SO ₂), in kt/a.....	177
Tabelle 16:	Emissionen von Feinstaub (PM 2,5), in kt/a.....	181
Tabelle 17:	Emissionen von Black Carbon (BC), in kt/a.....	185
Tabelle 18:	Emissionen von Kohlenmonoxid (CO), in kt/a.....	189
Tabelle 19:	Emissionen von Quecksilber (Hg), in t/a	193
Tabelle 20:	Emissionen von Ammoniak (NH ₃), in kt/a	197
Tabelle 21:	Attributable Todesfälle durch Luftschadstoffe in Deutschland.....	200
Tabelle 22:	Emissionen von Abwasser aus der Energiewirtschaft Deutschlands, in Mio. m ³ /a	204
Tabelle 23:	Emission eutrophierender Luftschadstoffe aus der Energiewirtschaft, in kt N/a.....	207

Tabelle 24:	Emission versauernder Luftschadstoffe aus der Energiewirtschaft, in Mrd. eq/a211
Tabelle 25:	Stickstoffüberschuss auf Anbauflächen von Energiepflanzen215
Tabelle 26:	Lärmbelastungspotenzialflächen >40 dB(A) nachts durch das Energiesystem, in km ²220
Tabelle 27:	Entnahme von Kühlwasser zur Energieversorgung, in Mrd. m ³ /a224
Tabelle 28:	Temporäre Flächeninanspruchnahme durch das Energiesystem, in ha.....228
Tabelle 29:	Temporäre Flächeninanspruchnahme durch das Energiesystem, in ha aF-Äq. (Hemerobie-gewichtet).....232
Tabelle 30:	Indirekte Flächeninanspruchnahme mit Auswirkungen auf das Landschaftsbild durch das Energiesystem, in ha.....236
Tabelle 31:	Durch das Energiesystem verbrauchte Rohstoffe nach Rohstoffgruppen.....240
Tabelle 32:	Materialkonsum im Bereich der Energieinfrastruktur in Deutschland, in Mio. t RME243
Tabelle 33:	Veränderung der Flächeninanspruchnahme zum Vorjahr durch das Energiesystem [ha].....246
Tabelle 34:	Turbinendurchfluss von Wasserkraftwerken und Kühlwassereinsatz in Wärmekraftwerken, in Mio.m ³ /a250
Tabelle 35:	Installierte Leistung von Windenergieanlagen in Deutschland nach Standort, in GW254
Tabelle 36:	Länge der Übertragungsnetz-Trassen in Deutschland, in km.....258
Tabelle 37:	Nukleare Bruttostromerzeugung in Deutschland und Nachbarländern, in TWh262
Tabelle 38:	Kernbrennstoff aus deutschen Leistungsreaktoren, oberirdisch gelagert, in t.....265
Tabelle 39:	Wirkungen auf Lebensräume und Biodiversität: Ursachen, Wirkungen und Minderungsmaßnahmen278

Abkürzungsverzeichnis

AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.
AGEE-Stat	Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien Statistik
BAU	Business-as-usual
BBSchG	Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz)
BASE	Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (ehemals Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit – BfE)
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMVi	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
BSB	Biochemischer Sauerstoffbedarf
CBA	Cost-benefit analysis
CCS	CO ₂ -Abscheidung und –Speicherung / CO ₂ -Sequestrierung (Carbon dioxide Capture and Storage)
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
EEG	Gesetz für den Ausbau Erneuerbarer Energien / Erneuerbare-Energien-Gesetz
EGS	Ecosystem Goods and Services
E-PRTR	Europäische Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregister (European Pollutant Release and Transfer Register)
HCB	Hexachlorbenzol
HELCOM	Kommission zum Schutz der Meeresumwelt im Ostseeraum (Convention on the Protection of the Marine Environment of the Baltic Sea Area).
IWES	Fraunhofer Institut für Windenergiesysteme
KRA	Kumulierter Rohstoffaufwand
kt	Kilotonne
kWh	Kilowattstunde
LAI	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz
LCA	Ökobilanz (Life Cycle Assessment)
MFA	Materialflussanalyse
NFR	New Format for Reporting /Nomenclature for reporting der UN ECE
NM VOC	Flüchtige Organische Verbindungen ohne Methan (Non Methan Volatile Organic Compounds)
NO_x	Stickoxide
PM 10	Feinstaub der Partikelgröße PM 10 (aerodynamischer Durchmesser weniger als 10 µm)

PM 2,5	Feinstaub der Partikelgröße PM 2,5 (aerodynamischer Durchmesser weniger als 2,5 µm)
POP	Persistente organische Schadstoffe, (P ersistent O rganic P ollutants)
PV-FFA	Photovoltaikfreiflächenanlagen
RED	EU Renewables Energy Directive
RL	Richtlinie
RMC	Raw Material Consumption - Rohmaterialkonsum
RME	Raw Material Equivalents - Rohmaterialäquivalente
RMI	Raw Material Input - Rohmaterialinput
SKE	Steinkohleneinheit
SOx	Schwefeloxide
SUP	Strategische Umweltprüfung
TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
THG	Treibhausgase
TSP	Gesamtstaub oder Schwebstaub in der Luft (T otal S uspended P articles)
UN ECE	United Nations Economic Commission for Europe (Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen)
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
UVPG	Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung
WEA	Windenergieanlage
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WHO	Weltgesundheitsorganisation
ZSE	Zentrales System Emissionen

Zusammenfassung

Grundlegende Frage 1: Was ist der Anlass des Vorhabens?

Die Energiewende geht einher mit einem grundlegenden Umbau des Energiesystems. Anlagen der öffentlichen Versorgung, die zentral auf Basis fossiler Energieträger produzieren, werden zunehmend zugunsten dezentraler Anlagen auf Basis erneuerbarer Energien abgelöst. Der Energieeinsatz im Verkehr und in Anlagen zur Eigenversorgung (vor allem Raumwärme und -kälte) wird entweder elektrifiziert oder auf erneuerbare Energieträger umgestellt.

Dieser Umbau ist mit dem Ziel verbunden, langfristig eine weitestgehend Dekarbonisierung des Energiesystems zu erreichen. Die Reduktion der CO₂-Emissionen gilt als einer der Performanceindikatoren einer erfolgreichen Energiewende.

Doch mit dem Zubau von Anlagen zur Nutzung der erneuerbaren Energien geraten auch deren Umweltwirkungen zunehmend in den Fokus. Somit besteht seitens der politischen Akteure der Wunsch, neben den CO₂-Emissionen weitere Umweltauswirkungen im Rahmen des Monitorings der Energiewende zu berücksichtigen. Dabei dürfen aber auch die bestehenden Umweltauswirkungen des konventionellen Energiesystems nicht vernachlässigt werden. Im Rahmen der Energiewende gehen daher neue Umweltwirkungen durch den Zubau neuer Technologien Hand in Hand mit Umweltentlastungen durch den partiellen Phase-Out konventioneller Technologien der Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie.

Für eine sachgerechte Abbildung der Umweltauswirkungen der Energiewende reicht es aber nicht, ausschließlich die in der öffentlichen Diskussion stehenden Umweltproblemfelder des Energiesystems mittels verfügbarer Daten zu beschreiben. Vielmehr braucht es eine rationale Begründung für die Auswahl möglicher Indikatoren und ein methodisch nachvollziehbares Konzept für eine möglichst umfassende Bewertung.

Grundlegende Frage 2: Welche Ziele verfolgt das Vorhaben?

Ziel des Vorhabens ist es, eine umfassende Methode zu entwickeln, mit welcher die Umweltauswirkungen einer fortschreitenden Energiewende gemessen und bewertet werden können. Die grundlegenden Anforderungen dabei sind:

1. Die gesamte Umwelt muss beurteilbar sein, nicht nur ausgewählte Umweltdimensionen wie bspw. Fläche oder Luftqualität
2. Die Auswahl an Indikatoren zur Beschreibung der Umweltauswirkungen soll auf Basis einer wissenschaftlichen Ableitung geschehen und sich primär an dem Notwendigen und weniger an dem Verfügbaren orientieren

Das Ergebnis des Vorhabens ist eine Liste an Indikatoren, die in Verbindung mit dem methodischen Gesamtkonzept ein umfassendes Umweltmonitoring der Energiewende erlaubt. Diese Liste an Indikatoren ist die Grundlage für weitere Ausarbeitungen des UBA und des BMU im Zusammenhang mit den Monitoringberichten zur Energiewende. Welche der in diesem Vorhaben vorgeschlagenen Indikatoren letztendlich für die offizielle Beschreibung der Umweltauswirkungen der fortschreitenden Energiewende herangezogen werden, wird mit dem hier vorliegenden Bericht nicht abschließend definiert. Damit die Auswahl nachvollziehbar begründbar ist, wird jeder der in diesem Vorhaben erarbeiteten Indikatoren hinsichtlich seiner Qualität beurteilt. Wesentliche Aspekte der Beurteilung sind die Quantifizierbarkeit und Fortschreibefähigkeit sowie die Treffsicherheit – im Sinne von: wie gut beschreibt der Indikator das adressierte Umweltproblemfeld.

Grundlegende Frage 3: Was untersucht das Vorhaben konkret?

Das Vorhaben bezieht sich ausschließlich auf Umweltauswirkungen, die in direktem Zusammenhang mit dem Energiesystem stehen. Die Ziele der Energiewende beziehen sich dabei auf die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr. Somit ist auch der Betrachtungsraum des Vorhabens entsprechend vordefiniert. Die Abgrenzung der Sektoren ist dabei der Systematik des Energieeinsatzes geschuldet (Kernfrage: wo wird Energie verbraucht?). Die Umweltauswirkungen des Energiesystems werden in diesem Vorhaben jedoch von der Ebene der Prozesse her identifiziert- (Kernfrage: welche Anlage ruft welche Umweltauswirkungen hervor?). Daher wird im Rahmen des Vorhabens der zu betrachtenden Systemraums nach Logik der Prozesse/ Anlagen sortiert und zwar in Umweltauswirkungen durch den:

1. Energieeinsatz in Anlagen der öffentlichen Versorgung zur Strom- und Wärmeerzeugung
2. Energieeinsatz im Verkehr
3. Energieeinsatz in Anlagen zur Eigenversorgung mit Strom und Wärme

Diese Systemraumbestandteile werden ergänzt durch die notwendige Infrastruktur (Anlagenstandorte) und den damit verbundenen Umweltauswirkungen, den Umweltauswirkungen der nationalen und internationalen Energieträgervorketten (Kohle, Gas Öl, Ölderivate und nachwachsende Rohstoffe) sowie den nationalen und internationalen Vorketten der Infrastruktur (vor allem Baustoffe).

Der Anspruch an das Bewertungskonzept ist, das sich die Umweltauswirkungen der Energiewende für den gesamten Systemraum in Form von Zeitreihen abbilden lassen, um eine fundierte Bewertung angestoßener Veränderungen des Umweltzustandes zu ermöglichen.

Methodische Frage 1: Mit welchem Konzept werden die Umweltveränderungen bewertet?

Um den Anspruch einer umfassenden Umweltbewertung gerecht werden zu können, wurden im Vorhaben verschiedene Umweltbewertungskonzepte identifiziert und miteinander verglichen. Die Entwicklung eines eigenständigen Modells, war kein Ziel des Vorhabens. Stattdessen wurden die positiven Aspekte verschiedener Modelle vorteilhaft miteinander verknüpft. So erfolgt die Identifizierung und Bewertung der einzelnen Umweltveränderungen anhand des Schutzgutkonzeptes aus dem UVPG. Die Schutzgüter sind: Menschen (menschliche Gesundheit), Tiere / Pflanzen / Biodiversität, Fläche und unterirdischer Raum, Boden, Wasser, Luft, Klima, Landschaft, Kulturelles Erbe und sonstige Sachgüter sowie die Wechselwirkungen zwischen den Schutzgütern.

Das Schutzgut Klima wird im Vorhaben explizit nicht berücksichtigt, dafür werden Rohstoffe durch das zusätzliche Schutzgut „Rohstoffe“ bedient.

Die Schutzgüter dienen als grundlegender Bewertungsmaßstab (Kernfrage: welche Umweltauswirkungen hat das Fortschreiten der Energiewende auf die definierten Schutzgüter). Ergänzend dienen die Schutzgüter aber auch als Identifikationshilfe bei der Ableitung der potenziellen Umweltwirkungen der Prozesse/ Anlagen im Systemraum (Kernfrage: welche Umweltauswirkungen hat ein(e) spezifische(r) Anlage/ Prozess auf die definierten Schutzgüter). Somit ist sichergestellt, dass die Umweltbewertung ganzheitlich und multikriteriell stattfindet, sodass keine potenziellen Umweltauswirkungen „vergessen“ werden.

Aus dem Ökobilanzansatz wird das Modell übernommen, Umweltauswirkungen in Form von Wirkpotenzialen zu beschreiben. Dabei steht nicht die Umweltschädigung durch die Immission im Vordergrund, sondern das Umweltschadpotenzial durch die Emission. Durch diese Methode können mögliche Umweltauswirkungen auch dann identifiziert, beschreiben und beurteilt werden, wenn keine vollständige Bestandsaufnahme oder Umweltzustandsbeschreibung des Unter-

suchungsgebietes vorliegt. Dies ist notwendig, da eine solche Zustandsbeschreibung bei dem umfassenden Betrachtungsgebiet (nationale und ggf. auch internationale Umweltauswirkungen der Energiewende) nicht bzw. nur in einer ausgesprochen abstrahierten Form möglich ist.

Methodische Frage 2: Wie wird die Betroffenheit der Schutzgüter ermittelt?

Die Bewertung der Veränderung des Umweltzustandes orientiert sich an den Schutzgütern des UVPG. Die Betroffenheit der Schutzgüter wird anhand von Wirkpfaden ermittelt. Wirkpfade beschreiben dabei den Weg der Umweltauswirkung von der Quelle zum Ort der möglichen Wirkung.

Dabei kann jedes Schutzgut von einem oder mehreren Wirkpfaden beeinflusst werden. Die Verknüpfung zwischen Schutzgut und Wirkpfad erfolgt anhand von in der Literatur beschriebenen Kausalitäten.

Die Diskussion der Beeinträchtigung der einzelnen Schutzgüter erfolgt im Rahmen dieses Vorhabens an folgenden Wirkpfaden: Luftgetragene Schadstoffe (in der Außenluft), Emissionen in Wasser und Boden, Schall-, Licht- und Wärmeemissionen, Flächeninanspruchnahme, Rohstoffnutzung sowie Direkte Auswirkungen/ Unfälle.

Methodische Frage 3: Wie werden die Zustandsveränderungen der Schutzgüter beschrieben?

Die durch das Fortschreiten der Energiewende angestoßenen Veränderungen im Umweltzustand werden durch Indikatoren beschrieben. Den Wirkpfaden kommt im Modell die thematische Bündelungsfunktion zu. Sie bündeln die Indikatoren, die für die Betrachtung des Schutzgutes von Relevanz sind. Über die Wirkpfade werden dadurch alle thematisch gleichen Indikatoren zur Bewertung der Umweltauswirkungen auf das jeweilige Schutzgut zugeordnet.

Die Wirkpfade adressieren somit die Ebene der Vernetzung zwischen Schutzgut und Indikator. Es besteht eine Abhängigkeit zwischen Indikator und Schutzgut, so dass nicht alle Indikatoren, die einem Wirkpfad zugeordnet sind, auch für das jeweilige Schutzgut relevant sind. Das Wirkpfadmodell ist somit mehr als Hilfe zur Identifikation von Indikatoren sowie deren Verknüpfung mit den Schutzgütern zu verstehen.

Methodische Frage 4: Welche Indikatoren werden im Vorhaben für das Monitoring vorgeschlagen?

Im Rahmen des Vorhabens wird die folgende Liste zur Betrachtung und Bewertung der Umweltauswirkungen der Energiewende vorgeschlagen:

- Wirkpfad luftgetragene Schadstoffe
wirkt auf die Schutzgüter menschliche Gesundheit, Tiere und Pflanzen, Biologische Vielfalt, Boden, Wasser, Luft, Kultur und sonstige Sachgüter
 - Emission an Stickstoffoxide (NO_x als NO₂) in kt/Jahr
 - Emission an Schwefeldioxide (als SO₂) in kt/Jahr
 - Emission an Feinstaub PM 2,5 in kt/Jahr
 - Emission an Black Carbon in kt/Jahr
 - Emission an Kohlenmonoxid (CO) in kt/Jahr
 - Emission an Quecksilber (Hg) in t/Jahr
 - Emission an Ammoniak (NH₃) in kt/Jahr
 - Attributale Todesfälle durch Luftschadstoffe in Deutschland in Fälle/Jahr

- ▶ **Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden**
wirkt auf die Schutzgüter menschliche Gesundheit, Tiere und Pflanzen, Biologische Vielfalt, Böden, Wasser, Kultur und sonstige Sachgüter
 - Abwasser aus der Energiewirtschaft in Tsd. m³/Jahr
 - Stickstoffüberschuss in Böden aus dem Anbau von Energiepflanzen in kt N/a
 - Eutrophierung von terrestrischen Ökosystemen durch die Deposition von eutrophierenden Luftschadstoffen aus dem Energiesystem (ohne Biogasanlagen) in kg N (gesamt) ha⁻¹ a⁻¹
 - Versauerung von terrestrischen Ökosystemen durch die Deposition von versauernden Luftschadstoffen aus dem Energiesystem in eq ha⁻¹ a⁻¹.
- ▶ **Wirkpfad Geräusch-, Licht-, und Wärmeemissionen**
wirkt auf die Schutzgüter Menschen, Tiere und Pflanzen, Biologische Vielfalt,
 - Geräuschemissionen als Lärmbelastungspotenzialflächen in denen 40 dB(A) in der Nacht überschritten wird [km²], differenziert nach Anlagentypen
 - Menge am Kühlwasser aus der Energiewirtschaft in Deutschland [Mrd. m³/a]
- ▶ **Wirkpfad Flächeninanspruchnahme**
wirkt auf die Schutzgüter Tiere und Pflanzen, Biologische Vielfalt, Fläche, Landschaft, Kultur und sonstige Sachgüter
 - Temporäre Flächenbelegung durch das Energiesystem in [km²]
 - Temporäre Flächenbelegung durch das Energiesystem charakterisiert anhand der Hemerobie in [km² aF-Äq.]
 - Indirekte Flächeninanspruchnahme mit Auswirkungen auf das Landschaftsbild [ha]
- ▶ **Wirkpfad Rohstoffnutzung**
wirkt auf das Schutzgut Rohstoffe
 - Durch das Energiesystem verbrauchte Rohstoffe nach Rohstoffgruppen in natürlichen Einheiten (Mio. t) oder in Mio. t SKE
 - Materialkonsum im Bereich der Energieinfrastruktur in Deutschland in Mio. t RME
- ▶ **Wirkpfad direkte Auswirkungen auf Tier und Pflanzen**
wirkt auf die Schutzgüter Tiere und Pflanzen, Biologische Vielfalt
 - Veränderung der Flächeninanspruchnahme zum Vorjahr durch das Energiesystem [ha a⁻¹]
 - Turbinendurchfluss von Wasserkraftwerken und Kühlwassereinsatz in Wärmekraftwerken [Mio. m³ a⁻¹]
 - Installierte Leistung der Windenergieanlagen in Deutschland in GW differenziert nach Offenland/Wald/Offshore
 - Länge der Freileitungstrassen im Übertragungsnetz [km]
- ▶ **Risiko durch schwere Unfälle in Kernkraftwerken und Risiko durch hochradioaktive Abfälle**
wirkt auf das Schutzgut Menschen
 - Stromerzeugung aus Kernenergie in Deutschland und Nachbarländern (Niederlande, Belgien, Frankreich, Schweiz, Tschechien) [TWh/a]
 - Menge an Brennelementen aus deutschen Leistungsreaktoren für die Endlagerung, die noch oberirdisch gelagert sind [t]

Methodische Frage 5: Wie ist die Qualität der Indikatoren/ Wirkpfade zu bewerten?

Die Qualitätsbewertung der Indikatoren baut auf den folgenden Faktoren auf:

- ▶ Wie bildet der Indikator die zu beschreibende Umweltauswirkung ab?
- ▶ Wie umfasst der Indikator die für den Wirkpfad definierten Systemgrenzen?
- ▶ Wie ist die Datenqualität der für die Berechnung/ Ableitung der Indikatoren genutzten Daten zu bewerten?

Die Bewertung der Indikatoren bezieht auch die Ebene der Wirkpfade mit ein. Hier ist die Kernfrage der Bewertung, wie der Wirkpfad durch die Indikatoren abgebildet ist. Die Bandbreite reicht von „Komplett“ im Sinne von: die gewählten Indikatoren beschreiben alle potenziellen Umweltfolgen über den Wirkpfad bis hin zu „in Auszügen“ im Sinne von: die gewählten Indikatoren beschreiben Umweltfolgen über den Wirkpfad ohne Anspruch auf Vollständigkeit

Letztendlich ist auch die Ebene der Schutzgüter selbst für die Beurteilung der Indikatoren relevant. Es wird bewertet, in wie weit die Indikatoren über die Wirkpfade eine sachgerechte Beurteilung der Umweltauswirkungen auf die betroffenen Schutzgüter erlauben. Es ist zu unterscheiden, ob die Ergebnisse der Indikatoren eine direkte Bewertbarkeit darstellen oder nur Hinweise auf eine potenzielle Umweltveränderung geben können.

In der Zusammenschau der Bewertung wird im Rahmen des Vorhabens wie folgt festgestellt:

- ▶ Nur die Schutzgüter **Fläche, Luft und Rohstoffe** werden ausschließlich mit Indikatoren bewertet, die eine sachgerechte Beurteilung der Umweltauswirkungen erlauben.
- ▶ Die Schutzgüter **menschliche Gesundheit** sowie **Tiere /Pflanzen / Biodiversität** zeigen ein gemischtes Bild. Insbesondere die Indikatoren für den Wirkpfad Luftschadstoffe und die eng damit im Zusammenhang stehenden Indikatoren zur Beschreibung der Umweltauswirkungen über Emissionen in Wasser und Boden haben eine hohe Treffsicherheit.
- ▶ Hinsichtlich des Schutzgut **Tiere /Pflanzen / Biodiversität** ist zwingend zu beachten, dass die direkten Auswirkungen auf dieses Schutzgut mehrheitlich über Proxy-Indikatoren dargestellt werden, die allenfalls Hinweise auf die potenziellen Umweltfolgen der Energiewende liefern können. Durch die Verwendung dieser Proxy-Indikatoren können diese Auswirkungen nicht valide beurteilt werden.
- ▶ Das Schutzgut **Boden** und das Schutzgut **Wasser** werden vornehmlich von Indikatoren adressiert, die nur Hinweise auf potenzielle Umweltauswirkungen liefern können, insbesondere wenn es um qualitative Aspekte geht. Die Quantitativen Auswirkungen (Flächeninanspruchnahme, Wasserinanspruchnahme) hingegen, können hinreichend gut abgebildet werden.
- ▶ Hinsichtlich der Schutzgüter **Landschaft** sowie **Kulturelles Erbe und sonstige Sachgüter** sind vor allem Hinweise auf potenzielle Umweltauswirkungen ableitbar, wobei spezifische Auswirkungen auf das Schutzgut Landschaft, über Indikatoren direkt quantifiziert wurden.

Es zeigt sich, dass sich um die Emissionen von Luftschadstoffen, Flächeninanspruchnahme und Rohstoffnutzung valide Cluster bilden, bei denen die Umweltauswirkungen der Energiewende

auf die über den jeweiligen Wirkpfad betroffenen Schutzgüter hinreichend gut mit qualitativ hochwertigen und passgenauen Indikatoren beschrieben werden. Die Bewertbarkeit der Schutzgüter über die anderen Wirkpfade steht demgegenüber teilweise erheblich zurück, insbesondere betrifft dies die Umweltauswirkungen über den Wirkpfad Geräusch-, Licht und Wärmeemissionen und den Wirkpfad direkte Auswirkungen. Diese Einschränkung ist bei der Beurteilung der Ergebnisse des Umweltmonitorings der Energiewende entsprechend zu berücksichtigen.

Frage zu den Ergebnissen 1: Wie sind die aktuellen Umweltauswirkungen der Energiewende im Vergleich zur Referenzjahr 2000 zu beurteilen?

Im Vergleich zum Referenzjahr lassen sich die durch Indikatoren quantifizierten Umweltveränderungen wie folgt beschreiben:

Die Umweltauswirkungen auf die Schutzgüter des UVPG durch Emissionen in Luft und Wasser haben mit dem weiteren Voranschreiten der Energiewende abgenommen.

Die Beeinträchtigungen des Schutzgutes Landschaft im Sinne von Auswirkungen auf das Landschaftsbild nehmen zu.

Eher gleichbleibend sind die Umweltauswirkungen auf das Schutzgut Fläche über die Wirkungen der direkten Flächeninanspruchnahme (die Betriebsflächen für den Braunkohletagebau nehmen ab, die Flächen für Freiland-PV nehmen zu und die Flächenbelegungen für den Energiepflanzenanbau bleiben nach einem zunächst starken Anstieg in den letzten Jahren weitgehend konstant). Ebenso gleichbleibend ist das Risiko durch die zivile Nutzung der Kernkraft in Deutschland.

Das Schutzgut Boden im Sinne der Bodenqualität wird durch das Fortschreiten der Energiewende weniger durch die Deposition von Luftschadstoffen belastet. Dieser Entlastung steht jedoch eine neue Beeinträchtigung durch den ansteigenden Stickstoffeintrag in die Böden aus dem Anbau von Energiepflanzen gegenüber.

Durch das Fortschreiten der Energiewende werden weniger Ressourcen für das Energiesystem verbraucht. Dem müssen jedoch die verbauten Ressourcen gegenübergestellt werden. Für eine solche Analyse stehen die Modelle zur Verfügung, nur fehlen bislang die Daten zur Verrechnung. Insofern soll an dieser Stelle – trotz der grundsätzlich positiven Beurteilung der Integration des Themas Rohstoffe ins Monitoringmodell - keine abschließende Bewertung des Schutzguts Ressourcen vorgenommen werden.

Frage zu den Ergebnissen 2: Was sind weitere Ergebnisse des Vorhabens?

Ein weiteres Ergebnis des Vorhabens auf der Metaebene ist die Erkenntnis, dass eine umfassende Umweltbewertung der Energiewende möglich ist. Das Vorhaben zeigt aber auch, dass ein multikriterieller Ansatz an methodische Grenzen stößt, wenn möglichst viele vorhandene Daten genutzt werden sollen, um kein konkurrierendes Regime zur Umweltberichtserstattung aufzubauen. Es zeigt sich, dass die vorhandenen Daten für die verschiedenen Umweltproblemfelder hinsichtlich des umfassten Systemraums und der notwendigen Prozessspezifität nicht immer äquivalent aufbereitet werden können. Somit ergeben sich bei der Beurteilung der verschiedenen Umweltauswirkungen Diskrepanzen, die dazu führen, dass erhebliche qualitative Unterschiede bei der Bewertung der unterschiedlichen Umweltauswirkungen stattfinden und einige Aspekte im Monitoring unberücksichtigt bleiben.

Frage zu den Ergebnissen 3: Was alles ist im Monitoring nicht berücksichtigt?

Nicht valide Bewertbar sind die Umweltauswirkungen auf die Schutzgüter des UVPG aufgrund der zunehmenden Geräuschemissionen von Windenergieanlagen und der Lichtemissionen, da hier bislang noch kein geeigneter Bewertungsmaßstab bzw. noch kein geeigneter Indikator gefunden bzw. entwickelt wurde. Auch die direkten Auswirkungen auf naturschutzfachliche Aspekte lassen sich auf Ebene der Indikatoren nicht valide quantifizieren, die für das Monitoring erarbeiteten Indikatoren sind somit ausschließlich als Proxy-Indikatoren zu verstehen. Sie adressieren das Umweltproblemfeld, beschreiben aber nicht die Entwicklung der Auswirkungen, sondern ausschließlich die Veränderungen an den Emissionsquellen (z.B. die Zunahme von Windenergieanlagen als Proxy-Indikator für eine mögliche Zunahme der Schädigung der Avifauna an Windenergieanlagen).

Darüber hinaus konnten verschiedene Bestandteile des Systemraums, wie bspw. die Infrastruktur oder Teile der internationalen Energieträgervorketten nicht in allen Indikatoren umfassend abgebildet werden.

Frage zu den Ergebnissen 4: Welche weiteren Aktivitäten werden seitens der Forschungsnehmer empfohlen?

Im Rahmen der Empfehlungen werden verschiedene Stellen genannt, an denen zukünftig umfassendere bzw. präzisere Daten erhoben werden müssen. Problematisch für das Monitoring ist es immer, wenn eine Aussage für den gesamten Systemraum anhand spezifischer, per Stichprobe ermittelter Fallzahlen interpoliert werden soll. Für eine gleichbleibend hohe Qualität und Aussagekraft der Indikatoren kann nur Zahlenmaterial genutzt werden, das die durchschnittlichen deutschen Verhältnisse angemessen reflektiert. Aufgrund der Problematik der unterschiedlichen Abbildung des betrachteten Systemraums in den ausgearbeiteten Indikatoren empfehlen die Studienautoren letztendlich die Möglichkeit zu prüfen, die Energiewende in Form einer sich turnusmäßig zu aktualisierenden Ökobilanz zu betrachten.

Das in diesem Vorhaben erarbeitete Monitoringmodell enthält bereits viele Denkansätze einer Ökobilanz (Betrachtung von Umweltschadpotenzialen). Diskussionen um eine konkurrierende Umweltberichtserstattung insbesondere im Bereich der Luftschadstoffe haben im aktuellen Vorhaben eine weitere Verfolgung des Ansatzes verhindert. Dies könnte in einem Anschlussprojekt, das dezidiert eine Ökobilanz in den Fokus nimmt von Anfang an zielgerichtet aufgearbeitet werden.

Der Ökobilanzansatz hätte darüber hinaus den Vorteil, dass auch hypothetische Vergleichsszenarien bilanziert werden könnten wie bspw. eine Welt ohne Energiewende, so dass sich die Summe der Umweltveränderungen durch die Energiewende ausweisen ließe (Stichwort: Referenzszenario). Zu den Nachteilen des Ökobilanzansatzes gehört, dass ökobilanzielle Ergebnisse stets nur Umweltwirkungspotenziale darstellen und somit schlussendlich keine direkte Beurteilung des Umweltzustandes anhand von lokalen Gegebenheiten erlauben.

Und auch eine per Ökobilanz erzeugte Bewertung der Umweltauswirkungen der Energiewende kann, wie auch das hier durchgeführte Vorhaben, schlussendlich keine zufrieden stellende Antwort auf den Grundkonflikt finden, wie reduzierte Umweltbelastungen des Energiesystems zu bewerten sind, wenn definierte Umweltqualitätsziele nicht erreicht werden.

Spezielle inhaltliche Fragen

Im Rahmen des Vorhabens wurden an vielen Stellen vertiefte inhaltlichen Diskussionen mit Expertinnen und Experten aus den unterschiedlichsten Fachabteilungen geführt. Im Folgenden sollen verschiedene Punkte, die im Rahmen der durchgeführten Workshops zum Vorhaben oft und intensiv diskutiert werden kurz beleuchtet werden:

- ▶ *Wie sind die Umweltauswirkungen der Anbaubiomasse im Monitoring abgebildet?*
Insbesondere die Abbildung der Umweltwirkungen der energetischen Nutzung der Anbaubiomasse war ein intensiv diskutierter Punkt. Die Umweltwirkungen des Biomasseanbaus auf die Schutzgüter Boden und Wasser (inkl. Grundwasser) werden über den Indikator Stickstoffüberschuss in Böden aus dem Anbau von Energiepflanzen betrachtet, der die Stickstoffeinträge in die Ackerböden durch Biomasseanbau und Düngung aber auch Gärresteausbringung beschreibt. Weiterhin werden die Flächenbelegungen für Anbaubiomasse im Wirkpfad Fläche berücksichtigt. Darüber hinaus werden auch die Beiträge der energetischen Nutzung der Anbaubiomasse auf die Luftqualität beschreiben. Dafür werden neben den Luftschadstoffen durch die Verbrennung von Biogas in Anlagen, die dem Systemraum der Energiewende zuzuordnen sind, auch die NH₃ Emissionen in die Außenluft integriert, die durch das Ausbringen von Gärresten aus Biogasanlagen entstehen.
- ▶ *Wie sind die Umweltwirkungen der Windenergieanlagen im Monitoring abgebildet?*
Die Umweltauswirkungen der Windenergieanlagen werden im Monitoringmodell durch die Darstellung der direkten und indirekten Flächenbelegung sowie auf die potenzielle Geräuschkentwicklung beschreiben. Ein weiterer Proxy-Indikator stellt darüber hinaus Informationen zusammen, die eine Abschätzung über das Risikopotenzial für die Avifauna ermöglicht. Im Rahmen der Rohstoffbetrachtung werden die Ressourcenaufwendungen für die Windenergieanlagen berücksichtigt. Das Thema Licht – im Sinne von Lichtreflexen und Schattenwurf - konnte im Vorhaben nicht betrachtet werden.
- ▶ *Wie sind die Umweltwirkungen der fossilen Feuerungsanlagen im Monitoring abgebildet?*
Die Umweltwirkungen der fossilen Feuerungsanlagen werden primär über die Luftschadstoffe als direkte Auswirkungen über den Wirkpfad Luftschadstoffe und zusätzlich indirekt als Deposition über den Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden abgebildet. Darüber hinaus erfolgt eine Betrachtung der Wassereinleitungen in Seen und Fließgewässer durch die Energiewirtschaft. Auch im Rahmen des Indikatorenvorschlages zur Abbildung der Umweltauswirkungen von Lärm, werden die fossil befeuerten Kraftwerke berücksichtigt. Im Rahmen der Flächenbilanzierung sind die Kraftwerksstandorte ebenso berücksichtigt. Diese entfalten jedoch, wie bei den Rohstoffen, keine große Relevanz. Hier sind die Energieträgervorketten von deutlich größerer Bedeutung.
- ▶ *Wie sind die Umweltwirkungen der außerdeutschen Energieträger im Monitoring abgebildet?*
Da die Energiewende nicht an den deutschen Grenzen endet, weil eine erhebliche Menge an Energieträgern eingeführt wird, war eine Abbildung der internationalen Energieträgervorketten ein wesentlicher Diskussionspunkt im Rahmen des Vorhabens. Das nun erarbeitete Monitoringmodell kann die Umweltauswirkungen der internationalen Energieträger nur begrenzt abbilden. So sind die spezifischen Umweltauswirkungen über die Wirkpfade „Fläche“ und „Rohstoffe“ integriert. In den Wirkpfaden „luftgetragene Schadstoffe“ sowie „Emissionen in Wasser und Boden“ sind die spezifischen Umweltwirkungen der internationalen Energieträgervorketten jedoch nicht integriert, da die dafür ausgewertete Datengrundlage (NFR) nur innerdeutsche Emissionen berichtet.

Summary

Basic question 1: What is the purpose of the project?

The energy transition is accompanied by a fundamental restructuring of the energy system. Public supply systems that produce centrally on the basis of fossil fuels are increasingly being replaced by decentralised systems based on renewable energies. The use of energy in transport and in supply systems (especially space heating and cooling) will be electrified and/or converted to renewable energy sources.

This conversion is linked to the long-term goal of achieving the greatest possible decarbonisation of the energy system. The reduction of CO₂ emissions is regarded as one of the performance indicators of a successful energy transition.

However, with the expansion of renewable energy plants, their environmental impact is increasingly coming into focus. Political actors are therefore keen to take into account other environmental impacts in addition to CO₂ emissions when monitoring the transformation of the energy system. The existing environmental impacts of the conventional energy system must not be neglected either. In the context of energy transition, therefore, new environmental impacts from the addition of new technologies go hand in hand with the reduction of environmental impacts from the partial phase-out of conventional technologies for energy generation or conversion.

For a proper description of the environmental impacts of the energy transition, it is not enough to describe only the environmental problems of the energy system that are the subject of public debate using available data. Rather, it requires a rational justification for the selection of possible indicators and a sound methodological concept with the goal of a comprehensive evaluation.

Basic question 2: What are the objectives of the project?

The aim of the project is to develop a comprehensive method for measuring and evaluating the environmental impacts of a progressive energy system transformation. The basic requirements are:

1. the entire environment must be assessable, not only selected environmental dimensions such as area or air quality, and
2. the selection of indicators for describing environmental impacts should be based on scientific derivation and be oriented primarily to what is necessary rather than what is available.

The result of the project is a list of indicators which, in conjunction with the overall methodological concept, allows comprehensive environmental monitoring of the energy transition. This list of indicators is the basis for further work by UBA and BMU in connection with the monitoring reports on the energy transition. Which of the indicators proposed in this project will ultimately be used for the official description of the environmental impacts of the ongoing transformation of energy systems is not conclusively defined in this report. To ensure that the selection can be justified in a comprehensible manner, each of the indicators developed in this project will be assessed in terms of its quality. Key aspects of the assessment are quantifiability, availability of continuous updates and accuracy, in the sense of: how well does the indicator describe the environmental problem area addressed.

Basic question 3: What does the project investigate in concrete terms?

The project addresses exclusively the environmental impacts that are directly related to the energy system. The objectives of energy transition refer to the sectors electricity, heat and transport. The project's scope is thus predefined. The delimitation of the sectors is based on the system of energy use (core question: where is energy consumed?). However, the environmental impacts of the energy system are identified in this project from the process level (core question: which plant causes which environmental impacts?). Therefore, the system area to be considered in this project is sorted according to the logic of the processes/equipment, namely into environmental effects caused by:

1. energy use in public supply plants for electricity and heat generation,
2. energy use in transport, and
3. energy use in plants for local supply of electricity and heat.

These components in the system area are supplemented by the necessary infrastructure (plant locations) and the associated environmental impacts, the environmental impacts of the national and international energy source supply chains (coal, gas, oil, oil derivatives and renewable raw materials) and the national and international infrastructure supply chains (especially in case of building materials).

The aim of the assessment concept is to be able to map the environmental impacts of energy system transformation for the entire system area in the form of time series, in order to enable a well-founded assessment of initiated changes in the state of the environment.

Methodological question 1: Which concept is used to assess environmental changes?

In order to meet the requirement of a comprehensive environmental assessment, different environmental assessment concepts were identified and compared with each other in the project. The development of an independent model was not an objective of the project. Instead, the positive aspects of different models were combined in a beneficial way. Thus, the identification and evaluation of the individual environmental changes is based on the concept of protected resources from the Environmental Impact Assessment Act UVPG. The objects of protection are: human beings (human health), animals / plants / biodiversity, surface and underground space, soil, water, air, climate, land area, landscape, cultural heritage and other material goods as well as the interactions between the objects of protection.

The project explicitly does not take into account the climate as a protected resource, but raw materials are served by the additional protected resource "raw materials".

The resources to be protected serve as a basic evaluation yardstick (core question: what environmental impact will the progress of energy system transformation have on the defined assets). In addition, they also serve as an identification aid in deriving the potential environmental impacts of the processes/plants in the system area (core question: what environmental impact does a specific plant/process have on the defined objects of protection). This ensures that the environmental assessment is holistic and addresses multiple criteria, so that no potential environmental impacts are "forgotten".

From the LCA approach, the model is adopted to describe environmental impacts in the form of impact potentials. The focus is not on the environmental damage caused by the immissions, but on the environmental damage potential caused by the emissions. With this method, possible environmental impacts can be identified, described and assessed even if no complete inventory or data on the environmental status of the area under investigation is available. This is necessary because such a description of the state of the environment is not possible, or only possible in a

very abstract form, given the comprehensive scope of the study (national and possibly international environmental impacts of the transition).

Methodological question 2: How is the extent determined to which the protected resources are affected?

The assessment of the change in the state of the environment is based on the protected resources defined in the Environmental Impact Assessment Act UVPG. The impact on the protected resources is determined on the basis of impact pathways. Impact pathways describe the environmental impact from the source to the site of the possible effect.

Each protected resource can be impacted by one or more impact pathways. The link between the protected resources and the pathway is established on the basis of causalities described in the literature.

The discussion of the impairment of a specific protected resource within the framework of this project is carried out at the following impact pathways: airborne pollutants (in outdoor air), emissions to water and soil, sound, light and heat emissions, land use, use of raw materials and direct effects/accidents.

Methodological question 3: How are the changes in the status of the protected resources described?

The changes in the state of the environment that are triggered by the progress of energy system transformation will be described by indicators. In the model, the impact pathways have a thematic focus. They bundle the indicators that are relevant for the consideration of the protected resources. The impact pathways are used to assign all thematically similar indicators for the evaluation of the environmental impacts on the respective object of protection.

The impact pathways address the network between the protected resource and the indicator. There is a dependency between indicator and the protected resource, so that not all indicators assigned to an impact pathway are relevant for the respective protected resource. The impact pathway model therefore serves as an aid for the identification of indicators and their linkage to the protected resources.

Methodological question 4: Which indicators are proposed in the project for monitoring?

The following list of indicators is proposed in the project for monitoring and evaluating the environmental impacts of energy system transformation:

► Impact pathway airborne pollutants

affects the protected resources human health, animals and plants, biological diversity, soil, water, air, culture and other material goods

- Emission of nitrogen oxides (NO_x as NO₂) in kt/year
- Emission of sulphur dioxide (as SO₂) in kt/year
- Particulate matter emissions PM 2.5 in kt/year
- Emission of black carbon in kt/year
- Carbon monoxide (CO) emissions in kt/year

- Emission of mercury (Hg) in t/year
- Ammonia (NH₃) emissions in kt/year
- Attributable deaths due to air pollutants in Germany in cases/year
- ▶ Impact pathway emissions to water and soil
affects the protected resources human health, animals and plants, biological diversity, soil, water, culture and other material goods
 - Waste water from the energy industry in thousand m³/ year
 - Surplus nitrogen in soils from the cultivation of energy crops in kt N/a
 - Eutrophication of terrestrial ecosystems due to the deposition of eutrophying air pollutants from the energy system (without biogas plants) in kg N (total) ha⁻¹ a⁻¹
 - Acidification of terrestrial ecosystems through the deposition of acidifying air pollutants from the energy system in eq ha⁻¹ a⁻¹.
- ▶ Impact pathway noise, light and heat emissions
affects the protected resources humans, animals and plants, biological diversity,
 - Noise emissions as noise pollution potential areas in which 40 dB(A) is exceeded at night [km²], differentiated by plant type
 - Volume of cooling water from the energy industry in Germany [billion m³/a].
- ▶ Impact pathway land use
affects the protected resources animals/plants/biodiversity, land, landscape, culture and other material goods
 - Temporary land use by the energy system in [km²].
 - Temporary land use by the energy system characterized by the hemeroby in [km² aF-eq.]
 - Indirect land use with impacts on the landscape [ha]
- ▶ Impact pathway raw material use
affects the protected resources raw materials
 - Raw materials consumed by the energy system by group of raw materials in natural units (million tonnes) or in million tce
 - Material consumption in the energy infrastructure sector in Germany in million t RME
- ▶ Impact pathway direct effects on animals and plants
affects the protected resources animals, plants and biodiversity
 - Change in land use by the energy system compared with the previous year [ha a⁻¹].

- Turbine flow rate of hydroelectric power plants and cooling water use in thermal power plants [million m³ a⁻¹]
- Installed capacity of wind power plants in Germany in GW differentiated by open land/forest/offshore
- Length of overhead lines in the transmission system [km]
- ▶ Risk from major accidents in nuclear power plants and risk from high-level radioactive waste
affects the protected resources humans
- Electricity generation from nuclear energy in Germany and neighbouring countries (Netherlands, Belgium, France, Switzerland, Czech Republic) [TWh/a]
- Quantity of fuel elements from German power reactors for final disposal that are still stored above ground [t]

Methodological question 5: How is the quality of the indicators / impact paths to be assessed?

The quality assessment of the indicators is based on the following factors:

- ▶ how does the indicator reflect the environmental impact to be described?
- ▶ how does the indicator cover the system boundaries defined for the impact pathway?
- ▶ how is the data quality of the data used for the calculation/derivation of the indicators to be evaluated?

The evaluation of the indicators also includes the level of the impact path. Here the core question of the evaluation is how well the impact pathway is represented by the indicators. The spectrum ranges from "complete" in the sense of: the selected indicator describes all potential environmental impacts via the impact pathway to "partially" in the sense of: the selected indicators describe environmental impacts via the impact pathway without claiming to be complete

Ultimately, the level of the protected resources itself is also relevant for the assessment of the indicators. The extent to which the indicators allow a proper assessment of the environmental impacts on the objects of protection concerned via the impact pathways is evaluated. A distinction must be made as to whether the results of the indicators represent a direct assessability or can only provide indications of a potential environmental change.

In the summary of the evaluation, the following is stated in the context of the project:

- ▶ The protected resources **land area, air** and **raw materials** are evaluated exclusively with indicators that allow a proper assessment of the environmental impacts.
- ▶ The protected resources **human health** and **animals/plants/biodiversity** show a mixed picture. In particular, the indicators for the impact path of air pollutants and the closely related indicators for the description of environmental impacts via emissions to water and soil have a high accuracy.
- ▶ With regard to the protected resources **animals/plants/biodiversity**, it is imperative to note that the direct impacts on these protected resources are mostly represented by proxy

indicators, which can at best provide indications of the potential environmental consequences of energy system transformation. The use of these proxy indicators does not allow these impacts to be validly assessed.

- The protected resources **soil** and **water** are primarily addressed by indicators that can only provide indications of potential environmental impacts, especially where qualitative aspects are concerned. The quantitative effects (land use, water consumption), on the other hand, can be sufficiently well represented.
- With regard to the protected resources **landscape** and **cultural heritage and other material goods**, indications of potential environmental impacts can be derived, whereby specific impacts on the protected resource landscape were directly quantified by means of indicators.

It has been shown that valid clusters are formed around the emissions of air pollutants, land use and raw material use, in which the environmental impacts of energy system transformation on the objects of protection affected by the respective impact path are described sufficiently well with high-quality and precisely fitting indicators. In contrast, the assessability of the protected resources via the other impact pathways lags behind, in some cases considerably, particularly with regard to the impact pathways noise, light and heat emissions and the direct impact pathway. This limitation must be taken into account accordingly when assessing the results of environmental monitoring of the energy system transformation.

Question on results 1: How should the current environmental impact of energy system transformation be assessed in comparison with the reference year 2000?

Compared to the reference year, the environmental changes quantified by indicators can be described as follows:

The environmental impacts on the protected resources defined in the Environmental Impact Assessment Act UVPG via emissions into air and water have decreased as the transformation of energy systems has progressed.

The impairments of the landscape as a protected resource have increased.

The environmental impacts on the protected resource land area from direct land use are more or less constant (operating areas for opencast lignite mining are decreasing while the areas for land-based PV are increasing and the land use for energy crop cultivation remains largely constant following an initially rapid increase in recent years). The risk from the civil use of nuclear power in Germany is equally constant.

As the energy system transformation progresses, soil as a protective good in terms of soil quality will be less affected by the deposition of air pollutants. However, this relief is offset by a new impairment due to the increasing nitrogen input into the soil from the cultivation of energy crops.

As energy system transformation progresses, fewer resources are consumed for the energy system. However, this must be contrasted with the resources used. The models are available for such an analysis, but data for quantification are still missing. Despite the fundamentally positive assessment of the integration of the topic of raw materials into the monitoring model, no final evaluation of the resource as a protected resource can be made at this point.

Question on results 2: What are further results of the project?

A further result of the project at the meta-level is the finding that a comprehensive environmental assessment of energy system transformation is possible. The project also shows, however, that a multi-criteria approach has methodological limitations if as much existing data as possible is to be used in order not to establish a competing regime for environmental reporting. It has been shown that the available data for the various environmental impacts does not always fit the system boundary and is not necessarily specific enough. This results in discrepancies in the assessment of the various environmental impacts and leads to considerable differences in the quality of the evaluation of environmental impacts so that some aspects are disregarded in the monitoring.

Question on result 3: What is not included in the monitoring?

The environmental impacts on the protected resources listed in the Environmental Impact Assessment Act UVPG cannot be validly assessed such as noise emissions from wind turbines and light emissions, since no suitable assessment standard or indicator has been developed. Also, the direct effects on nature conservation aspects cannot be validly quantified on the level of the indicators; the indicators developed for monitoring are therefore serve exclusively as proxy indicators. They address the environmental problem area, but do not describe the development of the impacts, but only the changes in emission sources (e.g. the capacity of wind turbines as a proxy indicator for damage to avifauna from wind turbines).

Furthermore, various components within the system boundary, such as infrastructure or the international energy supply chain, could not be comprehensively depicted for all indicators.

Question on results 4: What further activities are recommended by the research team?

As to recommendations, various areas were identified where more comprehensive or more precise data must be collected in the future. It is always problematic for the monitoring if a statement is to be interpolated for the entire system area on the basis of specific case numbers determined by random sampling. In order to ensure that the indicator is specific and of high quality, only data that adequately reflects average German conditions can be used.

Given the problem different system boundaries for the indicators that were developed, the authors of the study recommend to examine a life cycle assessment (LCA) of the energy system transformation that is updated at regular intervals.

The monitoring model developed in this project already contains many approaches to a life cycle assessment, e.g. quantifying the environmental damage potential. Discussions about competing environmental reporting, especially regarding air pollutants, have prevented the current project from pursuing this approach further. This could be addressed in a follow-up project that focuses on a life cycle assessment right from the start.

The LCA approach would also have the advantage that hypothetical comparative scenarios, such as a world without energy system transformation, could be included in the balance sheet, so that the total of environmental changes resulting from the energy transition can be calculated (e.g. by comparing to a reference scenario). One of the disadvantages of the LCA approach is that LCA results always represents only environmental impact potential and does not permit a direct assessment of the state of the environment based on local conditions.

An LCA-based assessment of the environmental impacts of energy transition, like the project carried out here, will not provide a conclusive answer to the basic conflict of how to assess re-

duced environmental impacts on the energy system if defined environmental quality goals are not met.

Specific content issues

Within the framework of the project, in-depth discussions on findings were held with experts from a wide range of expertise. In the following, some points that were often and intensively discussed in the context of the workshops held on the project are briefly examined:

- ▶ *How are the environmental impacts of energy crops represented in the monitoring?*
The precise mapping of the environmental impacts of the use of energy crops was a point of intense discussion. The environmental impacts of biomass cultivation on the protective resources soil and water (including groundwater) are considered via the indicator nitrogen surplus in soils from the cultivation of energy crops, describing the nitrogen inputs into arable soils through biomass cultivation and fertilization, but also the application of fermentation residues. Furthermore, the land use for energy crops in the impact path area is taken into account. Furthermore, the impact of energy crops on air quality are described. In addition to air pollutants from the combustion of biogas in plants, NH₃ emissions into the air arising from the application of fermentation residues from biogas plants are considered.
- ▶ *How are the environmental impacts of wind energy plants represented in the monitoring?*
The environmental impacts of wind turbines are described in the monitoring model by addressing direct and indirect land use and the potential noise emissions. A further proxy indicator also compiles information that allows an assessment of the risk potential for avifauna. In the context of the raw materials analysis, the resource costs for the wind turbines are taken into account. The impact pathway light (light reflections and shadows) could not be considered in the project.
- ▶ *How are the environmental impacts of the fossil fuel combustion plants represented in the monitoring?*
The environmental impacts from fossil fuel combustion plants are represented primarily by air emission pathway and indirectly by the deposition into water and soil. Water discharges into lakes and rivers are considered by the energy industry. Fossil fuel power plants are also taken into account by the noise indicator. The land use for power plants is taken into account in the area balance sheet. However, as with raw materials, they do not play a relevant role because the energy source supply chains are more important.
- ▶ *How are the environmental impacts of non-German energy sources reflected in the monitoring?*
The energy system transformation does not end at Germany's borders because a considerable amount of energy carriers are imported. The mapping of international energy supply chains was a point of discussion in the project. The monitoring model developed is mapping the environmental impacts of international energy sources to a limited extent only. Specific environmental impacts are part of the impact pathways "land area" and "raw materials". Specific environmental impacts of the international energy source supply chains are not or integrated in the impact pathways "airborne pollutants" and "emissions to water and soil", since the data basis evaluated for this purpose (NFR) only reports domestic emissions.

1 Hintergrund und Zielsetzung

Die Energiewende ist eine der großen Aufgaben des 21. Jahrhunderts. Die Herausforderung besteht darin, die seit beinahe 100 Jahren bestehende Struktur der Energiebereitstellung und -nutzung auf Basis von fossilen und nuklearen Energieträgern, die sich seit Beginn der industriellen Revolution kontinuierlich weiterentwickelt und verfestigt hat, auf erneuerbare Energien umzustellen und gleichzeitig deutlich effizienter zu gestalten. Dieser Prozess geschieht nicht von heute auf morgen, sondern findet im Rahmen einer sukzessiven Transformation statt. Langfristige, ambitionierte Ziele werden von kurzfristigen Zielen und Maßnahmen flankiert, welche die entsprechenden Weichen in die energiepolitische Zukunft stellen.

Allen Akteuren der Energiewende ist klar, dass es nicht nur einen möglichen Weg in diese Zukunft gibt. Es ist unwahrscheinlich, dass alle Maßnahmen, die als Bausteine einer tragfähigen Lösung diskutiert werden, in einer Gesamtbewertung tatsächlich wie veranschlagt ihren Beitrag leisten werden. Es stellt sich die Frage, wie es dazu kommen kann, dass eine aus fachlicher Sicht vielversprechende Einzelmaßnahme nicht den gewünschten Beitrag erbringt oder sogar langfristig den Zielen einer umweltgerechten Energieversorgung zuwiderlaufen kann. Aus Sicht der Umweltforschung sind hier oft Rebound- und Verlagerungseffekte¹ relevant, die durch einen zugespitzten Fokus auf Klimaschutz und Energiewendeziele erst zu spät erkannt werden.

In den vergangenen fünf Jahren (2014 bis 2019) wurden von verschiedenen Akteuren Szenarien für die zukünftige Ausgestaltung des Energiesystems erarbeitet. Die folgenden Studien geben Ausblicke auf eine mögliche zukünftige Gestaltung des Energiesystems:

- Bundesregierung: Klimaschutzszenario 2050
- Umweltbundesamt: Politiksznarien VIII
- Umweltbundesamt: Treibhausgasneutrales Deutschland 2050
- Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie: Energiereferenzprognose
- Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der Erneuerbaren Energien in Deutschland (ehemals Leitstudie)

Neben der Beschreibung der Transformation des Energiesystems sind die klimarelevanten Emissionen zumeist mehr oder weniger prominent berücksichtigt. In einigen Vorhaben werden auch weitere umweltrelevante Einzelaspekte wie der Rohstoffverbrauch untersucht (Bsp. FKZ 3715 41 115 0 „Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland“). Nur wenige Simulationen beinhalten eine umfassende Umweltanalyse (z. B. die Langfristszenarien des BMWi [Franke et al. 2018]).

Um den Erfolg im Prozess der kontinuierlichen Umsetzung von Maßnahmen der Energiewende zu messen, hat die Bundesregierung beschlossen, mit dem jährlichen Indikatoren-Bericht ein Monitoring zur „Energie der Zukunft“ durchzuführen. Aufgabe des Berichtes ist es auch, einen Überblick über den Fortschritt bei der Erreichung der quantitativen Energiewendeziele zu geben. Der Ausblick auf die Entwicklung der kommenden Jahre und die Notwendigkeit zusätzlicher Maßnahmen sind Gegenstand des alle drei Jahre zu erarbeitenden Fortschrittsberichts. Die

¹ Ein nahezu als „klassisch“ zu bezeichnendes Beispiel für einen umweltseitigen Verlagerungseffekt der Energiewende wäre bspw. der deutlich verstärkte Einsatz von holzbefeuerten Heizungsanlagen. Zwar würde damit der fossile Energieverbrauch für die Raumwärme deutlich minimiert und die CO₂-Emissionen gesenkt, auf der anderen Seite würden jedoch die bodennahen Feinstaubemissionen aus den Kaminen der Hausheizungen deutlich zunehmen. Somit wird eine Umweltlast minimiert und es entsteht eine andere.

zentrale Datenquelle für das **Monitoring** ist die amtliche Energiestatistik sowie weitere Quellen aus dem Energie- und Verkehrsbereich. Das Monitoring erfolgt anhand von ursprünglich 49 Indikatoren (erster Monitoringbericht 2012) die sich bei der Fortschreibung weiter ausdifferenziert haben. Dabei sollen auch die Umweltwirkungen der Energiewende betrachtet werden.

Dazu formulieren [Löschel et. al. 2012] als Stellungnahme der Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“ zum ersten Monitoringbericht „Energie der Zukunft“: *„Im Monitoring-Bericht der Bundesregierung wird keine Indikatorik zu genannten Umweltdimensionen vorgelegt. Aus unserer Sicht ist die Umweltverträglichkeit aber ein Bewertungsmaßstab der Energiewende, welcher auch im Monitoring entsprechend berücksichtigt werden sollte.“*

Die relevanten Umweltdimensionen lassen sich aus Sicht der Expertenkommission insbesondere durch Indikatoren für die Flächeninanspruchnahme, Emissionen von Luftschadstoffen, Wasserbelastung, Ressourcennutzung und Radioaktivität abbilden. Dabei ist vor allem die Flächeninanspruchnahme relevant und sollte beobachtet werden. Bei den anderen Umweltdimensionen ist durch die Energiewende tendenziell eine Entlastung zu erwarten. Unbedingt sollte der Monitoring-Bericht sich mit der Endlagerproblematik beschäftigen.“

In dieser Textstelle ist die Keimzelle des Umweltmonitorings der Energiewende zu sehen. Da die vorhandene Datenlage als unzureichend beurteilt wurde, sahen UBA und BMU die Notwendigkeit, für die Umsetzung der Energiewende ein Umweltmonitoring zu entwickeln, das von der Konzeption her in der Lage ist, die Auswirkungen der Energiewende auf die Umwelt als vielschichtiges Geflecht interdependenter Wirkungszusammenhänge bewertbar zu machen.

Ein von Fraunhofer ISI bearbeitetes F&E Vorhaben hat sich daher bis 2016 mit der Entwicklung von Indikatoren für das Thema Klimaschutz im Energiebereich beschäftigt und kommt für das Teilthema Umwelt zu folgenden Aussagen:

[Schlomann B. et al. 2016] Methoden- und Indikatorenentwicklung für Kenndaten zum Klimaschutz im Energiebereich (Climate Change 12/2016): *„Der Schwerpunkt dieser Studie liegt auf einer Betrachtung von Indikatoren zum Energieverbrauch und den daraus resultierenden energiebedingten Treibhausgas-Emissionen.“*

Weitere Aspekte wie die Berücksichtigung weiterer Emissionen (z. B. klassische Luftschadstoffe und Wasserbelastung), Flächenverbrauch (im Zusammenhang mit erneuerbaren Energien und im Vergleich zur konventionellen Energieversorgung, sowie der in beiden Fällen benötigten Infrastruktur (etwa Netze), Ressourcenverbrauch und Ressourcenschonung, Auswirkungen auf die Biodiversität, energiebedingte Abfälle, Radioaktivität sowie Auswirkungen auf Gesundheit und Sicherheit sind jedoch ebenfalls relevant. Um diese Aspekte in vergleichbaren Indikatoren abzubilden wie die Treibhausgasemissionen und den Energieverbrauch /- erzeugung, besteht jedoch noch ein erheblicher Forschungs- und anschließender Handlungsbedarf, denn bisher fehlen für viele Bereiche sowohl adäquate Methoden als auch statistische Daten.“

Während [Löschel et. al. 2012] sehr generell auf das Fehlen umweltbezogener Aussagen hinweist und die in der breiten Diskussion als relevant erachteten Themen wie bspw. Flächeninanspruchnahme, Emissionen von Luftschadstoffen, Wasserbelastung, Ressourcennutzung und Radioaktivität sowie die Endlagersuche schlaglichtartig benennt und dabei vor allem die Flächeninanspruchnahme als Hotspot wertet, adressiert [Schlomann B. et al. 2016] auch das Fehlen adäquater Methoden und statistischer Daten für eine sachgerechte Ableitung von Indikatoren. Es wird Aufgabe dieses Vorhabens sein, sich dieser Thematik vertieft anzunehmen und Vor-

schläge für Indikatoren und deren Bewertung zu erarbeiten oder wenn dies nicht möglich ist, die Lücken und Informationsbedarfe so präzise wie möglich zu benennen.

Deutlich konkreter, wie die Indikatorik nach Meinung des BMWi aussehen könnte, wird der im Juni 2018 veröffentlichte **Sechste Monitoring-Bericht zum Stand der Energiewende**. Der Bericht dokumentiert den Fortschritt der Energiewende für das Jahr 2016 [BMWi 2018a]. Thematisiert wird unter anderem der Ausbau der Erneuerbaren Energien, Entwicklungen im Bereich Energieverbrauch und Energieeffizienz in den unterschiedlichen Sektoren sowie die Erreichung von Zielen und Maßnahmenumsetzung im Verkehrs- und Gebäudebereich. Hierzu wird eine Vielzahl energiestatistischer Daten aufbereitet und ausgewertet. Kapitel 11 des Monitoring-Berichts befasst sich mit der Umweltverträglichkeit der Energiewende und erläutert die Notwendigkeit und Problemstellung des Monitorings anderer Umweltauswirkungen (außer den Treibhausgasemissionen).

Ziel des hier in Form eines Endberichtes dokumentierten Vorhabens ist es daher, die aktuellen Umweltauswirkungen der Energiewende im Allgemeinen und die Verlagerungseffekte im Speziellen anhand des realen Umsetzungsfortschrittes der Transformation der Energiesysteme zu erfassen und als Zeitreihen zu quantifizieren und visualisieren. Dafür werden im Rahmen des Vorhabens Indikatoren erarbeitet, die im Sinne eines Monitorings dazu dienen, unerwünschte Umweltentwicklungen zu identifizieren und den Erfolg ggf. getroffener Gegenmaßnahmen zu überprüfen.

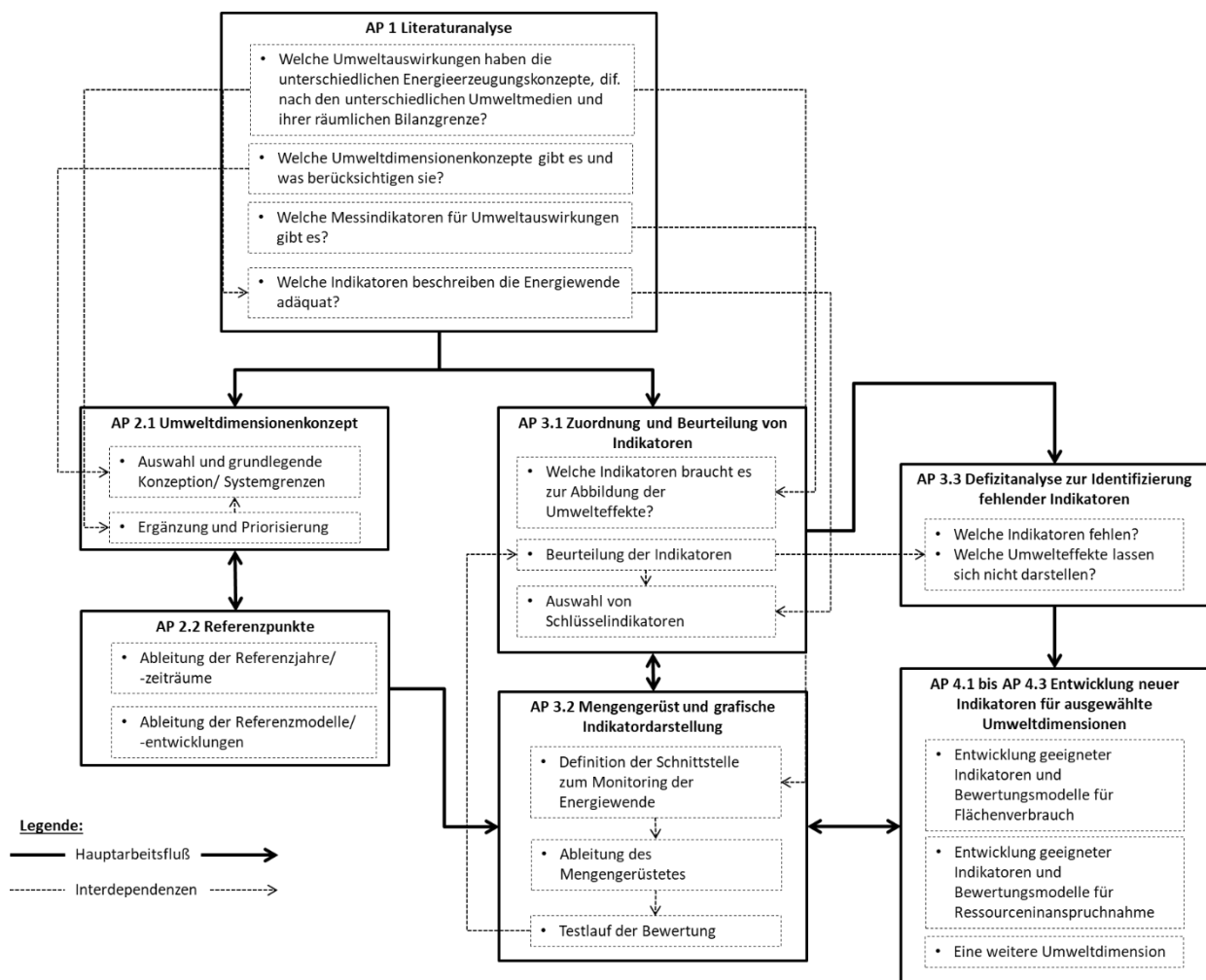
Die Herausforderungen liegen dabei vor allem darin, einen möglichst operationalisierbaren Ansatz zur Abbildung der vielschichtigen Umwelteffekte zu erarbeiten. Um das Thema der Verlagerungseffekte sachgerecht bearbeiten zu können, bedarf es multikriterieller Ansätze zur Bewertung. Beispielsweise lassen sich im Gegensatz zur direkten Flächenbelegung und direkten Stoffeinträgen die resultierenden Umweltwirkungen (z.B. Verlagerung von Lebensräumen von Organismen) in der Regel weniger präzise bestimmen. Dies ist daher bei einer sachgerechten Diskussion der einzelnen Umweltmedien bzw. der Notwendigkeit eindeutiger Bewertungsmaßstäbe bei der Gesamtschau aller Umweltwirkungen zu bedenken. Weitere neuralgische Punkte bei der Konzeptentwicklung sind die Definition der Betrachtungsräume, sowohl zeitlich als auch regional.

Die Aufgabenstellung des Projektes macht die Verknüpfung technisch quantitativer Bewertungsmodelle auf Basis naturwissenschaftlicher und stark mathematisch geprägter Modelle wie bspw. Ökobilanz mit eher qualitativen Bewertungsmodellen, wie sie aus den planerischen Umweltprüfungsprozessen (UVP, SUP) bekannt sind unabdingbar.

1.1 Bearbeitungskonzept

Die gestellte Aufgabe wird entsprechend der Vorstellungen des Auftraggebers in vier Arbeitspaketen bearbeitet. Die Inhalte lassen sich in drei Teile fassen. Zum einen die grundlegende Aufbereitung der methodischen Grundlagen für das Monitoringkonzept (AP 1 und 2), die Ableitung geeigneter Indikatoren aus vorhandenem Material (AP 3) und deren Zuordnung in das Konzept sowie abschließend die Neuerarbeitung noch fehlender Indikatoren und deren Einbindung in das Monitoring (AP 4).

Abbildung 1: Bearbeitungskonzept



Quelle: eigene Darstellung ifeu 2020

1.2 Beteiligung weiterer Fachkreise am Vorhaben

Auftragsgemäß wurden insgesamt vier Workshops durchgeführt, die dazu dienten, Zwischenergebnisse und Einzelaspekte des Vorhabens vorzustellen und zu diskutieren. Die Ergebnisse der Workshops sind in der Weiterbearbeitung der gestellten Forschungsfragen berücksichtigt worden. Die Workshops dienten auch dazu, weitere Kreise in die Ergebnisgenese des Vorhabens einzubinden, insbesondere die weiteren Facheinheiten des UBA, aber auch Akteure von BMU und BMWi sowie BfN und relevante Akteure bspw. aus möglichen Vernetzungsprojekten. Der erste Workshop diente dem Austausch über die grundlegenden methodischen Festlegungen des Vorhabens. Der zweite und dritte Workshop diente der Diskussion der ausgewählten Indikatorenvorschläge, und zeigte, dass die Bereitstellung einer von den beteiligten Kreisen allgemein als geeignet angesehenen Liste an Indikatoren erheblich schwieriger ist, als zunächst vermutet. So konnte auch im dritten Workshop noch keine von allen beteiligten Fachkreisen akzeptierte Eini-gung über eine abschließende Indikatorenliste erreicht werden. Vielmehr wurden in der Diskus-sion auch immer wieder die grundlegenden methodischen Festlegungen diskutiert. So zeigte sich, dass für eine weitere Bearbeitung des Vorhabens von einer allgemein gültigen und für die Beschreibung aller Umweltauswirkungen der Energiewende verbindliche Definition des Sys-temraums Abstand genommen werden musste. Stattdessen wurde der Systemraum für die ein-zelnen Wirkpfade spezifischer definiert. Besonderheiten der Systemgrenzen zu den jeweiligen

Wirkpfaden sind daher in einer Übersicht zum Systemraum jeweils am Anfang der Kapitel 4.2 bis 4.7 dargestellt.

Folgende Institutionen waren im Rahmen der Workshops eingeladen bzw. hatten die Möglichkeit an den Kommentierungsrunden der vorgelegten Zwischenberichte teilzunehmen:

- ▶ UBA
- ▶ BMU
- ▶ BMWi
- ▶ BfN
- ▶ BBSR
- ▶ BNetzA
- ▶ FNR
- ▶ Destatis
- ▶ Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende
- ▶ Angehörige der Expertenkommission zur Energiewende
- ▶ UFZ und Bosch und Partner als Vertreter eines Vernetzungsprojektes

Im Sinne einer sinnvollen und ergebnisorientierten Koordination der Forschungsvorhaben wurde daher mit einer Vielzahl von Projekten und Aktivitäten ein inhaltlicher Austausch und wo immer möglich auch die direkte Vernetzung gesucht. Aus den folgenden Vorhaben gehen Teilergebnisse oder methodische Grundüberlegungen in den Endbericht ein:

- ▶ UBA F&E Vorhaben FKZ 3715 41 116 0 „Komponentenzerlegung energiebedingter Treibhausgasemissionen mit Fokus auf dem Ausbau erneuerbarer Energien“ liefert Hintergrundüberlegungen für die Ableitung und Aufbereitung der Systemräume
- ▶ UBA F&E Vorhaben FKZ 3715 41 115 0 „RTD - Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland“ liefert methodische Ansätze für die Integration der Thematik „Rohstoffe“ in das Bewertungsmodell
- ▶ UBA F&E Vorhaben FKZ 3717 31 105 0 „Ermittlung und Verifizierung von Datenquellen und Datengrundlagen für die Berechnung der Flächenrucksäcke“ liefert methodische Ansätze und Daten für die Integration der Thematik „Flächeninanspruchnahme“ in das Bewertungsmodell
- ▶ BMWi Vorhaben „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der Erneuerbaren Energien in Deutschland unter besonderer Berücksichtigung der nachhaltigen Entwicklung sowie regionaler Aspekte“ (ehemals Leitstudie)) liefert mit seinem Berichtsteil zur strategischen Umweltprüfung wesentliche Beiträge für die Darstellung der Gesamtumweltwirkung. [Franke et al., 2018]

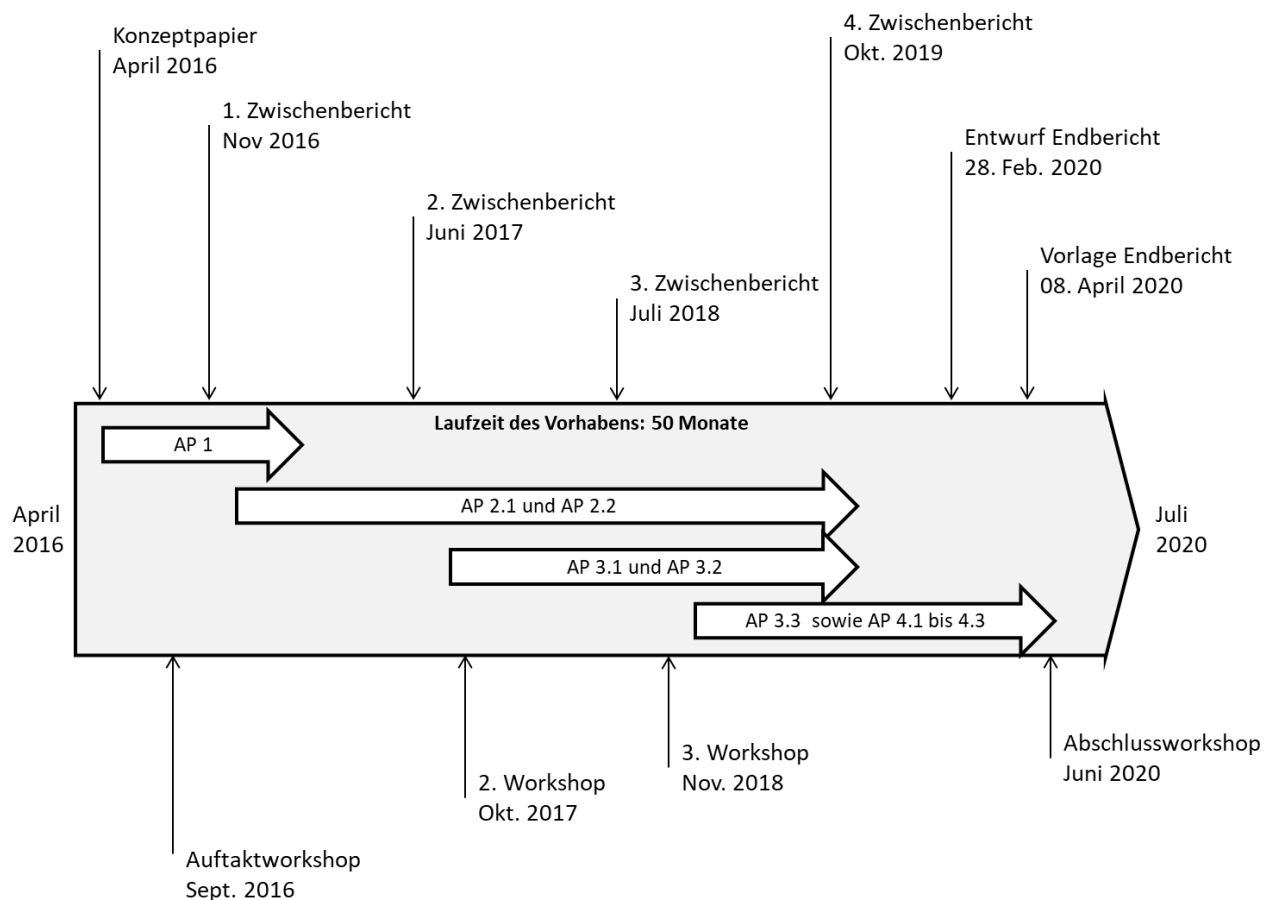
Andere Vorhaben mit denen ein frühzeitiger inhaltlicher Austausch gesucht wurde, wie bspw. das BfN F&E Vorhaben FKZ 3515 82 2700 Förderprojekt „Naturschutzfachliches Monitoring des Ausbaus der Erneuerbaren Energien im Strombereich und Entwicklung von Instrumenten zur Verminderung der Beeinträchtigung von Natur und Landschaft“ konnten aufgrund eines deutlich anderen methodischen Ansatzes für das hier dokumentierte Forschungsvorhaben nicht genutzt werden.

Generell zeigte sich durch die Beteiligung anderer Fachkreise, dass der umfassende Bewertungsansatz des Monitorings der Energiewende eine starke Abstraktion und teilweise sicherlich auch Vereinfachung in der Beschreibung und Bewertung der Umweltauswirkungen notwendig macht. Spezifische Umweltprobleme wurden und werden in Einzelvorhaben weitaus detaillierter behandelt, als es in diesem F&E Vorhaben leistbar ist. Wo immer möglich wird der aktuelle Stand der Forschung aufgegriffen. Die Erarbeitung neuer Grundlagendaten oder Etablierung gänzlich neuer methodischer Ansätze für spezielle Fragestellungen ist nicht Gegenstand des Vorhabens.

1.3 Projektverlauf

Das Vorhaben wird zum Juli des Jahres 2020 inhaltlich und formal abgeschlossen. Abbildung 2 zeigt die Bearbeitungsschwerpunkte und -zeiträume sowie die vereinbarten Meilensteine während der Laufzeit des Projektes.

Abbildung 2: Zeitplan, Arbeitsablauf und Meilensteine



Quelle: eigene Darstellung ifeu 2020

1.4 Glossar

AGEB: Die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. wertet die vorhandenen Statistiken aus allen Gebieten der Energiewirtschaft nach wissenschaftlichen Gesichtspunkten aus, erstellt regelmäßig jedes Jahr eine Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland und macht diese der Öffentlichkeit zugänglich.

AGEE Stat: Die Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) ist ein unabhängiges Fachgremium, welches im Auftrag des BMWi arbeitet. Der Arbeitsschwerpunkt der AGEE-Stat liegt im Bereich der Statistik der erneuerbaren Energien. Daneben hat das Fachgremium die Aufgabe, eine Grundlage für die verschiedenen Berichtspflichten der Bundesregierung im Bereich der erneuerbaren Energien zu legen und allgemeine Informations- und Öffentlichkeitsarbeit zu Daten und Entwicklung der erneuerbaren Energien zu leisten.

Avifauna: Die Gesamtheit aller in einer Region vorkommenden Vogel- und Fledermausarten.

Charakterisierungsfaktoren: der Begriff entstammt der Ökobilanz-Methodik und bezeichnet ein aus einem Modell abgeleiteten Faktor, der zur Umrechnung eines zugeordneten Ergebnisses für einen Einzelparater (Luftschadstoff o.ä.) in die gemeinsame Einheit des Kategorie-Indikators verwendet wird. So werden bspw. Kohlendioxid und Methanemission in CO₂e Werte umgerechnet, wobei ein kg Methan aufgrund der entsprechend höheren Klimawirksamkeit 21 kg Kohlendioxid entspricht. Der Charakterisierungsfaktor für Methan entspricht somit dem Wert 21.

Critical Levels, d.h. kritische Immissionskonzentrationen, üblicherweise angegeben als Mikrogramm pro Kubikmeter [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], beschreiben Luftschadstoffkonzentrationen, bei deren Unterschreitung nach derzeitigem Wissen keine direkten Schäden an Rezeptoren zu erwarten sind.²

Critical Loads, d.h. kritische Eintragsraten, üblicherweise angegeben als Kilogramm pro Hektar und Jahr [$\text{kg}/\text{ha}\cdot\text{a}$], beschreiben Wirkungen über den Bodenpfad. Sie werden definiert als derjenige Eintrag von Luftschadstoffen, bis zu dessen Erreichung nach derzeitigem Kenntnisstand langfristig keine signifikanten schädlichen Effekte an Ökosystemen und Teilen davon zu erwarten sind.³

Denkmodell: Als Denkmodell wird der Ansatz bezeichnet, mit dem die Indikatoren ausgewählt werden. Sprich es wird eine Grundüberlegung erstellt, wie die Umwelteffekte des Energiesystems dargestellt werden können und eruiert, welche Indikatoren es dafür braucht.

Energievorketten: Prozesse in der Bereitstellung von Energieträgern (z.B. Bergbau, Transporte, Raffinerien).

Energiesystem: Das Energiesystem (Deutschland) umfasst alle Bereiche der Erzeugung bzw. Umwandlung der Energie, der Energieumwandlung und des Energieverbrauchs.

Energiewende: Die Energiewende bezeichnet die Umstellung des Energiesystems von der Nutzung fossiler und nuklearer Energieträger auf eine nachhaltige und ökologische Energieversorgung mit der Nutzung erneuerbarer Energieträger und Energieeinsparungen.

Indikator: Ein Indikator quantifiziert komplexe oder schlecht messbare Sachverhalte. Mittels Indikatoren sollen die Umweltauswirkungen des Energiesystems auf die Schutzgüter messbar gemacht werden. Geeignete Indikatoren stehen stellvertretend und mit möglichst hoher Korre-

² <https://www.nul-online.de/Magazin/Archiv/Critical-Loads-als-geeigneter-Massstab-fuer-die-FFH-Vertraeglichkeitspruefung,QUIEPT5MjEyNzgmdTUIEPTgyMDMw.html>

³ ebenda

lation für eine Umweltwirkung. Ein Indikator (z. B. Feinstaubkonzentration als Indikator für Luftgüte) kann dabei in unterschiedlichen Prozessen des Energiesystems und auch durch die Nutzung unterschiedlicher Energieträger erzeugt werden, und ebenso Auswirkungen auf verschiedene Schutzgüter haben.

Sachbilanz: Zusammenstellung und Quantifizierung von Umweltaspekten als Inputs und Outputs eines ausgewählten Betrachtungsobjektes im Verlauf seines Lebensweges (DIN EN ISO 14044:2006).

Schutzgut: Als Schutzgut kann grundsätzlich alles bezeichnet werden, was aufgrund seines materiellen oder ideellen Wertes geschützt werden soll. Schutzgüter im Sinne des UVPGs sind Menschen (insbesondere die menschliche Gesundheit), Tiere, Pflanzen und biologische Vielfalt, Fläche, Boden, Wasser, Luft, Klima, Landschaft, Kulturelles Erbe und sonstige Sachgüter sowie Wechselwirkungen zwischen den Schutzgütern.

Sektoren der Energiewende/des Energiesystems: Auf Steuerungsebene wird das Energiesystem bzw. die Energiewende in die drei Sektoren Strom(-verbrauch), Wärme und Verkehr eingeteilt.

Umweltdimension: Hilfsmittel zur Beschreibung der Umwelt als Ganzes. Um den Begriff Umwelt umfassend zu definieren bedarf es eines in sich schlüssigen Konzeptes, wie z.B. den Schutzgutansatz aus dem UVPG.

Umweltproblemfeld: Clustering von Umweltproblemen. In Umweltproblemfeldern werden Umweltauswirkungen verschiedener Quellen subsumiert. Bspw. ist die Eutrophierung von Böden ein Umweltproblemfeld, dass durch versch. Faktoren beeinflusst wird (bspw. Düngung und Deposition von Luftschadstoffen), so dass zur Lösung ein integriertes Konzept entwickelt werden muss.

UVP / UVPG: Das Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung regelt die Prüfung der Umweltverträglichkeit aller Vorhaben, die aufgrund ihrer Art, Größe oder ihres Standortes erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt haben können.

Wirkpfad: Weg eines Schadstoffes von der Schadstoffquelle bis zu dem Ort einer möglichen Wirkung auf ein Schutzgut. Die Wirkpfade (z. B. luftgetragene Schadstoffe) bündeln einzelne Indikatoren und ordnen Sie den Schutzgütern zu. Dabei wirken nicht unbedingt alle Indikatoren eines Wirkpfads auf das jeweilige Schutzgut ein.

2 Literaturanalyse

Das Kapitel Literaturanalyse dient der Dokumentation des Prozesses der Literaturrecherche, die während der mehrjährigen Dauer des Vorhabens stets begleitend durchgeführt wurde. Die Liste der ausgewerteten Literatur erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, dafür ist das Wachstum des Pools möglicher Quellen zu schnell. Auch hat sich im Laufe der Bearbeitung des Vorhabens der Anspruch an die Literaturquellen verändert. Standen in den ersten Jahren vor allem Literaturquellen zur Aufstellung von Bewertungssystemen und Systemräumen im Fokus hat sich der Informationsbedarf in Richtung spezielle Umweltauswirkungen spezifischer Prozesse gewandelt. Zum Abschluss der inhaltlichen Bearbeitung wurden dann eher Daten recherchiert, die eine Quantifizierung ermittelter Umweltauswirkungen erlauben.

Das vorliegende Kapitel bemüht sich, den ausgewerteten Literaturquellen gerecht zu werden, indem es in einem ersten Schritt eine grobe Übersicht der grundlegenden Quellen zeichnet, dann die detaillierten Daten zur Quantifizierung der potenziellen Umweltauswirkungen näher beschreibt und abschließend eine grobe und lediglich orientierende Bewertung der aktuellen Umweltauswirkungen des Energiesystems im Status Quo gibt.

2.1 Grundlegende Literaturanalyse

Ausgehend von der allgemeinen in der Leistungsbeschreibung gegebenen Problemstellung, ist es notwendig die Literaturanalyse auf die möglichst abschließende Beantwortung der folgenden Leitfragen auszurichten:

- a) Welche Umweltauswirkungen haben die unterschiedlichen Konzepte zur Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie und Energieinfrastrukturen, differenziert nach den unterschiedlichen Umweltmedien und ihrer räumlichen Bilanzgrenze?
- b) Welche Konzepte gibt es, die eine umfassende Umweltbewertung ermöglichen?
- c) Welche konkreten Messindikatoren für einzelne Umweltauswirkungen gibt es bislang in der Literatur?
- d) Welche von diesen Indikatoren beschreiben die Energiewende adäquat?
- e) Wie ist die Datenverfügbarkeit?

Ziel der Analyse war es, den vorhandenen Wissensstand zusammenzutragen und entsprechend der Fragestellungen in den Arbeitspaketen zwei bis vier aufzubereiten. Analysiert wurden vor allem Literaturstellen aus den Bereichen:

- Umwelt-/Energie-Nachhaltigkeits-Indikatorensets
- Ökobilanz Vorhaben
- Umweltauswirkungen von Energiesystemen
- Nationale Emissionsberichtserstattung zur Einordnung der Relevanz der Emissionsquellen, Stromerzeugung, Wärmegewinnung und Verkehr

Die Bearbeitung erfolgte in konkreten Arbeitsschritten:

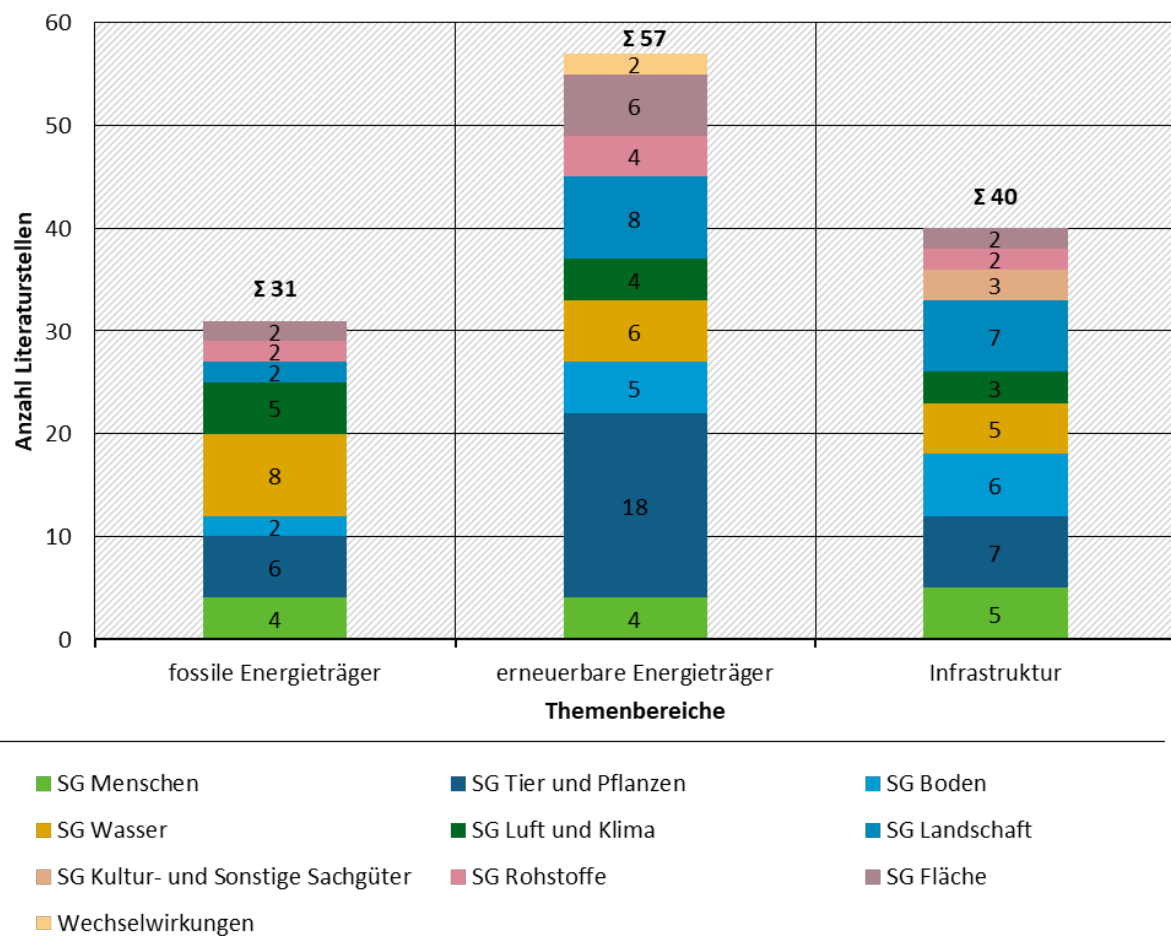
1. Identifikation relevanter Literatur
Relevanz ist dabei zu unterscheiden in:
 - a. Relevant für das Gesamtkonzept im Sinne von Ideen und Anregungen für ein gesamtes Bewertungsmodell
 - b. Relevant für einzelne Umweltdimensionen/Indikatoren im Sinne, dass verschiedene Literaturstellen Ergebnisse/ Informationen für bestimmte Einzelaspekte des Forschungsvorhabens liefern
2. Erarbeitung von Kurzsteckbriefen zu den einzelnen Literaturstellen inkl.:
 - a. Bibliographischer Angaben (Autoren, Jahr etc.)
 - b. Kurzer Inhaltsangabe
 - c. Bewertung der Relevanz für das Projekt
3. Vorlage der Kurzsteckbriefe an beteiligte Facheinheiten des Umweltbundesamtes zwecks Abstimmung der Auswahl der zu analysierenden Literaturliste
4. Inhaltliche Auseinandersetzung mit den ausgewählten Literaturstellen anhand der definierten Leitfragen
5. Visualisierung der Ergebnisse der inhaltlichen Auseinandersetzung

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde zur Literaturanalyse eine Excel Mappe angelegt. Mit dem Endbericht wurde eine aktualisierte Liste versandt. (FKZ 3715 43 101 0 Literaturliste_Juni2020.xlsx) In dieser Excel Mappe sind die ausgewerteten Quellen in Zeilen hinterlegt. Die Spalten der Tabelle listen für die einzelnen Quellen verschiedene organisatorische oder inhaltliche Informationen auf.

Für jede Literaturquelle ist ein Steckbrief vorhanden, in welchem die Informationen der Exceltabelle in einer druckbaren Form aufbereitet werden.

In einer ersten Analyse wurde ausgewertet, welche Umweltaspekte bei welchen Energieträgern bislang schwerpunktmäßig untersucht wurden. Die nachfolgende Abbildung 3 zeigt eine thematische Zuordnung der ausgewerteten Literaturstellen nach Umweltauswirkung (gegliedert nach Schutzgütern (SG)) und betrachteten Energieträgern/ Infrastrukturkonzept.

Abbildung 3: In den ausgewerteten Literaturstellen adressierte Themen



Quelle: eigene Darstellung, ifeu 2020

Tabelle 1: In den ausgewerteten Literaturstellen adressierte Themen

	fossile Energieträger	erneuerbare Energieträger	Infrastruktur
SG Menschen	4	4	5
SG Tiere / Pflanzen / Bio-diversität	6	18	7
SG Boden	2	5	6
SG Wasser	8	6	5
SG Luft und Klima	5	4	3
SG Landschaft	2	8	7
SG Kultur- und Sonstige Sachgüter	0	0	3

	fossile Energieträger	erneuerbare Energieträger	Infrastruktur
SG Rohstoffe	2	4	2
SG Fläche	2	6	2
Wechselwirkungen	0	2	0
Summe Literaturstellen	31	57	40

Quelle: eigene Darstellung, ifeu 2020

Zusammengefasst lässt sich das folgende Ergebnis der Literaturanalyse formulieren:

- Auffällig viele Studien adressieren das Thema erneuerbare Energieträger in Verbindung mit dem Schutzgut Tiere / Pflanzen/ Biodiversität bzw. das Thema Windenergie mit dem Schutzgut Landschaft sowie das Thema Photovoltaik mit dem Schutzgut Rohstoffe und Fläche.
- In der bislang ausgewerteten Literatur völlig unterrepräsentiert sind bislang die Schutzgüter Kultur und sonstige Sachgüter sowie Landschaft jenseits von Fragen zur Windenergie und Übertragungsnetzen.
- Die Abbildung zeigt außerdem, dass sich mehr Studien mit den Umweltauswirkungen der erneuerbaren Energieträger als mit den Umweltauswirkungen der konventionellen Energieträger beschäftigen.

Die Ergebnisse der Literaturauswertung verdeutlichen das grundlegende Problem. Entweder liegen detailliert Untersuchungen für spezifische Fragestellungen vor, oder die inhaltliche Ebene der Studien mit eher umfassenden Ansätzen lassen keine direkte Umsetzung in Form von quantifizierbaren Indikatoren zu.

So enthält von 18 ausgewerteten Studien, die sich mit den Auswirkungen der erneuerbaren Energieträger auf das Schutzgut Tier und Pflanzen befassen, allein die Studie „Wege zur 100 % erneuerbaren Stromversorgung“ des Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) [Hey et al. 2011], Aussagen zu allen erneuerbaren Energieträgern. Wenngleich der Fokus der Studie auf den Themen Versorgungssicherheit, Kosten, und notwendige Maßnahmen im Rahmen von Szenarien mit 100% Erneuerbaren Energien liegt, so ist doch auch eine Nachhaltigkeitsbewertung verschiedener Optionen zur Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie (Kohle, Kernenergie, Windenergie, Photovoltaik, Solarthermie, Geothermie, Biomasse, Wasserkraft inkludiert. Die Bewertung beschränkt sich aber auch hier auf die recht allg. Beschreibung von Umweltauswirkungen sowie Anforderungen und Maßnahmen, diese zu reduzieren.

Ein weiteres Beispiel ist der Umweltbericht für das „Integrierte Energie- und Klimaschutzkonzept Baden-Württemberg“ (IEKK) [Pennekamp et al 2015]. Auch diese Literaturstelle bedient, was die Umweltwirkungen der versch. Systeme zur Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie angeht, eher eine hohe Flugebene. Konkrete quantifizierbare Indikatoren sind nicht enthalten, für das hier dokumentierte FE Vorhaben sind eher die methodischen Grunderwägungen zum

Systemraum und die Herangehensweisen interessant. Leider sind in der Studie nicht alle grundsätzlichen Erwägungen und Entscheidungen detailliert dokumentiert.

Auch ein Bericht mit dem Titel „Räumlich differenzierte Flächenpotentiale für erneuerbare Energien in Deutschland“ [Peters et al 2015] im Auftrag des BMWi beschränkt sich auf die Beschreibung der Flächeninanspruchnahme und Raumwirkung der EE-Sparten im Rahmen einer Flächenpotentialanalyse für EE. Die darin enthaltenen Daten sind primär für die Umweltthematik der Flächeninanspruchnahme beachtenswert.

Der Befund, dass es viele Studien zu spezifischen Umweltproblemen einzelner Technologien mit teils hohem Detailgrad gibt - aber nur wenige Studien zu Gesamtsystemen mit hinreichenden Detaillierungsgrad - ist nicht neu und wurde an anderer Stelle [Löschel et. al. 2012], [Schlomann B. et al. 2016] bereits formuliert und ist im Wesentlichen die Motivation für das hier dokumentierte Forschungsvorhaben

Konkrete Ausblicke auf ein mögliches quantifizierbares Bewertungsmodell gibt die BMWi Studie „Langfristszenarien für die Transformation der Energiewende in D – Modul U.a Ökologische Evaluierung der Szenarien“ [Franke et al., 2018]. Die Studie vergleicht unterschiedliche Szenarien bezüglich des Ausbaus der Energiewende mit Fokus auf eine möglichst kosteneffiziente Umsetzung. Verglichen wird ein Referenzszenario, welches das Auslaufen der Energiewende modelliert, mit dem Basisszenario, in dem die klima- und energiepolitischen Ziele erreicht werden. Ausgehend vom Basisszenario werden drei weitere Variationen modelliert; das Szenario „Geringerer Ausbau der Übertragungsnetze“, Szenario „Alternative regionale EE-Verteilung“ sowie das Restriktionsarmes Szenario. Innerhalb der Studie werden die ökologischen Wirkungen der Szenarien evaluiert. Um die Auswirkungen möglichst komplett abzudecken, wurde ein Katalog mit acht Kriterien entwickelt, die meist noch weitere Unterkriterien aufweisen. Untersucht wurden Klimaschutz, Luftqualität, Wasserqualität, Flächeninanspruchnahme in Deutschland und im Ausland, Flora und Fauna, Landschaftsbild und Risiko. Im Anschluss wurde geprüft, welche Schutzgüter nach dem UVPG von den unterschiedlichen Kriterien betroffen sind.

Die Studie beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit zukünftigen Umweltauswirkungen. Sie hat einen umfassenden Anspruch mit Fokus auf spezielle Umweltprobleme. Zum Teil werden für die Abbildung der Umweltwirkungen pragmatische Lösungen gewählt, da sie sich aus den im Rahmen der Szenarien-Entwicklung generierten Daten speisen lassen müssen. Eine Übertragbarkeit auf die hier vorliegende Studie ist daher nur bedingt gegeben. Das in den Langfristszenarien genutzte Modell für die Umweltbewertung kann daher nicht 1:1 für das Umweltmonitoring der Energiewende adaptiert werden.

Zusammengefasst lassen sich die in der Literaturstelle erwarteten Veränderungen in der Umweltbewertung wie folgt zusammenfassen:

- Bei den Auswirkungen auf Wasser, Boden und Luft können durch die Energiewende beispielsweise Schwefeldioxidemissionen der Kohlekraftwerke eingespart werden, jedoch entstehen durch die Verbrennung von Biomasse auch Luftschadstoffe wie Stickstoffoxide oder Staub. Der Biomasseanbau bringt außerdem Emissionen in Wasser und Boden mit sich, insbesondere erhöhte Nitratreinträge ins Grundwasser. Neben stofflichen Einträgen in Wasser, Boden und Luft sollen auch nicht-stoffliche Auswirkungen berücksichtigt werden, wie Kühlwasserentnahme oder Veränderungen des Grundwasserspiegels durch Tagebaue und Geothermie. Im Verkehrssektor können durch einen erhöhten Einsatz von Elektromobilität Emissionen eingespart werden, teilweise werden diese jedoch in den Stromsektor verlagert.

- Auch die Rohstoff- und Flächennutzung des Energiesystems soll evaluiert werden. Bei der Rohstoffnutzung geht es nicht nur um die Energieträger selbst, sondern auch um die Recyclingfähigkeit der Anlagen. Die Flächennutzung hat einen besonderen Stellenwert im Monitoring der Energiewende, da Erneuerbare Energien insgesamt mehr Fläche benötigen. Besonders der Anbau von Biomasse kann sich negativ auf die Biodiversität und Ökosystemleistungen auswirken. Durch ein Monitoring sollen flächeneffiziente Energieträger gefördert werden.
- Die Auswirkungen der Energiesysteme auf Natur und Landschaft sind divers und haben großen Einfluss auf die Akzeptanz der Energiewende. Ein Monitoring der Auswirkungen auf Tieren, Pflanzen und Landschaftsbild hilft z. B. bei der Optimierung der Standortauswahl von Windenergieanlagen an Land und auf See. Um den Schutz der Wälder zu gewährleisten, sollte außerdem die energetische Nutzung von Holz sinnvoll kontrolliert werden.
- Das Energiesystem hat verschiedene Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit. Neben den bereits thematisierten stofflichen Emissionen spielen auch Geräuschemissionen eine Rolle. Infraschall durch Wärmepumpen oder BHKWs kann sich negativ auf die menschliche Gesundheit auswirken – Windenergiekraftanlagen haben nach aktuellem Stand der Forschung eher keine oder nur geringe gesundheitliche Auswirkungen. Wichtigster Lärmverursacher des Energiesystems ist der Verkehr. Der Ausbau der Elektromobilität kann hier potenziell entgegenwirken. Des Weiteren wird empfohlen elektromagnetische Felder und potenzielle Belastungen durch Unfälle im Monitoring der Umweltauswirkungen der Energiewende zu berücksichtigen.

2.2 Diskussion verschiedener existierender Konzepte zur Umweltbewertung

Ziel der Literaturanalyse war es auch, Umweltdimensionenkonzepte bzw. Umweltbewertungskonzepte zu identifizieren, die als vielversprechend für die Bewertung der Umweltauswirkungen der Energiewende identifiziert werden können.

Im Rahmen der ausgewerteten Literatur konnten drei Ansätze von Umweltdimensionen übergreifenden Bewertungsansätzen identifiziert werden:

- Der Schutzgutansatz des UVPG
- Der Ökobilanzansatz
- Der Ansatz der Materialflussrechnung

Die ausgewählten Ansätze werden im Folgenden kurz beschrieben und soweit an dieser Stelle bereits möglich hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit für das Konzept überprüft. Zum Abschluss des Kapitels erfolgt eine Zusammenschau der Ansätze und eine Einordnung, welche Aspekte aus den einzelnen Konzepten im Rahmen eines umfassenden Monitorings genutzt werden können bzw. sollen.

2.2.1 Der Schutzgutansatz des UVPG

Die Umwelt(verträglichkeits)prüfung ist bekannt als unselbstständiger Bestandteil behördlicher Planungs- und Genehmigungsverfahren. Umweltprüfungen haben laut § 3 UVPG das Ziel, die erheblichen Auswirkungen eines Vorhabens oder einer Planung umfassend zu ermitteln, zu be-

schreiben und zu bewerten. Die UVP folgt dabei einem Schutzgutansatzes, der die gängigen naturschutzfachlichen Anforderungen und Umweltmedien erfasst und strukturiert, und um vorrangig anthropogene Aspekte ergänzt. Der Schutzgutansatz ist sehr umfassend und integriert darüber hinaus auch explizit die Ebene der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Schutzgütern.

Die Novelle des UVPG vom 20. Juli 2017 brachte hinsichtlich des Schutzgutansatzes einige Neuerungen. Somit sind die Schutzgüter des UVPG nun:

- ▶ Menschen (insbesondere die menschliche Gesundheit),
- ▶ Tiere, Pflanzen und biologische Vielfalt
- ▶ Fläche
- ▶ Boden
- ▶ Wasser
- ▶ Luft
- ▶ Klima
- ▶ Landschaft
- ▶ Kulturelles Erbe und sonstige Sachgüter
- ▶ Wechselwirkungen zwischen den Schutzgütern.

Die dem Bewertungsansatz des UVPG zugrundeliegenden Überlegungen reichen bis weit in die 1970er Jahre zurück [Jacoby 2000], Erfahrungen mit dem Instrument der UVP bestehen auf der Projektebene seit 1990. Alle seit diesem Zeitpunkt neu geplanten Infrastrukturmaßnahmen sind – sofern sie die Schwelle der UVP Pflicht bzw. Schwelle zur Pflicht der UVP Vorprüfung erreichen bereits einer UVP unterzogen.

Immanenter Bestandteil der Umweltbewertung nach dem UVPG ist die Zustandsbeschreibung der Umwelt im Planungsraum. Dies macht die Handhabung des Instrumentes Umweltprüfung auf Ebene großräumiger Planungen so schwer. Aussagen über zu erwartende Umweltwirkungen bleiben entsprechend abstrakt und werden üblicherweise in nachgeordneten Planungsebenen konkretisiert.

2.2.2 Der Ökobilanzansatz

Im Folgenden erfolgt eine kurze Beschreibung des Ökobilanzansatzes (vgl. auch [Franke, B. et al., 2018]): Die Ökobilanzmethode wurde in einem internationalen Rahmen wissenschaftlich entwickelt und in seinen Grundsätzen genormt [DIN/EN/ISO 14040ff]. Eine methodisch einwandfreie Handhabung in Einklang mit den dort formulierten Konventionen vermindert das Risiko einer fehlerhaften Anwendung der Ergebnisse. Dennoch ist auch die Ökobilanz ein Bewertungsinstrument, das nicht notwendigerweise zweifelsfreie Ergebnisse liefert, sondern ist, wie auch andere Bewertungsinstrumente, durch Übereinkünfte zu Vorgehensweisen und durch teilweise subjektive Einschätzungen geprägt.

Seit 1993 finden nationale und internationale Bemühungen statt, die Prinzipien und Grundlagen einer Ökobilanz zu normieren. Im ersten verabschiedeten Standard DIN EN ISO 14040 zu Ökobi-

lanzen wurde der methodische Ablauf der Ökobilanz festgelegt. Danach umfasst die Ökobilanz vier Elemente:

- ▶ Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen,
- ▶ Sachbilanz,
- ▶ Wirkungsabschätzung,
- ▶ Auswertung.

Der Bilanzraum der ökologischen Bilanzierung umfasst im Rahmen dieses Vorhabens den Weg aller Prozesse der Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie bis hin zur Verteilung des Stroms und der Fernwärme bis zum Verbraucher mit entsprechenden Leitungs- und Umspannverlusten. Es werden im vorliegenden Fall bei der Bewertung der Umweltauswirkungen des Energiesystems also die Kraftwerksprozesse zur Strom- und Fernwärmeerzeugung mit den unterschiedlichen Energieträgern, ebenso wie die Bereitstellung der Energieträger und die Entsorgung entstehender Abfälle bilanziert.

Im Schritt der Wirkungszuordnung werden alle Sachbilanzparameter einer **Umweltwirkungskategorie** zugeordnet. Der Schritt dient damit als Vorstufe zur übersichtlichen Bewertung und Aggregation von **Sachbilanzinformationen**.

Durch die Zuordnung der Sachbilanzparameter erhält das weitere Vorgehen eine Struktur, indem die Vielzahl der Einzelparameter aus der Sachbilanz auf wenige Umweltwirkungen bezogen wird. Man kann außerdem erkennen, ob für eine Kategorie nur wenige Informationen vorliegen und für eine andere sehr viele. Damit soll auch eine Überbewertung einzelner Kategorien vermieden werden

Der Beitrag der einzelnen Wirkungsbilanzparameter wird im Schritt der Wirkungscharakterisierung über die so genannten **Wirkungsäquivalente** bestimmt. Dabei wird ein Stoff in äquivalenten Mengen eines anderen Stoffes, z. B. die Treibhauswirkung des Methans in Wirkungsäquivalenten des Kohlendioxids, ausgedrückt.

Im Anschluss an die Wirkungszuordnung wird der Beitrag eines **Wirkungsbilanzparameters** zur jeweiligen Wirkung bestimmt. Im Grunde können dabei nur sog. Wirkungspotenziale abgeschätzt werden. Unter **Wirkungspotenzial** ist zu verstehen, dass ein Stoff zu einer negativen Umweltwirkung möglicherweise in einem bestimmten Ausmaß beiträgt. Eine Schädigung kann in den meisten Fällen nicht durch Kausalbeziehungen aus dem systemanalytischen Instrument Ökobilanz selbst abgeleitet werden. Ebenso ist eine Wirkungsaggregation nicht bei allen Kategorien möglich. Dafür ist vielmehr auf der Basis von hypothesengeleiteten Ansätzen eine Untersuchung von Fallbeispielen erforderlich, in denen Kausalbeziehungen analysiert und plausibel ableitbare Wirkungszusammenhänge ermittelt werden, aus denen im Ergebnis Ursache-Wirkungshypothesen formuliert werden können.

2.2.3 Materialflussrechnung

Eine kurze, aber präzise Beschreibung der Materialflussrechnung ist [Dittrich et al. 2013, S. 6] entnommen:

„Materialflussrechnungen (Material Flow Accounting and Analysis, MFA) haben demnach ihre Wurzeln in den Material- und Energiebilanzierungen der 1970er Jahre. Ausgehend von der Einsicht, dass die gesamte menschliche Ressourcennutzung insgesamt stärkere Umweltprobleme hervorruft als einzelne toxische Substanzen, wurde in den 1990er Jahren begonnen, die gesam-

ten Materialentnahmen von Volkswirtschaften zu bilanzieren. Inzwischen ist die Methodik zur Erhebung von Materialflussrechnungen harmonisiert und methodische Leitfäden werden insbesondere von [Eurostat 2018] und der [OECD 2004] herausgegeben.

Für Materialflussrechnungen von Volkswirtschaften gelten zwei Systemgrenzen: die erste Grenze ist jene zwischen der Volkswirtschaft und der Natur, aus der Materialien entnommen werden. Die zweite Grenze ist jene zwischen verschiedenen Volkswirtschaften. In Materialflussrechnungen werden im Wesentlichen vier Typen von Materialien unterschieden:

- ▶ Biomasse
- ▶ Energieträger
- ▶ (nicht-metallische) Mineralien und
- ▶ Metalle.

Bestehen Produkte aus unterschiedlichen Materialtypen, werden sie gemäß ihres dominanten Rohstoffes der entsprechenden Gruppe zugeordnet. Alle Materialflüsse werden in Masseneinheiten (Tonnen pro Jahr) gerechnet [Eurostat 2018]. In Materialflussrechnungen werden genutzte und ungenutzte Materialentnahmen sowie direkte und indirekte Handelsflüsse unterschieden. Genutzte Materialentnahmen fließen dabei in die Produktionsprozesse der Volkswirtschaft ein, ungenutzte Materialentnahmen (wie bspw. Abraum) hingegen nicht. Direkte Handelsflüsse beinhalten das physische Eigengewicht der Ein- und Ausfuhren. Indirekte Handelsflüsse umfassen die Materialien, die zur Produktion der Handelsware im Ausland benötigt wurden, ohne in das Eigengewicht einzufließen. Es sei bereits an dieser Stelle bemerkt, dass die Quantifizierungen der ungenutzten bzw. indirekten Materialflüsse noch nicht vereinheitlicht und verschiedene diesbezügliche Fragen gegenwärtig Gegenstand wissenschaftlicher Diskussionen sind.“

2.2.4 Zusammenschau und Zwischenfazit

Der den Umweltprüfungen des UVPG zugrundeliegende **Schutzgutansatz** ist das umfassendste Bewertungsmodell, da es neben den bekannten Umweltmedien auch naturschutzfachliche Aspekte und anthropogene Aspekte wie bspw. Landschaft sowie kulturelles Erbe und sonstige Sachgüter integriert. Darüber hinaus impliziert der Schutzgutansatz auch die besondere Berücksichtigung der Wechselwirkungen unter den Schutzgütern.

Jedoch fehlt dem Schutzgutansatz die explizite Betrachtung des Themas Ressourcen. Viele Teilaspekte der Ressourcendiskussion sind in den Schutzgütern Boden und Wasser bereits enthalten. Auch das neue Schutzgut Fläche ergänzt dies sinnvoll. Doch die Thematik der Gewinnung und (möglicherweise dissipative) Nutzung nicht erneuerbarer Ressourcen, sowohl energetischer als auch nicht energetischer Natur ist kein immanenter Bestandteil des Schutzgutkonzeptes. Hier wäre eine Ergänzung notwendig, wenn die Schutzgüter des UVPG zur Klassifikation der Indikatoren herangezogen werden sollen.

Der **Ökobilanzansatz** erscheint auf den ersten Blick zielführend, da er unabhängig von lokalen Begebenheiten Umweltwirkungspotenziale berechnet. Eine tiefergehende Betrachtung zeigt jedoch, dass die gängigen Umweltwirkungskategorien des Ökobilanzansatzes primär die Umwelteffekte atmosphärischer Schadstoffe betrachten. Emissionen in Wasser und Boden werden nur unzureichend abgebildet, die Auswirkung der Flächeninanspruchnahme ist aktuell noch Gegenstand der wissenschaftlichen Diskussion. Die dadurch bedingten Wechselwirkungen auf die naturschutzfachlichen belange sind nicht in die Ökobilanzmodell integriert.

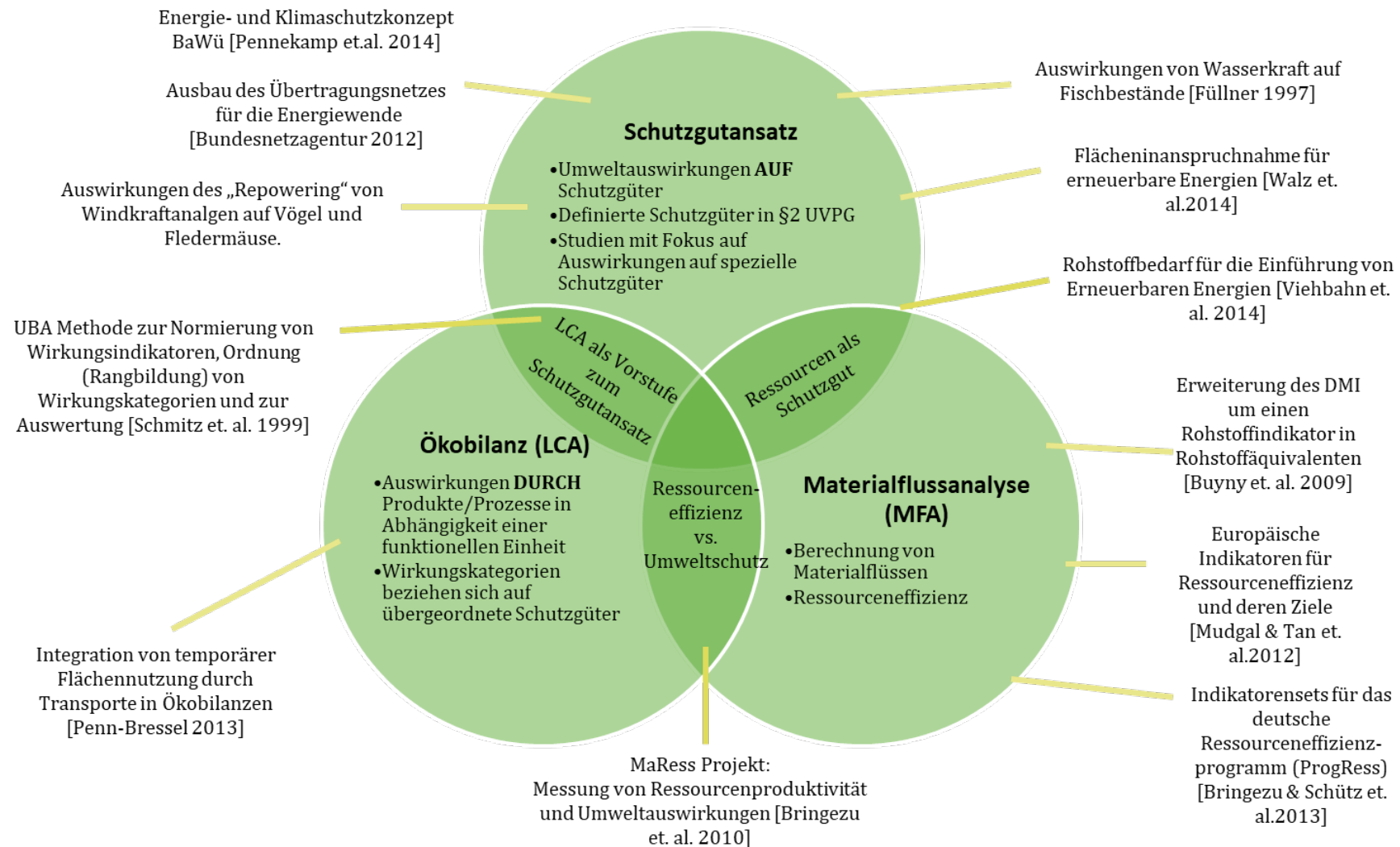
Die **Materialflussrechnung** erscheint als sinnvoller Ansatz für die Bewertung der Umweltauswirkungen der Energiewende, da die Methodik von vorneherein die nationalen Grenzen in den Blick nimmt. Doch ist die Betrachtungsebene stark auf das Thema Ressource zugeschnitten, ob eine Erweiterung um die vielfältigen Umweltthemen im Rahmen des Ansatzes möglich ist erscheint zumindest zweifelhaft.

Angesichts dieser Bewertung der unterschiedlichen Umweltdimensionenkonzepte erscheint es sinnvoll ein eigenständiges Modell zu erarbeiten, welches die positiven Aspekte der einzelnen Modelle für die zu betrachtenden Sachverhalte vereint und somit für das Monitoring der Umwelteffekte der Energiewende nutzbar macht. Die positiven Aspekte sind dabei:

- ▶ Schutzgutansatz: umfassend für alle Umweltdimensionen aber dennoch differenziert nach Schutzgütern; in der Umweltdiskussion fest integriert und allgemein verständlich
- ▶ Ökobilanzansatz: Möglichkeit der Bewertung einer Umweltwirkung ohne konkret Kenntnis bzw. räumliche Verordnung des Emissionsortes
- ▶ Materialflussrechnung: pragmatische Lösung zur Ergänzung der Ressourcenfrage, die dem Schutzgutansatz fehlt – dabei leichter operationalisierbar als eine Ökobilanz

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. stellt die Schnittmengen zwischen den verschiedenen Umweltbewertungskonzepten dar. Eine Auswahl der als relevant erachteten Literaturquellen werden nicht nur benannt, sondern auch innerhalb der Schnittmengengrafik verortet.

Abbildung 4: Schnittmengen unterschiedlicher Umweltbewertungskonzepte



Quelle: eigene Darstellung ifeu 2020

In den aufgezeigten Schnittmengen wird die Verknüpfung der drei für diese Studie relevanten Umweltbewertungskonzepten aufgezeigt. Mit Hilfe von Ökobilanzen werden Umweltauswirkungen von relevanten Prozessen bestimmt. Durch den Schutzgutansatz werden die Umweltauswirkungen dann den Schutzgütern zugeteilt. Das Umweltbewertungskonzept der Materialflussanalyse überschneidet sich mit dem Schutzgutansatz zu dessen Erweiterung durch das Schutzgut Ressourcen. Eine ausführliche Beschreibung der Funktionsweise des Umweltbewertungsansatzes für das Monitoring findet sich in Kapitel 3.

2.3 Im Rahmen der Literaturanalyse ausgewertete Datenbestände zur Darstellung von Umweltauswirkungen der Energiewende

Die Sichtung vorhandener und fortschreibbarer Datengrundlagen ist Voraussetzung für die zukünftig avisierte regelmäßige Quantifizierung der Umweltwirkungen der Energiewende.

Im Folgenden sollen die vorhandenen im Rahmen der Literaturanalyse identifizierten Datenbestände detaillierter erläutert werden, die für die Ableitung des grundlegenden Modells und der Indikatoren maßgeblichen Beitrag geleistet haben.

Umweltbezogene Berichtspflichten ergeben sich auf der Grundlage von gesetzlichen Anforderungen oder ratifizierten Abkommen, die somit den Rang einer gesetzlichen Anforderung erhalten. Dabei bestehen insbesondere für internationale Berichtspflichten in der Regel methodische Vorgaben und Berichtsstrukturen (Formate), für die ein bestimmter Datensatz in regelmäßigen Zeitabständen bereit zu stellen ist. Die Datengrundlagen heute bereits bestehender Berichtspflichten sind daher ein wesentlicher Bestandteil der Literaturanalyse, weil sie bereits das Kriterium der Quantifizierung und der Fortschreibbarkeit erfüllen.

Weiterhin geben die bestehenden Berichtspflichten eine Übersicht über die aktuell identifizierten Umweltprobleme und können somit zur Beschreibung der Umweltauswirkungen des aktuellen Energiesystems herangezogen werden (vgl. Kap. 2.4), andererseits ist im Rahmen von Kap. 4 zu prüfen in wie fern eben diese bereits bestehenden Berichtspflichten als Grundlage für mögliche Indikatoren im Rahmen des Umweltmonitorings herangezogen werden können. Dabei ist zu prüfen, inwiefern bestehende Berichtspflichten bereits die Umweltauswirkungen des Energiesystems bzw. der Energiewende abbilden.

Neben Berichtspflichten gibt es aber auch andere regelmäßig veröffentlichte Umweltdaten, die von Interesse sein können. In den folgenden Unterkapiteln werden verschiedene Berichtspflichten bzw. andere Datenquellen, deren Inhalte wesentliche Beiträge bei der Bearbeitung des hier dokumentierten F&E Vorhabens geleistet haben hinsichtlich ihrer Verwertbarkeit für die Umweltbewertung der Energiewende beschrieben.

2.3.1 Berichtspflichten zu atmosphärischen Emissionen

Bekanntestes Beispiel für Berichtspflichten zu atmosphärischen Emissionen ist die Treibhausgasberichtserstattung auf Basis der UN-Klimarahmenkonvention und des Kyoto Protokolls. Letzteres ist durch die EU-Verordnung 2018/1999 rechtsverbindlich geworden, ihre Durchführungsverordnung ist derzeit im Gesetzgebungsprozess. Eine Berichtspflicht für Luftschadstoffe ergibt sich aus der Genfer Luftreinhaltekonvention, der Aarhus-Konvention sowie dem Göteborg-Protokoll und der NEC-Richtlinie (EU) 2016/2284.

Die Berichterstattung zu den Protokollen der Genfer Luftreinhaltekonvention hinsichtlich der atmosphärischen Emissionen erfolgt in den nationalen NFR Tabellen (Nomenclature für Reporting) und wird seitens des UBAs gebündelt und als Zeitreihen seit dem Jahr 1990 publiziert. In der Datenbank sind Emissionsdaten von 27 Luftschadstoffen und Treibhausgasen erfasst. Die

nationalen Jahresemissionssummen für die Luftschadstoffe werden anhand von quellgruppen-spezifischen Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren bilanziert. Die Datenbank erhebt einen Anspruch auf Vollständigkeit, obgleich erfasste Quellgruppen (z. B. Anteil an der internationalen Seeschifffahrt) nicht im aus der Datenbank generierten Bericht enthalten sein müssen.

Die Aufbereitung des Zahlenmaterials erfolgt sektoral, so dass eine Zuordnung der Emissionen zu den Sektoren Energie, Industrie, Abfallwirtschaft und Landwirtschaft mit Unterkategorien möglich ist. Somit lassen sich die Emissionen auf die Sektoren der Energiewende herunterbrechen. Der Bereich der atmosphärischen Emissionen ist durch diese Daten hinreichend gut abgedeckt.

Darüber hinaus stellt das Europäische Schadstoff-Freisetzungs- und Verbringungsregister (E-PRTR, abrufbar unter <https://www.thru.de/thrude/>) in Erfüllung der Verordnung über die Schaffung eines Europäischen Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregisters und der Aarhus-Konvention anlagenbezogene Daten zu Emissionen in Wasser und Luft zur Verfügung. Hier werden in Summe 91 Schadstoffe im Register geführt, die zur Luftverschmutzung, Klimaveränderung und Gewässerbelastung beitragen. Das Register wird mit Daten aus Emissionsmessungen und -berechnungen gespeist, ist aber nicht vollständig, da Emittenten je nach Tätigkeiten erst ab einem bestimmten Schwellenwert berichten.

Prinzipiell adressieren die Berichtspflichten atmosphärischer Emissionen nur die Emissionsseite, die Aussagekraft der darin enthaltenen Informationen bleibt also beschränkt. Da zwischen den berechneten oder gemessenen Emissionen und gemessenen Immissionen nur in wenigen Fällen ein direkter empirischer Zusammenhang besteht, wird nicht einmal eine hinreichende Beschreibung für die Luftqualität erreicht. Grundsätzlich ist der Zusammenhang zwischen Emissions- und Immissionskonzentrationen komplex und abhängig von Faktoren wie der Meteorologie, chemischer Umwandlung in der Atmosphäre und der Topografie. Deshalb ist für eine mechanistische Analyse eine atmosphärische Modellierung unter besonderer Berücksichtigung chemischer Umwandlungsprozesse wünschenswert. Diese ist jedoch sehr aufwändig und benötigt umfangreiche Inputdaten⁴.

Kurzinfo Berichtspflichten zu atmosphärischen Emissionen

Was ist der Inhalt der Datenquelle? - Jährliche Emissionsdaten für 27 Luftschadstoffe.

Wer erstellt/ publiziert für wen? - Das UBA erstellt und publiziert die Daten zur Erfüllung von Berichtspflichten aus internationalen Abkommen zur Luftreinhaltung.

Wie oft werden die Daten aktualisiert? – jährlich.

Wofür sollen die Daten im Vorhaben verwendet werden? - Die Daten liefern Informationen zur Abbildung der Luftschadstoffe aus dem Energiesystem.

2.3.2 Critical Loads

Das Thema der Deposition von Luftschadstoffen und die damit verbundenen Auswirkungen auf Böden und Gewässer ist in vielen wissenschaftlichen Publikationen untersucht worden. An dieser Stelle ist insbesondere das **Critical Loads Konzept** zu benennen, welches die ökologischen Belastungsgrenzen der Umwelt gegenüber Stickstoffeinträgen und versauernden Einträgen bemisst. Die jährliche Überschreitung der Critical Loads (Einheit ist Kilogramm pro Hektar und

⁴ UBA Wien, 2008: REPORT REP-0135 - Auswirkungen der NO₂-Emissionen bei Diesel-KFZ auf die Immissionsbelastung, S. 57, Wien, 2008

Jahr) wird auf Basis gerasterter Daten gem. der Genfer Luftreinhaltekonvention bilanziert. Abweichend zur Berichterstattung der Luftschadstoffe besteht für Critical Loads oder deren Überschreitungen keine formelle Berichtspflicht, noch erfolgt die Berichterstattung im Rahmen des EMEP-Protokolls. Die (freiwillige) CL-Berichterstattung erfolgt vielmehr über die wirkungsbezogenen Gruppen der UNECE-Luftreinhaltekonvention, koordiniert durch das am UBA beheimatete CCE.

Das Konzept ist weiterhin ein wesentlicher Baustein der nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt und der Nachhaltigkeitsstrategie. Seitens des UBA werden die Überschreitungen der Critical Loads als Bewertungsindikator im Rahmen der Berichtsreihe „Daten zur Umwelt“ publiziert. Sie sind bei juristischen Auseinandersetzungen⁵ anerkannter Beurteilungsmaßstab dafür, ob erhebliche Beeinträchtigungen von FFH-Gebieten durch Stickstoffdepositionen ernstlich zu besorgen sind, wobei grundsätzlich jede Überschreitung der Belastungsgrenzen als erheblich anzusehen ist.

Kurzinfo Critical Loads Konzept

Was ist der Inhalt der Datenquelle? – Berechnung und Berichterstattung von versauernden und eutrophierenden Einträgen in Böden und Gewässer.

Wer erstellt/ publiziert für wen? – Das UBA erstellt und publiziert die Daten auf freiwilliger Basis.

Wie oft werden die Daten aktualisiert? – jährlich.

Wofür sollen die Daten im Vorhaben verwendet werden? – Die Daten liefern Informationen zur Abbildung der Umweltauswirkungen auf Böden und Gewässer aus dem Energiesystem.

2.3.3 Daten zur Umwelt

Der UBA Bericht „Daten zur Umwelt“ bzw. der gleichnamige Internetauftritt ist keine formelle Berichtspflicht vergleichbar mit den nationalen Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen, sondern stellt mehr eine Zusammenschau ausgewählter Indikatoren dar, die den Zustand der Umwelt in Teilen beschreiben und leitet sich eher aus den Aufgaben des UBA gem. UBA-Errichtungsgesetz, §2, Abs.1, Satz (2) ab. Insgesamt werden 50 Indikatoren in 11 Gruppen zusammengestellt. Die Datengrundlagen wurden größtenteils in anderen Zusammenhängen erhoben und für die „Daten zur Umwelt“ übersichtlich neu zusammengestellt.

Die Indikatoren in dieser Liste gehen weit über die direkte Ebene der messbaren Emissionen hinaus und adressieren in weiten Teilen schon die Ebene der direkten und indirekten Umweltwirkungen (Immissionen und Wechselwirkungen, Bsp.: Eutrophierung). Neben klassischen Umweltkategorien sind auch Informationsgrößen und monetäre Indikatoren in das Konzept integriert.

Kurzinfo Daten zur Umwelt

Was ist der Inhalt der Datenquelle? - Verschiedene Indikatoren (50 Stk. in 11 Gruppen) zur Darstellung des Umweltzustand in Deutschland

⁵ Vgl. https://www.kremer-werner.de/images/2015-11-25_VG_Urteil_HMA_Schenkenhorst_anonymisiert.pdf

Wer erstellt/ publiziert für wen? - Das UBA erstellt und publiziert die Daten zur Information einer interessierten Öffentlichkeit.

Wie oft werden die Daten aktualisiert? – jährlich.

Wofür sollen die Daten im Vorhaben verwendet werden? - Die Daten sollten ursprünglich als Benchmark für den Umweltzustand herangezogen werden und somit eine weitere Bewertungsstufe für die indikatorenbasierte Umweltbewertung des hier ausgearbeiteten Monitorings darstellen. Dieses Ansatz wurde jedoch im Rahmen der fortschreitenden Projektbearbeitung verworfen. Darüber hinaus liefert der Bericht „Daten zur Umwelt“ aber einen Beitrag für die Ableitung der Methodik des Monitoringkonzepts.

Die „Daten zur Umwelt“ finden an dieser Stelle Erwähnung, weil sie von allen regelmäßigen Publikationen den Anspruch an eine umfassende Beschreibung des Umweltzustandes am weitesten erfüllen. Zwar lässt die Aufbereitung der Indikatoren im Bericht keine dezidierten Rückschlüsse auf die für die Energiewende relevanten Sektoren zu, doch die entsprechenden Internetseiten des UBA stellen teilweise detailliertere Datentabellen zum Download bereit, die eine weitere Verarbeitung zulassen, jedoch nicht für alle betrachteten Indikatoren. Bei fehlender Datenveröffentlichung werden die Daten aber in der Regel auf Anfrage bereitgestellt.

2.3.4 Energiedaten der AGEB Daten und der AGEE-Stat

Die Zahlenwerke der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) und der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) sind keine umweltbezogenen Daten. Dennoch sind die darin enthaltenen Informationen wichtig und hilfreich für die fortlaufende Beschreibung des Energiesystems. Die Daten der AGEB sind mit Blick auf die fossilen Energieträger umfassend. Für die erneuerbaren Energieträger sind die Daten AGEE-Stat maßgeblich. Im Rahmen eines möglichen Monitorings für die Umweltauswirkungen der Energiewende kommen den Daten der AGEB und der AGEE Stat die Rolle so genannter „Aktivitätsdaten“ zu. Bestimmte, aus der Literatur ermittelte Umwelteffekte einzelner Konzepte zur Erzeugung oder Umwandlung von Energie lassen sich – unter Berücksichtigung spezifischer Aspekte - somit über die Größe Energieträgereinsatz oder erzeugte Energie auf die Gesamtsituation im jeweiligen Berichtsjahr skalieren.

Auch sind die Daten der AGEB und der AGEE-Stat Basisdaten für die Beschreibung des Energiesystems im Monitoringbericht zur Energiewende Energie der Zukunft. Um die Anschlussfähigkeit des Umweltmonitorings an diese Berichte sicherzustellen, sollten hier die gleiche Datenquelle genutzt werden.

Kurzinfo AGEB

Was ist der Inhalt der Datenquelle? - Energiebilanz für Deutschland.

Wer erstellt/ publiziert für wen? - Erstellt und publiziert werden die Daten von der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. zur Information einer interessierten Fachöffentlichkeit.

Wie oft werden die Daten aktualisiert? – jährlich.

Wofür sollen die Daten im Vorhaben verwendet werden? - Die Daten liefern Informationen zum Energieeinsatz in definierten Teilen des Energiesystems und sind im Monitoringkonzept teilweise Grundlage für eigene Berechnungen.

Kurzinfo AGEE Stat

Was ist der Inhalt der Datenquelle? - Statistik der erneuerbaren Energien.

Wer erstellt/ publiziert für wen? - Die Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) besteht aus Vertretern von Ministerien und Bundesbehörden. Sie erstellen und publizieren Daten zum Stand und zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland zur Information einer interessierten Fachöffentlichkeit.

Wie oft werden die Daten aktualisiert? – jährlich.

Wofür sollen die Daten im Vorhaben verwendet werden? - Die Daten liefern Informationen zum Energieeinsatz in definierten Teilen des Energiesystems und sind im Monitoringkonzept teilweise Grundlage für eigene Berechnungen.

2.3.5 DESTATIS Fachserien

Das statistische Bundesamt ist eine dem Innenministerium nachgeordnete Bundesbehörde. Ihre Aufgabe ist das Erheben, Sammeln und Analysieren statistischer Informationen. Die Einrichtung und der Aufgaben des Statistischen Bundesamtes erfolgen gemäß §§ 2 und 3 des Gesetzes über die Statistik für Bundeszwecke (Bundesstatistikgesetz – BStatG) vom 22.1.1987.

Im Rahmen des Vorhabens wurden zwei Fachserien intensiver betrachtet. Zum einen wurde die Fachserie 3 Reihe 5.1 (Land- und Forstwirtschaft, Fischerei - Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung) zur Ermittlung möglicher Flächenbelegungen analysiert. Die Statistik dokumentiert die Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung. Im Rahmen der Erhebung wird das Amtliche Liegenschaftskataster-Informationssystem ALKIS® zum Stichtag 31.12.2018 ausgewertet. Die Fachserie erscheint jährlich.

Zum anderen wurde die Fachserie 19, Reihe 2.2, Erhebung der nichtöffentlichen Wasserversorgung und nichtöffentlichen Abwasserbeseitigung zur Bemessung möglicher Wassernutzungen und Wassereinleitungen analysiert. Diese Publikation dokumentiert Zahlen zur Wassergewinnung, Fremdbezug von Wasser, ungenutztes Wasser, betriebliche Wasserverwendung, Abwasseraufkommen sowie Abwasserverbleib und -behandlung. Dabei werden die Bereiche Wassergewinnung/-einsatz, Behandlung und Verbleib nach Ländern, Wirtschaftszweigen bzw. Größenklassen des betrieblichen Wasseraufkommens und Flussgebietseinheiten unterschieden. Die Fachserie erscheint bislang alle drei Jahre, wobei der Turnus in Zukunft auf zwei Jahre verkürzt wird.

Kurzinfo DESTATIS Fachserien

Was ist der Inhalt der Datenquelle? - Daten zur Flächennutzung und zur nichtöffentlichen Wasserversorgung und nichtöffentlichen Abwasserbeseitigung (Fachserie 19 Reihe 2.2).

Wer erstellt/ publiziert für wen? - Das statistische Bundesamt erhebt und publiziert die Daten aufgrund der Verpflichtungen des BstatG.

Wie oft werden die Daten aktualisiert? - Fachserie 3 erscheint jährlich, die Fachserie 19 Reihe 2.2 zweijährig.

Wofür sollen die Daten im Vorhaben verwendet werden? - Die Daten liefern Informationen zur Abbildung der Flächenverbräuche und sollen Eingang in die Bewertung von Emissionen in Wasser finden.

2.3.6 Umweltökonomischen Gesamtrechnungen (UGR)

In der Umweltökonomischen Gesamtrechnungen (UGR) werden die Zusammenhänge zwischen wirtschaftlichen Aktivitäten und der Umwelt statistisch dargestellt. Die Ergebnisse der UGR dienen der „Beurteilung und Gestaltung einer am Nachhaltigkeitsziel orientierten Umweltpolitik sowie als Basis für wissenschaftliche Analysen und Modellrechnungen“ [Destatis 2010]. Die UGR beinhaltet neben Material- und Energieflussrechnungen auch Aussagen zum Umweltzustand und zu Nachhaltigkeitsindikatoren sowie zu Umweltschutzmaßnahmen. Die Aufstellung der UGR ist formaljuristisch im Bundesrecht verortet. In §1 BstatG ist festgelegt, dass durch die Ergebnisse der Bundesstatistik „gesellschaftliche, wirtschaftliche und ökologische Zusammenhänge“ aufgeschlüsselt werden. Nach § 3, Abs. 1, Ziff. 7 BStatG sind „Volkswirtschaftliche und sonstige Gesamtsysteme für Bundeszwecke aufzustellen sowie für allgemeine Zwecke zu veröffentlichen“.

Die UGR liegt seit dem Jahr 1994 ohne Brüche für den Bilanzraum Deutschland vor. Die UGR wird jährlich publiziert wobei im Rhythmus von jeweils 2 Jahren immer ein detaillierter Bericht und ein kurzer Eckdatenbericht veröffentlicht werden.

Die UGR nutzt vor allen Daten, die in anderen umwelt- und wirtschaftsstatistischen Erhebungen ermittelt werden. Wo immer diese Basisstatistiken keine vollständige Gesamtheit abbilden, werden ergänzende Schätzungen vorgenommen. Zentraler Bestandteil der UGR sind die monetären In- und Output-Tabellen (MIOT) der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung (VGR). Auf Basis der MIOT werden die physischen In- und Output-Tabellen (PIOT) erstellt, aus denen das gesamtwirtschaftliche Materialkonto abgeleitet wird. Dieses Materialkonto benennt die Gesamtheit der Entnahmen von Material und Abgabe von Material an die Umwelt nach Materialien in der Einheit der metrischen Tonnen.

Die UGR unterscheidet verschiedene Darstellungseinheiten. Zum einen physische Größen wie Energie, Rohstoffe, Wasser/ Abwasser aber auch Emissionen und Abfälle. Zum anderen werden auch monetäre Größen ausgewiesen. Die Ergebnisse der UGR werden nach Umweltbereichen (Luftreinhaltung, Abfallwirtschaft, Lärmbekämpfung, Naturschutz etc.) und Produktionsbereichen sowie privaten Haushalten unterschieden.

Hauptnutzer der UGR sind die Bundesregierung (insbesondere das BMU), das Umweltbundesamt sowie Forschungsinstitute und Universitäten aber auch internationale Organisationen wie Eurostat und OECD.

Kurzinfo UGR

Was ist der Inhalt der Datenquelle? - Material- und Energieflussrechnungen zur Darstellung des Umweltzustandes und zur Ableitung von Nachhaltigkeitsindikatoren sowie Umweltschutzmaßnahmen.

Wer erstellt/ publiziert für wen? - Das statistische Bundesamt stellt die Daten aus vorhandenen Statistiken zusammen als Grundlage für die Beurteilung und Gestaltung einer am Nachhaltigkeitsziel orientierten Umweltpolitik.

Wie oft werden die Daten aktualisiert? – jährlich.

Wofür sollen die Daten im Vorhaben verwendet werden? - Die Inhalte der UGR finden im Rahmen des Vorhabens insbesondere Verwendung bei der Ressourcendiskussion.

2.4 Beschreibung der aktuellen Umwelteffekte des deutschen Energiesystems

Auf Basis der durchgeführten Literaturanalyse lässt sich eine grobe Übersicht über die möglichen Umweltauswirkungen der im deutschen Energiesystem vorhandenen unterschiedlichen Konzepte zur Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie und Energieinfrastrukturen beschreiben. An dieser Stelle sollen nur die bislang identifizierten und in der Literatur beschriebenen Umwelteffekte dokumentiert werden. Eine dezidierte Bewertung im Sinne des hier betrachteten Umweltmonitorings der Energiewende wird in Kapitel 5 vorgenommen.

2.4.1 Umweltauswirkungen der Strom- und Fernwärmeerzeugung

Zum System der Strom- und Fernwärmeerzeugung gehören alle Anlagen, in denen aus fossilen, nuklearen oder erneuerbaren Energieträgern Strom und/oder Wärme in öffentliche Netze eingeleitet werden. Auch die Netze gehören mit zum System. In einem erweiterten Ansatz können auch die Umweltauswirkungen der Förderung bzw. des Anbaus und der Aufbereitung der Energieträger national und international betrachtet werden.

Das System der Strom- und Fernwärmeerzeugung in Deutschland war jahrzehntelang geprägt von Groß(feuerungs)anlagen. Somit sind die wesentlichen Umweltauswirkungen der aktuellen und vergangenen Strom- und Fernwärmeerzeugung auch primär die Umweltauswirkungen der Großfeuerungsanlagen. Die spezifischen Umweltauswirkungen der einzelnen Kraftwerke sind abhängig von Standort des Kraftwerks, der Größe und der Technologie sowie der spezifischen Vor- und Zusatzbelastung am – ggf. weiter vom Kraftwerk entfernten – Ort der Immission und Deposition⁶. Dennoch lassen sich gewisse Trends ableiten, die bei der Umweltbewertung aller Feuerungsanlagen eine Rolle spielen.

Allen voran sind die Auswirkungen der mit fossilen bzw. nachwachsenden Rohstoffen befeuerten Kraftwerke auf das globale Klima durch die Emission von Treibhausgasen zu nennen. Dies ist eines der vordringlichsten Umweltprobleme der deutschen Energiewirtschaft, zumal die Umwelteffekte internationaler Natur sind (Daten zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen sind im nationalen Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar rückwirkend bis zum Jahr 1990 einsehbar [UBA 2019c]). Aufgrund der Leistungsbeschreibung gehören die Effekte durch Treibhausgase nicht in das hier dokumentierte F&E Vorhaben und werden daher an dieser Stelle auch nicht weiter betrachtet. Der Fokus des Vorhabens liegt auf den „anderen Umweltaspekten“. Des Weiteren erfolgt die Hauptauswirkung der Großfeuerungsanlagen durch Emissionen über den Luftpfad. Bei der Verbrennung werden, in Abhängigkeit der Energieträger, verschiedene Luftschadstoffe in unterschiedlichen Mengen und Konzentrationen freigesetzt. Diese werden zum Teil durch Minderungstechniken, wie z.B. eine Rauchgasaufbereitung zurückgehalten und mit den verbleibenden Mengen über den Rauchgasabzug in die Atmosphäre abgeleitet (die Differenzen zwischen den verschiedenen Feuerungsanlagen sind in einer alten – aber für den reinen Zweck des Vergleichs dennoch aussagekräftigen Quelle wie bspw. [Fritsche et. al. 1989] ersichtlich). Je nach Luftschadstoff und Volumen des Rauchgases, sowie der Höhe des Auslasses und den meteorologischen Ausbreitungsbedingungen werden die Emissionen mehr oder weniger großräumig verteilt.

Die Liste an für Mensch und Umwelt relevanten Luftschadstoffen ist lang und die damit verbundenen Auswirkungen vielfältig (European Environment Agency, Air Quality in Europe [EEA 2016, 2017, 2018, 2019]). Durch die Höhe der Kamine wird i.d.R. ein Verdünnungseffekt bei der

⁶ Flächenverbräuche und Strahlenbelastungen eher am Standort der Kraftwerke, Umwelteffekte durch Luftschadstoffemissionen z.T. in deutlicher Entfernung (Stichwort: Saurer Regen).

Konzentration der Schadstoffe in der Luft erzielt, dafür wirken die Luftschadstoffe in der Regel nicht nur lokal begrenzt, sondern rufen zumindest regionale, teilweise auch überregionale Umweltauswirkungen durch Beeinträchtigungen der Atemluft und der Schadstoffdeposition in Böden und Gewässern (Nährstoffeinträge, Versauerung etc.) hervor.

Weitere relevante Umweltauswirkungen entstehen durch die direkten Flächenbelegungen im Zusammenhang mit den Infrastrukturmaßnahmen zur Erzeugung und Verteilung von Strom und Fernwärme. Als Hauptproblem ist an dieser Stelle nicht der Flächenbedarf der ca. 230 fossil befeuerten Kraftwerksstandorte in Deutschland zu werten (im Jahr 2016 betrug nach Angaben des statistischen Bundesamtes die Summe aller Betriebsfläche ohne Abbauland lediglich 2,1% der gesamten Siedlungs- und Verkehrsfläche in Deutschland). Vielmehr stehen die fast 26.000 Windenergieanlagen und die 25.000 km Trassenlänge für Übertragungsnetze sowie 350.000 km Trassenlänge für Verteilnetze mit ihren in Summe schätzungsweise 230.000 Masten im Fokus der öffentlichen Wahrnehmung (alle Zahlen aus [Franke et. al. 2018]). Hier ist aber zu bedenken, dass es neben der eigentlichen vornehmlich punktuellen Flächeninanspruchnahme auch Nutzungseinschränkungen in den Abstandsflächen, insbesondere von Windenergieanlagen [Peters et.al. 2015] und Überlandleitungen [50 Hertz 2012] gibt, insofern muss dieser Punkt differenziert betrachtet werden. Weitestgehend unter Ausschluss der öffentlichen Wahrnehmung ist hingegen der regional punktuelle aber dennoch teilweise großflächige Eingriff durch Flächeninanspruchnahme / Nutzung des unterirdischen Raums bei der Gewinnung der fossilen und nuklearen Energieträger, sowie der Biomasse im In- und Ausland. Insbesondere der Berg- und Tagebau (als Grube oder Mountaintop-Removal – zu Deutsch: „Bergbau durch Gipfelabsprengung“) ist hier zu bedenken und hinsichtlich seiner Umweltauswirkungen anzuführen.

Die weiteren Emissionen von Lärm, Licht, Wärme und Strahlung sind in ihrer Wirkung vor allem von lokaler Bedeutung, stehen nach Auswertung der vorhandenen Literatur bei der überschlägigen Beurteilung der Umweltauswirkungen der Strom- und Fernwärmeerzeugung nicht so sehr im Fokus – sollen aber bei der Ableitung der Indikatoren für das Monitoring keinesfalls unterschlagen werden.

Hinsichtlich des Unfallrisikos sind allen voran die Kernkraftwerke und die damit verbundenen Risiken zu benennen. Auch birgt der Berg- und Tagebau für die dort arbeitenden Menschen ein erhöhtes Unfallrisiko, welches im Zusammenhang mit den Energieträgervorketten zu diskutieren ist. Ein weiteres Risiko insbesondere für die Avifauna geht wiederum von den Windenergieanlagen und den Freileitungen aus. Für die aquatische Fauna und Flora sind neben thermischen Belastungen durch Kühlwassereinträge und der Schadstoffbelastung insbesondere die Unfallrisiken durch die ungewollte Passage von Laufwasserkraftwerken zu nennen. Außerdem ist das Risikopotenzial von Biogasanlagen zu nennen, die Aufgrund des Umgangs mit entzündbaren Gasen in großen Mengen ein gewisses Explosionsrisiko haben. Dabei ist zu beachten, dass im Falle einer Explosion neben der Freisetzung von klimaschädlichem Methan in großen Mengen auch erhebliche Volumina allgemein wassergefährdender Stoffe in Form von Gülle, Substraten oder Gärresten in die Umwelt gelangen können [UBA 2019d].

2.4.2 Umweltauswirkungen des Verkehrs

Der Sektor Verkehr umfasst im Rahmen der Systemraumdefinition der Energiewende grundsätzlich nur den Energieeinsatz in den verschiedenen Fahr- und Flugzeugen. Insofern werden in diesem F&E Vorhaben auch nur Umweltauswirkungen aus dem Sektor Verkehr berücksichtigt, wenn es sich um Umweltwirkungen aus dem Einsatz von Energieträgern handelt: sprich luftgetragene Schadstoffe und deren Wirkungen sowie die Emission von Geräuschen aus den Motoren und die Abgabe von Verbrennungswärme in die nahe Umgebung.

Die weitaus größte Energiemenge im Verkehr wird für den Straßentransport von Personen und Gütern aufgewendet. Dabei handelt es sich vor allem um die Verbrennung von Mineralölen (Diesel und Benzin aber auch Kerosin und Schiffskraftstoffe).

Somit werden die Umweltauswirkungen des Verkehrs insbesondere durch die Luftschadstoffemissionen aus dem Auspuff der Pkw, Lkw und Busse in Deutschland hervorgerufen. Diese Luftschadstoffe werden – bauartbedingt – bodennah freigesetzt und unterliegen somit vollkommen anderen Ausbreitungsbedingungen als die Luftschadstoffe der Großfeuerungsanlagen. Somit haben die direkten Umwelteffekte der Verkehrsemissionen erst einmal einen stärkeren Einfluss auf die lokale Umgebung der Emissionsquelle als dies bei den Großfeuerungsanlagen der Fall ist (vgl. u.a. [EAA 2019]). Jedoch haben die Stickoxidemissionen aus dem Verkehr sowohl als Bindungspartner bei der sekundären Feinstaubbildung als auch als an der Ozonbildung beteiligte Komponente einen deutlichen regionalen und überregionalen Einfluss. Sie bleiben daher keinesfalls nur auf die lokale Umgebung der Emissionsquelle beschränkt. Im Fokus der Diskussion um die Umweltauswirkungen der Abgase aus Verbrennungsmotoren stehen insbesondere die gesundheitsschädlichen Auswirkungen. Die Umweltauswirkungen der vorhandenen und zukünftigen Elektromobilität (neben E-Autos auch alle elektrifizierten Eisenbahnen etc.) sind – aufgrund der Systemabgrenzung, dass nur die energieseitigen Umweltauswirkungen betrachtet werden – der Stromerzeugung zuzurechnen.

Weitere zu betrachtenden Umweltwirkungen ergeben sich aus der Geräuscentwicklung der Verbrennungsmotoren. Diese sind jedoch nur bei geringen Geschwindigkeiten maßgeblich für die Lärmbelastung durch den Straßen- und Bahnverkehr. Im Straßenverkehr dominieren die Abrollgeräusche der Reifen, im Bahnverkehr stehen die Rollgeräusche im Vordergrund. Beim Flugverkehr hingegen sind es insbesondere die Geräusche der Turbinen für die Schallemissionen beim Start ursächlich. Immerhin 42% der Bundesbürger fühlen sich von Fluglärm beeinträchtigt, 5 % stark und 3% äußerst beeinträchtigt⁷.

2.4.3 Umweltauswirkungen der dezentralen Raumwärme/ -kälte in Haushalten und GHD

Die Energiewende umfasst auch den Bereich der Raumwärme, bzw. der Raumkälte. Dazu gehören alle Anlagen in den privaten Haushalten und Räumlichkeiten von Gewerbe-, Handwerks- und Dienstleistungsbetrieben. Konkret sind hier vor allem Heizungsanlagen auf der Basis der Energieträger Öl, Gas, Kohle oder nachwachsender Rohstoffe zu verstehen, aber auch Industriekraftwerke und Industriekesselanlagen. Entsprechend entstehen die großen Umwelteffekte der dezentralen Raumwärme auch durch die Verbrennung von Öl, Gas und Holz/ Holzprodukten in diesen Kleinfeuerungsanlagen. Die Umweltwirkungen der zentralen Bereitstellung leitungsgebundener Fernwärme sowie elektrischer Energie als Energieträger zur Erzeugung der Raumwärme oder -kälte werden im Rahmen dieses Vorhabens dagegen nach dem Verursacherprinzip dem der öffentlichen Versorgung zugerechnet. Allen Verbrennungsprozessen gemein ist, dass die Emissionen an Luftschadstoffen über den Hauskamin abgeleitet werden. Dieser ist zwar nicht so nah am Boden wie der Auspuff eines Fahrzeuges, dennoch gilt die Schadstofffreisetzung als bodennah, die Auswirkungen auf die Atemluft sind daher sowohl lokal als auch regional und überregional relevant.

Ein weiterer Umweltaspekt ergibt sich durch die Nutzung der Umweltwärme, insbesondere Erdwärme. Hier stehen zwei potenziell Umweltwirkungen im Vordergrund, erstens die durch den Wärmeaustag indizierte Temperaturveränderung im Boden mit potenziellen Auswirkungen

⁷ vgl.: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/laermwirkung/laermbelaestigung>

auf die Bodenfunktion und Bodenlebewesen und zweitens die potenziellen Umweltrisiken im Falle einer Leckage der Wärmeleitungen [Eggeling & Schneider in Bauer et al. 2018].

2.4.4 Umweltauswirkungen der Energievorketten

Den Sektoren öffentliche Versorgung, Eigenversorgung und Verkehr werden die Umweltauswirkungen des jeweiligen Energieeinsatzes zugeordnet. Doch auch mit der Förderung bzw. dem Anbau und der Aufbereitung der Energieträger gehen Umweltlasten einher. Diese werden als Vorketten bezeichnet. In diesem Sektor werden die Umweltauswirkungen der Förderung von Kohle, Erdöl und Erdgas und deren Umwandlung in Raffinerien zu Heizöl, Stadtgas aber auch Treibstoffen (Benzin, Diesel, Kerosin), des Uranabbaus sowie die Umweltauswirkungen der Anbaubiomasse (z.B. Nitratbelastung und Ammoniakemissionen) und der Holzwirtschaft subsumiert. Entsprechend weit ist auch das Feld der möglichen Umweltauswirkungen. Die Frage nach den nationalen und internationalen Umweltauswirkungen spielt in diesem Sektor eine besondere Rolle, denn lediglich ein Drittel der benötigten Primärenergieträger werden in Deutschland gefördert [AGEB 2020]⁸. Die Mehrzahl wird importiert, die mit der Förderung der Energieträger verbundenen Umweltlasten liegen somit außerhalb der Staatsgrenzen. Was im Rahmen dieses Vorhabens betrachtet wird, sind aktuell vor allem die Umweltwirkungen der Braunkohleförderung, der Tiefengeothermie und des Biomasseanbaus sowie die „Altlasten“ der Steinkohleförderung und die Umweltproblematik der Endlagerung der Abfälle aus der zivilen Nutzung der Kernkraft.

Primär werden zu diesen Themen die Umweltauswirkungen durch die Flächeninanspruchnahme bzw. die Änderung der möglichen Flächennutzung betrachtet. Eine dezidierte Betrachtung der summierten Flächeninanspruchnahme durch den deutschen Braunkohletagebau zeigt, dass trotz fallender Fördermengen der Flächenbedarf weiterhin steigend ist [Franke et al., 2018].

Dies ist bedingt durch die zunehmenden Flächen zur Nachnutzung im Zuge der Rekultivierung. Die Betriebsflächen (Abbaufäche plus Nebenanlagen) nehmen hingegen ab. Auch wird der Flächenbedarf für den Anbau von Energiepflanzen in vielen Publikationen thematisiert und teils problematisiert. Daten zur Flächennutzung zeigen einerseits die Abnahme von Brachflächen (Destatis), andererseits die Zunahme von Anbauflächen z. B. für Mais, Raps, Getreide und andere Energiepflanzen. Die FNR beziffert die Fläche für den Anbau energetischer Nutzpflanzen für das Jahr 2018 auf 2,37 Mio. Hektar. Ein kausaler Zusammenhang zwischen den beiden Tendenzen (Abnahme von Brachflächen, Zunahme von Maisanbauflächen) lässt sich auf Basis der vorhandenen Daten nicht ableiten. Durch die Umwidmung der Flächen und die damit verbundenen Verluste an Lebensräumen sind negative Auswirkungen auf das Schutzgut Tiere, Pflanzen und biologische Vielfalt, aber auch auf den Boden selbst (durch Erosion und/oder Verdichtung) festzustellen.

Die Emissionen an Luftschadstoffen und weitere Umweltauswirkungen durch den Betrieb der Tagebaue und der Flächenbewirtschaftung sind bspw. im Rahmen der Emissionsberichtserstattung den Sektoren Industrie bzw. Agrarwirtschaft zugeordnet. Im Vorhaben werden diese Prozesse, die der Förderung und Aufbereitung von Energieträgern dienen, daher als Vorketten mitberücksichtigt.

⁸ Auch verwendet hier: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergiegewinnung-importe>

2.5 Fazit der Literaturanalyse

Im Rahmen der Literaturanalyse waren die folgenden Fragen zu beantworten:

- **Welche Umweltauswirkungen haben die unterschiedlichen Konzepte zur Erzeugung von Energie und Energieinfrastrukturen, differenziert nach den unterschiedlichen Umweltmedien und ihrer räumlichen Bilanzgrenze?**

In der Literatur sind die verschiedenen Umweltmedien und die verschiedenen Konzepte zur Erzeugung von Energie und Energieinfrastrukturen unterschiedlich repräsentiert. Seit vielen Jahren besteht für den Bereich der Luftschadstoffe aufgrund der internationalen Konventionen ein umfassendes Berichtswesen. Aus diesen Berichten lassen sich die Umweltwirkungen der Feuerungsanlagen zur Strom- und Wärmeerzeugung sowie die Emissionen der mobilen Quellen qualitativ hochwertig ableiten. Aufgrund des Mix an Energieträgern sind somit für die vergangenen Jahre vor allem die Umweltwirkungen von Erzeugungsanlagen auf Basis fossiler Rohstoffe abgebildet. Die Umweltwirkungen erneuerbarer Energien sind in diesen Quellen nur dann integriert, wenn es sich um die thermische Nutzung erneuerbarer Energien handelt, wie bspw. Biogasmotoren, Holzfeuerungen etc.

Neben dem Bereich der Luftqualität sind auch alle Umweltwirkungen, die mit der Deposition von Luftschadstoffen und den damit verbundenen Belastungen von Böden und Gewässern einhergehen, in der Literatur hinreichend abgebildet.

Hinsichtlich der erneuerbaren Energieträger stehen in der ausgewerteten Literatur andere, zumeist standortbezogene Umweltwirkungen im Vordergrund: Flächeninanspruchnahme, Auswirkungen auf die Biodiversität, Auswirkungen auf das Landschaftsbild, etc. Diese Umweltauswirkungen werden hinsichtlich der Großfeuerungsanlagen in der Literatur eher nicht in dieser Detailtiefe erörtert. Diese Diskrepanz zieht sich durch nahezu alle Literaturstellen.

Weiterhin ist anzumerken, dass sich viele Studien detailliert mit ausgewählten Umweltauswirkungen spezifischer Anlagen zur Erzeugung bzw. Umwandlung und Verteilung von Energie beschäftigen und nur wenige Studien versuchen ein eher umfassendes Bild des Energiesystems zu beschreiben, dabei jedoch eher auf einer abstrakten Ebene bleiben (z.B. [Pennekamp et al 2014]).

- **Welche Konzepte gibt es bislang in der Literatur, die eine umfassende Umweltbewertung ermöglichen?**

Die ausgewerteten Literaturstellen folgen meist keinem stringenten Konzept für die Erfassung und Bewertung der Umweltwirkungen, sondern fokussieren sich auf einzelne Teilbereiche. Wo eine umfassende Analyse der gesamten Umweltwirkungen des Energiesystems versucht wird, ist die Auswahl und Beschreibung der Wirkungen entweder erratisch (bspw. [BMWi 2018a]) oder orientiert sich am Schutzgutansatz des UVPG [Franke et al. 2018] sowie in Teilen [Pennekamp et al 2015]) bleibt jedoch in Teilen unvollständig.

Im Vergleich verschiedener Umweltdimensionenkonzepte ist der Schutzgutansatz der umfassendste und auch derjenige mit der breitesten Akzeptanz bei der intendierten Zielgruppe des Umweltmonitorings der Energiewende. Es ist jedoch für die weitere Bearbeitung des Vorhabens festzuhalten, dass es nicht geplant ist eine Umweltverträglichkeitsprüfung oder strategische Umweltprüfung für die Energiewende durchzuführen. Vielmehr dient das Schutzgutkonzept als Instrument für die Auswahl und Klassifizierung der zu erarbeitenden Indikatoren. Eine Strukturierung der Umweltwirkungen anhand der Schutzgüter stellt demnach sicher, dass keine relevanten Umweltwirkungen außer Acht gelassen werden. Vor diesem Hintergrund wird das Schutzgutkonzept des UVPG für die Anwendung in diesem F&E Vorhaben um ein Schutzgut „Ressourcen“ ergänzt, um die Änderung im Ressourcenbedarf bei Fortschreiten der Energiewende ins Monitoring zu integrieren. Das Schutzgut Klima wird

im Sinne der Leistungsbeschreibung im Rahmen des Monitorings dezidiert nicht weiter betrachtet.

Der ebenso im Rahmen der Literaturanalyse erwähnte Ökobilanzansatz erscheint als Konzept zur Umweltbewertung im vorliegenden F&E Vorhaben als weniger geeignet, beinhaltet aber methodische Elemente, die bei der Entwicklung geeigneter Indikatoren Anwendung finden können (bspw. bei der Ausweisung von Umweltbelastungspotenzialen, auf Basis von Emissionen, wenn die Immissionssituation nicht zweifelsfrei auf die Quellen heruntergebrochen werden können, dazu mehr in Kapitel 4). Der Ansatz der Materialflussrechnung bietet in seiner derzeitigen Ausgestaltung nicht den Rahmen für eine umfassende Umweltbewertung, da der Fokus derzeit zu sehr auf den Ressourcen liegt.

► **Welche konkreten Messindikatoren für einzelne Umweltauswirkungen gibt es bislang in der Literatur bzw. welche von diesen Indikatoren beschreiben die Energiewende adäquat und wie ist die Datenverfügbarkeit?**

Ziel des Monitorings ist es, die jährlichen Veränderungen der Umweltauswirkungen anhand quantifizierbarer Indikatoren darzustellen. Im Rahmen der Literaturanalyse wurden verschiedene Daten, Ansätze und Indikatoren identifiziert, die dazu geeignet scheinen die Umweltauswirkungen einzelner Konzepte zur Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie und weiterer Energieinfrastrukturen auf eines oder mehrere Schutzgüter abzubilden. Konkrete Daten zur direkten Ableitung von Indikatoren für einzelne Umweltauswirkungen finden sich in der Literatur bislang vor allen Dingen für die Luftschadstoffe. Hier hat sich durch die internationalen Konventionen ein Berichtssystem etabliert, welches sich ohne größere Anpassungen zur Beschreibung des Umweltzustandes und der durch das Fortschreiten der Energiewende intendierten Änderungen eignet. Für die weiteren Aspekte liegen bisweilen Einzelindikatoren vor, die aber entweder noch eine Weiterverarbeitung benötigen oder noch in entsprechende „Denkmodelle“ zur Umweltbewertung eingepflegt werden müssen.

Ein Kritikpunkt an bereits vorhanden Studien ist zum einen die unsystematische Auswahl von Umweltwirkungen und zum anderen die stark lösungsorientierte Auswahl an Umweltfolgenbeschreibungen in Studien mit umfassenderem Bewertungsansatz. Ziel des vorliegenden F&E Vorhabens soll daher sein, in einem ersten Schritt den methodischen Rahmen aufzuspannen, den es für eine umfassende Bewertung braucht (dies wird in Kapitel 3 erfolgen). Alsdann werden die potenziell möglichen Umweltauswirkungen der Konzepte zur Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie und Energieinfrastrukturen zu betrachten (sowohl Belastungen als auch Entlastungen) und dann erst Indikatoren zu benennen sein, die dazu geeignet scheinen diese Auswirkungen numerisch auszudrücken. Das Thema der Indikatoren wird in Kapitel 4 behandelt, soweit möglich wird auf bereits in der Literatur beschriebene Indikatoren zurückgegriffen, falls nötig neue entwickelt und der jeweilige Datenbedarf für die Fortschreibung benannt.

3 Definition und methodische Beschreibung des Monitoringkonzeptes

Der jährliche Monitoringbericht *Energie der Zukunft* der Bundesregierung fokussiert auf die Ziele der Energiewende und quantifiziert bisher neben der Entwicklung der Treibhausgasemissionen keine weiteren Umweltwirkungen.

Aufgabe dieses Forschungsvorhabens ist daher die Erarbeitung quantifizierbarer Indikatoren für eine umfassende Umweltbewertung der Energiewende im Rahmen eines Umweltmonitorings. Die Ergebnisse dieses Monitorings sollen dann als Basis für Beiträge zum Kapitel Umweltwirkungen der Energiewende des Monitoringberichts zur Energiewende dienen und somit die Darstellung der Umweltwirkungen der Energiewende über die bereits bestehende qualitative Bewertung hinaus ergänzen.

Das folgende Kapitel widmet sich somit den Fragen:

- Was wird bewertet?
- Wie wird bewertet?
- Was sind die grundlegenden Rahmensetzungen der Bewertung?

3.1 Anforderungsprofil an das Monitoringkonzept

Das Monitoringkonzept soll eine in sich geschlossene umfassende Umweltbewertung der vergangenen, aktuellen und zukünftigen Konzepte zur Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie und weitere Energieinfrastrukturen ermöglichen, um die durch die Energiewende angestoßenen Transformationsprozesse einer Umweltbewertung unterziehen zu können. Dabei sollen positive wie negative Auswirkungen berücksichtigt und bewertet werden.

Die Struktur eines über viele Jahre angelegten Monitorings bedingt eine Ergebnisdarstellung in Form von Zeitreihen, um die durch den Transformationsprozess der Energiewende angestoßenen Veränderungen auf den Umweltzustand zu visualisieren. Die Notwendigkeit der Zeitreihenabbildung bedingt die Darstellung eben dieser Veränderungen des Umweltzustandes anhand von quantifizierbaren Messgrößen, den so genannten Indikatoren. Diese bilden somit das Herzstück des Umweltmonitorings der Energiewende.

Die bloße Zusammenstellung umweltrelevanter Indikatoren ermöglicht jedoch noch keine umfassende Umweltbewertung. Vielmehr braucht es ein stimmiges Konzept für Bewertung umweltrelevanter Auswirkungen – ein sogenanntes Umweltdimensionenkonzept. Dieses Konzept bildet somit den Bewertungsmaßstab auf Ebene der Umweltauswirkungen.

Die Vorgabe anhand welcher Umweltauswirkungen eine Bewertung der Energiewende erfolgt, hat wiederum Auswirkungen auf die Definition der Indikatoren. Somit reicht es nicht aus, verfügbare Indikatoren aus der Literatur zusammenzustellen und auf ihre Verwertbarkeit im Konzept zu prüfen, vielmehr werden die Anforderungen, welche Indikatoren ermittelt und quantifiziert werden müssen durch den Bewertungsmaßstab vorgegeben. Erst in einem zweiten Schritt ist zu prüfen, in wie weit diese Indikatoren mit Hilfe bestehender Berichtspflichten bedient werden können, wo Indikatoren auf Basis bestehender Daten für das Monitoring berechnet werden können oder wo mittel- bis langfristig neue Daten generiert werden müssen (sei es durch Erhebung oder Berechnung). Dieser zweite Schritt ist Inhalt des Kapitels 4.

Zusammenfassend lassen sich die folgenden Prämissen festhalten:

- ▶ Der Bewertungsansatz für das Umweltmonitoring der Energiewende muss dem Anspruch an ein umfassendes Umweltdimensionenkonzept erfüllen.
- ▶ Der Bewertungsansatz gibt vor, durch welche Indikatoren die Bewertung zu erfolgen hat.
- ▶ Die Indikatoren müssen quantifizierbar sein, da das Monitoring der Umweltveränderungen eine Abbildung in Form von Zeitreihen bedingt.

3.2 Funktionsweise des Konzepts zum Umweltmonitoring

Für eine umfassende Bewertung ist es unerlässlich, dass sich das Bewertungskonzept nicht nur auf die positiven oder die negativen Auswirkungen beschränkt, sondern beide Aspekte berücksichtigt und versucht, diese einander transparent gegenüber zu stellen, ohne sie zu verrechnen.

Die Ergebnisse der Literaturanalyse zeigen, dass der aus dem Umweltprüfungsrecht (UVPG) bekannte Schutzgutansatz derzeit das umfassendste Umweltdimensionenkonzept darstellt. Denn neben der menschlichen Gesundheit und naturschutzfachlichen Aspekten sind in diesem Konzept auch die Belange der Luftqualität sowie des Flächen-, Boden-, Gewässer- und Klimaschutzes integriert. Darüber hinaus sind mit den Schutzgütern Landschaft sowie kulturelles Erbe und sonstige Sachgüter Aspekte berücksichtigt, die den Rahmen der streng naturwissenschaftlich begründeten Bewertbarkeit verlassen. Da jedoch insbesondere der Flächenbedarf und die Beeinträchtigung des Landschaftsbildes durch Maßnahmen der Energiewende in der öffentlichen und fachlichen Debatte einen großen Raum einnehmen und somit für die Akzeptanz der Energiewende von großer Relevanz sind, erscheint es notwendig diese Aspekte in einem integrierten Bewertungskonzept zu erfassen und mit anderen Umweltauswirkungen in Relation zu setzen. Ein weiterer positiv hervorzuhebender Aspekt des Schutzgutansatzes als Umweltdimensionenkonzept ist, dass die Wechselwirkungen unter den einzelnen Schutzgütern explizit zu berücksichtigen sind. Der Schutzgutansatz des UVPG wird im Rahmen des Forschungsvorhabens um das Schutzgut „Ressourcen“ im Sinne von „Rohstoffen“ erweitert. Denn während die Ressourcen Boden (auch im Sinne von Fläche und unterirdischem Raum), Wasser, biologische Vielfalt und Ökosystemleistung im Schutzgutansatz enthalten sind, fehlen die natürlichen Rohstoffe. Vor allem die nicht erneuerbaren energetischen und nicht energetischen Ressourcen fehlen im Schutzgüterkatalog des UVPG (vgl. Positionspapier „Ressourcenschutzrecht“ des Umweltbundesamtes vom Dezember 2013) wenngleich Art und Menge der verwendeten Rohstoffe – soweit dies im Einzelfall relevant ist – auch nach dem UVPG im UVP-Bericht zu thematisieren sind (vgl. Anlage 4 Nr. 1 c) bb) UVPG.(vgl. auch [Franke, B. et al., 2018])

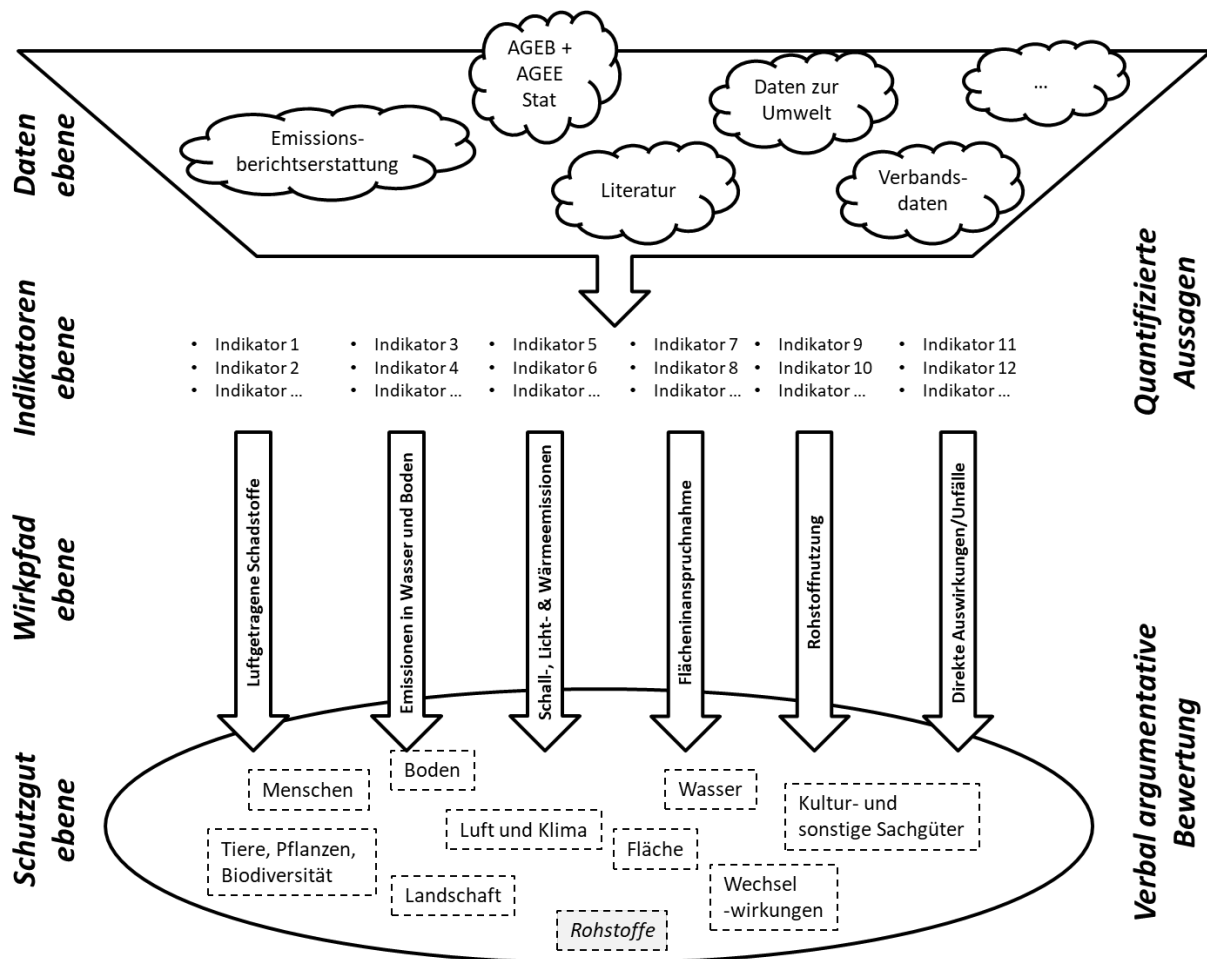
Die Betroffenheit eines Schutzgutes wird mit Hilfe so genannter Wirkpfade ermittelt. Die Wirkpfade werden durch die Indikatoren beschrieben. Die Indikatoren werden aus der Literatur entnommen oder anhand verfügbarer Daten generiert.

Somit basiert das Monitoring aus den folgenden Komponenten:

- ▶ Schutzgüter (vgl. Kap 3.2.1)
- ▶ Wirkpfade (vgl. Kap 3.2.2)
- ▶ Indikatoren (vgl. Kap. 3.2.3)

Abbildung 5 zeigt eine Übersicht über die Elemente sowie deren jeweilige Rolle und interdependente Verknüpfung im Konzept des Monitorings.

Abbildung 5: Funktionsweise des Konzepts zum Umweltmonitoring



Quelle: eigene Darstellung ifeu 2020

3.2.1 Schutzgüter

Zur Auswahl und Betrachtung aber auch zur Bewertung der Umweltauswirkungen wird das aus dem UVPG bekannte Schutzgutkonzept genutzt. Es wird für die Zwecke dieses Forschungsvorhabens um den Aspekt Rohstoffe erweitert. Das Thema Klimawandel wird nicht behandelt, da es nicht Gegenstand der Untersuchung ist. Insofern werden die durch das Fortschreiten der Energiewende intendierten Umweltveränderungen anhand ihrer **Auswirkungen** auf die Schutzgüter betrachtet und soweit möglich bewertet. Die Beschreibung der Umweltveränderungen entlang der Schutzgüter ist somit die **Bewertungsebene** im Modell.

Somit werden im Bewertungsmaßstab die folgenden Schutzgüter bewertet:

- Menschen (menschliche Gesundheit),
- Tiere / Pflanzen / Biodiversität
- Fläche und unterirdischer Raum
- Boden
- Wasser

- ▶ Luft
- ▶ Landschaft
- ▶ Kulturelles Erbe und sonstige Sachgüter
- ▶ (Rohstoffe)
- ▶ Wechselwirkungen zwischen den Schutzgütern

3.2.2 Wirkpfade

Die Betroffenheit der Schutzgüter, durch die die verschiedenen Konzepte zur Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie und weitere Energieinfrastrukturen wird anhand von Wirkpfaden ermittelt. Wirkpfade beschreiben dabei den Weg der Auswirkung von der Quelle zum Ort der möglichen Wirkung.

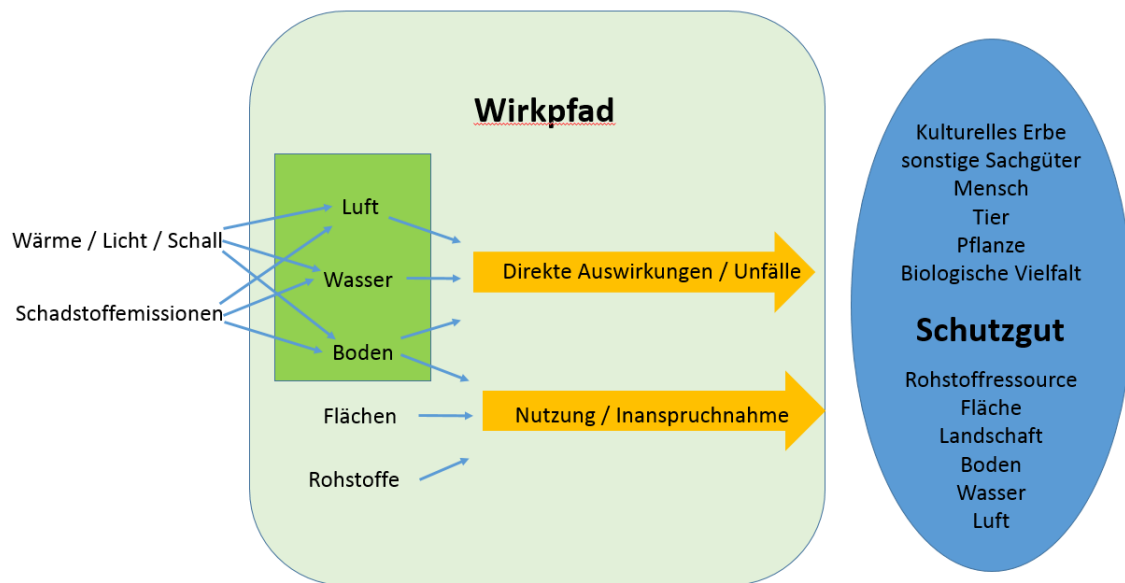
Dabei kann jedes Schutzgut von einem oder mehreren Wirkpfaden beeinflusst werden. Die Diskussion der Beeinträchtigung der einzelnen Schutzgüter erfolgt im Rahmen dieses Vorhabens an folgenden Wirkpfaden:

- ▶ Luftgetragene Schadstoffe (in der Außenluft)
- ▶ Emissionen in Wasser und Boden
- ▶ Schall-, Licht- und Wärmeemissionen
- ▶ Flächeninanspruchnahme
- ▶ Rohstoffnutzung
- ▶ Direkte Auswirkungen/ Unfälle

3.2.3 Zusammenhang zwischen Wirkpfaden und Schutzgütern

Den Wirkpfaden kommt im Modell die thematische Bündelungsfunktion zu. Sie bündeln die Indikatoren, die für die Betrachtung des Schutzgutes von Relevanz sind, sprich über die Wirkpfade werden alle thematisch gleichen Indikatoren zur quantitativen Beschreibung der Umweltauswirkungen auf das jeweilige Schutzgut zugeordnet. Die Wirkpfade sind somit die Ebene der Vernetzung zwischen Schutzgut und Indikator.

Abbildung 6: Schutzgutbetroffenheit über den Wirkpfad



Quelle: Umweltbundesamt 2018

Zudem besteht eine Abhängigkeit zwischen Indikator und Schutzgut, so dass nicht alle Indikatoren, die einem Wirkpfad zugeordnet sind, auch für das jeweilige Schutzgut relevant sind. Das Wirkpfadmodell ist somit mehr als Hilfe zur Identifikation der Indikatoren sowie deren Verknüpfung mit den Schutzgütern zu verstehen. Zudem helfen die Wirkpfade die Indikatoren zu clustern und einer einheitlichen Datenbasis/ rechnerischen Ableitung zuzuordnen.

Die Betroffenheit der Schutzgüter wird über die Wirkpfade ermittelt. Daher muss eine kausale Verknüpfung zwischen Schutzgut und Wirkpfad erfolgen. Diese Kausalitäten sind in der wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit den Inhalten des UVP-Rechts oft untersucht und in vielen Berichten und Arbeitshilfen zum Vollzug des Bewertungsinstrumentes dargelegt. Eine für den methodischen Ansatz dieses Vorhabens geeignete Aufbereitung findet sich bei [Schrödter W. et al 2004]⁹. Die Zuordnung der Wirkpfade zu den Schutzgütern lässt sich demnach anhand der folgenden Kausalitäten beschreiben. Der Fokus der Zuordnung liegt dabei auf den direkten Umweltwirkungen:

- Das Schutzgut **Menschen** – im Sinne der menschlichen Gesundheit - wird durch luftgetragene Schadstoffe, Emissionen in Wasser und Boden sowie Schall-, Licht- und Wärmeemissionen beeinträchtigt. Ein weiteres Beeinträchtigungspotenzial besteht durch direkte Auswirkungen durch Unfälle.
- Die Schutzgüter **Tiere, Pflanzen und biologische Vielfalt** werden beeinträchtigt durch luftgetragene Schadstoffe, Emissionen in Wasser und Boden, Schall-, Licht- und Wärmeemissionen sowie Flächeninanspruchnahmen und direkte Auswirkungen im Sinne von Unfällen.

⁹ In den Jahren zwischen 2004 und 2006 wurde eine große Novelle des deutschen Gesetzes zur Umweltverträglichkeitsprüfung in den Fachkreisen verhandelt. Es ging darum, das Instrument UVP auch auf Pläne und Programme auszuweiten. Daher wurde zu diesem Zeitpunkt viel grundlegende Literatur erarbeitet, die in ihren Grundzügen auch heute noch Gültigkeit besitzt.

- ▶ Das Schutzgut **Boden** wird ebenso wie das Schutzgut Wasser durch die Deposition luftgetragener Schadstoffe, Emissionen in Wasser und Boden, Schall-, Licht- und Wärmeemissionen beeinträchtigt.
- ▶ Das Schutzgut **Fläche** wird ebenso wie das Schutzgut **Landschaft** durch alle Formen der Flächeninanspruchnahme verändert und dabei meist beeinträchtigt. Das Schutzgut Fläche bezieht sich dabei auf die Aspekte der Flächenbelegung (Art und Ausmaß der Belegung der verfügbaren Fläche), während das Schutzgut Landschaft eher optische Wirkungen adressiert (Erholungsnutzen, Heimat- und Zugehörigkeitsgefühle aber auch vielfältiger Lebensraum für Tiere und Pflanzen). Insofern ist das Schutzgut über visuelle Beeinträchtigungen durch die Veränderung der Art der Flächenbelegung über den Wirkpfad Flächeninanspruchnahme betroffen.
- ▶ Das Schutzgut **Luft** – Luftqualität - wird durch luftgetragene Schadstoffe beeinträchtigt.
- ▶ Das Schutzgut **Klima** – im Sinne des globalen Klimaschutzes - wird durch alle Treibhausgasemissionen beeinträchtigt. Prinzipiell wird das Thema Treibhausgasemissionen nicht im Rahmen dieses Forschungsvorhabens betrachtet, da dies im Zusammenhang mit der Energiewende schon an anderer Stelle bewertet wird.
- ▶ Das Schutzgut **Kulturelles Erbe und sonstige Sachgüter** wird insbesondere durch luftgetragene Schadstoffe, Emissionen in Wasser und Boden, Flächeninanspruchnahmen und direkte Auswirkungen im Sinne von Unfällen beeinträchtigt.
- ▶ Das Schutzgut **Ressourcen** im Sinne von Rohstoffen wird nur über den Wirkpfad Rohstoffnutzung adressiert. Die Förderung der in der Erdkruste gelagerter Rohstoffe kann in diesem Sinne auch als unterirdische Raum- bzw. Flächeninanspruchnahme gewertet werden.

Zwischen den genannten Schutzgütern besteht ein interdependentes Geflecht von Wechselwirkungen. So sind Beeinträchtigungen auf das Schutzgut Landschaft bspw. mitursächlich für Auswirkungen auf das Schutzgut Menschen, da diese nur vermindert Erholung in der Landschaft finden, eine Inanspruchnahme von Flächen bedeutet auch immer den Verlust von Lebensräumen für Tiere und Pflanzen etc. Eine detaillierte Abbildung von Wechselwirkungen im Monitoring gestaltet sich schwierig, weil somit über die indirekten Wirkungen aller Wirkpfade auch nahezu alle Schutzgüter betroffen sind und es somit ggf. zu einer Doppelbewertung kommen kann.

3.3 Grundlegende methodische Festlegungen des Monitoringkonzeptes

Die weitere inhaltliche Beschäftigung mit der Aufgabenstellung bedarf einiger grundlegender methodischen Festlegungen über die Definition des Systemraumes des Energiesystems, das sich im Rahmen der Energiewende ändert, sowie der zu betrachtenden Zeithorizonte, insbesondere was die Auswahl eines geeigneten Referenzjahres angeht.

3.3.1 Anforderungen an Systemgrenzen und Bilanzrahmen des Monitorings der Energiewende

Die Systemgrenze des Monitorings muss alle Konzepte zur Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie und weitere Energieinfrastrukturen umfassen, soweit sie wesentlich für die Energiewende sind. Die Ableitung dieser Systemgrenzen für die Bewertung der Umweltauswirkungen

des Energiesystems orientiert sich an der Definition der Energiewende. Innerhalb der Energiewende gibt es zwei im Rahmen der Zielarchitektur benannte Kernziele:

- ▶ Steigerung des Anteils der erneuerbaren Energien (EE) am gesamten Bruttoendenergieverbrauch¹⁰
- ▶ Reduktion des Primärenergieverbrauchs

Auf der Steuerungsebene der Energiewende werden konkrete Ziele für drei Sektoren definiert:

- ▶ Sektor Strom (auch Umwandlung genannt, wenn der Fokus auf der reinen Erzeugung von Strom liegt)
- ▶ Sektor Wärme
- ▶ Sektor Verkehr
(wobei im Rahmen dieses Vorhabens nur der Energieeinsatz im Sektor Verkehr betrachtet wird, sprich der Wechsel von fossilen auf erneuerbare Kraftstoffe als Teil der Energiewende. Auswirkungen der so genannten „Verkehrswende“ sprich Veränderungen am Modal Split sind nicht Bestandteil des Zielsystems der Energiewende und somit auch nicht des hier ausgearbeiteten Monitorings)

Ein Grund für diese Abgrenzung findet sich in der politischen Motivation der Energiewende. Fasst diese doch primär Sektoren ins Auge in denen Maßnahmen zur Umstrukturierung des Energiesystems auf Basis rechtlicher Erlasse möglich sind. Bekannt sind das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) sowie das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) oder die Energieverbrauchs-kennzeichnungsverordnung. Gerade letzteres wirkt selbstverständlich in alle Sektoren und somit auch in die Industrie.

Im Ergebnis führt dieses Vorgehen aber dazu, dass bei der inhaltlichen Auseinandersetzung mit dem Thema Energiewende vorhandenes Zahlenmaterial wie bspw. Zahlen zur deutschen Energiebilanz (AGEB e.V, AGEE-Stat et al.) oder die Nationalen Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen immer nur in Teilen verwendbar ist und daher ggf. „untergliedert“ werden muss, um die Sektoren der Energiewende abbilden zu können.

Eine Systemgrenze für die Umweltbewertung des sich in der Energiewende befindlichen Energiesystems muss also die drei Sektoren Strom, Wärme und Verkehr umfassen. Doch können diese drei Sektoren nicht isoliert betrachtet werden, denn die Erzeugung von Strom, Wärme und Verkehrsleitung bedarf des Einsatzes von Energieträgern, deren Förderung, Anbau und Aufbereitung als so genannte **Vorketten** mit in den Betrachtungsraum gehören.

Zudem bedingen zentral erzeugter Strom und zentral erzeugte Wärme eine Übertragung zum Ort der Nutzung. Außerdem müssen Energieträger an den Einsatzort transportiert werden. Da diese **Infrastruktur** ebenfalls Umweltauswirkungen hervorrufen kann, wird diese in der Definition des Systemraums berücksichtigt. Und auch die Infrastruktur bindet Energie und Ressourcen, die im Sinne der Betrachtung der Vorketten ebenfalls als „Vorkette der Infrastruktur“ zu beachten ist.

¹⁰ Diese Bezugsgröße wurde seinerzeit aus politischen Gründen gewählt: Der Anteil an der Primärenergieerzeugung wurde nach der Wirkungsgradmethode bestimmt, die für die Messung der Entwicklung des EE-Ausbaus untauglich war, weil für die erneuerbaren Energien definitorisch 100 % Wirkungsgrad angesetzt werden was zu einer systematischen Unterbewertung des Anteils führt. Der reine Endenergieverbrauch hat die Transportverluste außer Acht gelassen. Um hier ebenfalls Effizienzgewinne realisieren zu können, wurde auf eine Bruttogröße abgestellt, die es in der Statistik vor der Renewable Energy Directive (RED) noch nicht gab.

Zu beachten ist weiterhin, dass die Energiewende nicht an den nationalen Grenzen Deutschlands endet. Fossile und biobasierte Energieträger werden eingeführt, im Ausland produzierter Netzstrom wird über die Interkonnektoren ins deutsche Netz importiert. Gleichzeitig führt Deutschland aber auch Energieträger und Netzstrom aus.

Eben diese Integration der Vorketten und der Infrastruktur sowie die Abbildung der internationalen Verflechtungen (Import/ Export) werden in den unterschiedlichen Berichterstattungen (bislang) uneinheitlich behandelt. Das Inventar der nationalen THG Emissionen berücksichtigt in seiner Bilanzierung keine Emissionen aus den internationalen Vorketten der Energieträger und führt sie nur in der Quellgruppe der Emissionsentstehung (z.B. Stahl für Windräder unter Stahlerzeugung), solange diese im Inland stattfindet und folgt somit entsprechend den Guidelines dem Ansatz einer territorial begrenzten Energiebilanz. Die Emissionsbilanz der erneuerbaren Energieträger berücksichtigt hingegen Vorketten unabhängig vom Ort, als auch die Herstellung der Infrastruktur für erneuerbare Energien Anlagen [UBA 2019e]. Sollte dieses Vorgehen auch für das Umweltmonitoring der Energiewende angewendet werden, müssten die in- und ausländischen Energievorketten sowie die dafür benötigte Infrastruktur berücksichtigt werden. Die Inkludierung dieser Vorketten und Infrastrukturen führen zu einer partiellen Erweiterung auf weitere Sektoren, wie bspw. Industrie und Landwirtschaft.

Eine Berücksichtigung der internationalen Verflechtungen auf dem Strommarkt im Bilanzrahmen dehnt die Systemgrenze noch weiter aus. Eine adäquate Bewertung der internationalen Verflechtung bedingt zudem auch die Diskussion um die Bewertung von – im Idealfall - vermiedenen Umweltlasten in den Empfängerländern.

Im Extrem stehen sich somit zwei Modellansätze gegenüber:

1. Die Bilanzierung der für die Energiewende relevanten Sektoren nach dem Territorialprinzip - ohne Berücksichtigung der Umweltwirkungen der Importe - in der nur die in Deutschland entstehenden Umweltauswirkungen aus der Förderung bzw. Anbau, Aufbereitung, Transport und Nutzung der Energieträger und der Übertragung der elektrischen Energie und der zentral erzeugten Wärme betrachtet werden.
2. Ergänzung der Territorialbilanz um die Berücksichtigung auch der ausländischen, also importierten Energieträgervorketten und Vorketten der Infrastruktur im In- und Ausland sowie der außerdeutschen Umweltlasten der Stromimporte und des Abzugs der exportierten Umweltwirkungen.

Der Ansatz einer reinen Territorialbilanz ist kritisch zu sehen, da die Umweltlasten wesentlicher Energieträgervorketten ganz (Steinkohle) oder teilweise (Erdöl, Erdgas) fehlen und importierter Strom egal welcher Herkunft ohne jegliche Umweltlasten ins System übernommen wird. Der zweite Modellansatz bedingt jedoch, aufgrund der „Mitbilanzierung“ der Umweltauswirkungen der Stromexporte im gesamten europäischen und aufgrund der Energieträgerimporte auch weltweiten Verflechtungsraum.

Als vereinender Lösungsansatz bietet sich ein modulares Modell an. Startpunkt ist die Territorialbilanz für die Sektoren der Energiewende (Strom, Wärme, Verkehr). Diese wird wo immer methodisch möglich und datenseitig abbildbar ergänzt um alle importierten Energieträger und die Vorketten.

3.3.2 Abgrenzung Systemraum und betrachtete Prozesse

Wie im vorherigen Kapitel ausgeführt, muss der Systemraum für das Umweltmonitoring der Energiewende die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr sowie die Förderung bzw. den Anbau, und die Aufbereitung der in diesen Sektoren eingesetzten Energieträgern sowie den Transport der Energieträger und die Ableitung von Strom und Wärme zum Ort des Verbrauchs berücksich-

tigen. Dabei gilt es zu unterscheiden, dass Strom und Wärme sowohl zentral als auch dezentral erzeugt werden. Beim Verkehr wiederum ist zu unterscheiden, ob in den Fahr- und Flugzeugen die Antriebsenergie produziert wird (durch ein Umwandeln von Energieträgern – i.d.R. verbrennen) oder eine Energie lediglich gespeichert wird (batteriegestützte Elektromobilität).

Diese zusätzlichen Differenzierungsebenen bedingen eine steigende Komplexität für die Systemraumgestaltung, wenn an der aus den Zielen der Energiewende übernommenen Sortierung nach Sektoren des Endenergieverbrauchs festgehalten werden soll. So müsste im Systemraum unterschieden werden, ob ein Kohlekraftwerk Elektrizität für den Antrieb eines Elektroautos erzeugt wird oder für einen beliebigen Stromverbraucher in einem Privathaushalt.

Die potenziellen Umweltauswirkungen der Kraftwerke zur Kohleverstromung unterscheiden sich aber nicht durch die intendierte Nutzung der Elektrizität, sondern sind für jede kWh im Mittel identisch. Somit kann ein prozessorientierter Ansatz zur Abbildung des Systemraums Komplexität reduzieren, ohne dabei den Erkenntnisgewinn für die erwarteten Ergebnisse nennenswert zu schmälern. Es steht also nicht mehr die Frage im Vordergrund, in welchem Sektor der Energiewende die Energie eingesetzt wird, sondern welche Prozesse notwendig sind, um den Energiebedarf in den Sektoren der Energiewende zu bedienen. Im Folgenden werden die einzelnen Bestandteile des Systemraums beschrieben, eine detaillierte Darstellung zeigt abschließend Abbildung 7.

3.3.2.1 Die Vorketten

Hierunter fallen insbesondere die Vorketten der Energieträger die im In- und Ausland gefördert bzw. angebaut und zur Nutzung in den Prozessen zur Erzeugung von Strom, Wärme und Verkehrsleistung aufbereitet werden. Enthalten sind somit alle Anlagen zur Förderung fossiler Energieträger sowie die Teile der Agrar- und Forstwirtschaft, die auf den Anbau / Einschlag von Biomasse zur energetischen Nutzung entfallen. Außerdem alle Tätigkeiten zur Aufbereitung der Energieträger (insbesondere eben die Raffinerien und auch die Erzeugung von Biogas in Biogasanlagen).

Neben der Unterscheidung nach Herkunft bietet sich hier eine klassische Differenzierung nach fossil basierten und erneuerbaren Energieträgern an. Uran und Reststoffe (Müll) werden als separate Sektoren geführt, da Uran keinen Brennstoff im eigentlichen Sinn, wie Kohle oder Öl darstellt und bei den Reststoffen eine weitere methodische Frage hinsichtlich des Bilanzraums zu klären ist: nämlich wo endet der Bilanzrahmen des Produktes und wo beginnt der Bilanzrahmen des Abfalls als Brennstoff. Im Rahmen dieses Vorhabens wird festgelegt, dass Abfälle ohne Lasten in das Energiesystem übernommen werden. Dafür trägt das Energiesystem alle Umweltlasten der Müllverbrennungsanlagen (ein so genannter Cut-off Approach im Sinne von: keine Vorkette - dafür alle Lasten). Neben den Energieträgern sind bei den Vorketten auch die Materialien, die in den Anlagen im Systemraum verbaut werden zu betrachten. Hier wird zwischen mineralischen (Beton aber auch Steine und andere Erden) und metallischen Baustoffen (Stahl, Alu aber eben auch seltene Metalle als Teil spezieller technischer Komponenten der Anlagen) sowie sonstigen Baustoffen bspw. aus Kunststoff etc. unterschieden.

3.3.2.2 Der Energieeinsatz in Anlagen der öffentlichen Versorgung

Hier werden alle Anlagen berücksichtigt, in denen Energieträger in Anlagen der öffentlichen Versorgung zu Elektrizität und/oder Wärme umgewandelt werden. In diesem Teil des Systemraums finden sich demnach alle Großfeuerungsanlagen ebenso wie die Kernkraftwerke und Müllverbrennungsanlagen mit Energierückgewinnung sowie die EE Anlagen - die Windenergieanlagen, PV Anlagen, Wasserkraftwerke und Feuerungsanlagen auf Basis erneuerbarer Energie-

träger (demnach auch die Teile der Biogasanlagen in denen das Biogas in Energie zur Ableitung in öffentliche Netze umgewandelt wird).

3.3.2.3 Der Energieeinsatz für den Verkehr

Der Verkehr wird für die Betrachtung im Umweltmonitoring auf den für die Energiewende relevanten Teil – folglich auf den Energieeinsatz im Verkehr reduziert. Prinzipiell fallen hierunter alle mobilen Prozesse in denen Energieträger zum Zwecke der Fortbewegung zu Wasser, zu Lande (auf Straße oder Schiene oder Offroad) und in der Luft genutzt werden. Also Autos, Lastwagen, Boote und Flugzeuge. Üblicherweise geschieht dies durch Verbrennung der flüssigen bzw. gasförmigen Energieträger (Ausnahme: Fahrzeuge mit Brennstoffzelle). Umweltwirkungen des für den Betrieb batterieelektrischer Fahrzeuge notwendigen Energieeinsatzes werden im Systemraum den Systemraumbestandteilen Energieeinsatz in Anlagen zur öffentlichen Versorgung bzw. in Anlagen zur Eigenversorgung zugeordnet, da sie dort entstehen. Diese Abgrenzung folgt der Logik, dass im Umweltmonitoring der Energiewende nur die Teile der Energiewende zu betrachten sind, die mit dem Ziel des Ausbaus der Erneuerbaren Energien in Verbindung stehen. Es sind somit die Ebenen der Erzeugungsanlagen zur Strom- und Wärmeproduktion zu betrachten sowie die Übertragungsnetze für Strom, Wärme und Gas, jedoch nicht die Anlagen zur Wandlung (Autos, Schiffe usw.) und auch nicht die Transportinfrastruktur im Verkehr. Somit sind bspw. die Flächenbelegung von Fahrzeugung als Energiewandlungsanlagen sowie die Vorketten für die Fahrzeugproduktion oder der Straßeninfrastruktur nicht zu berücksichtigen.

3.3.2.4 Der Energieeinsatz in Anlagen zur Eigenversorgung

Hierunter fallen alle Prozesse, die Energieträger in Wärme und auch Strom umwandeln, mit dem Ziel, den eigenen Energiebedarf zu decken. Hierunter fallen insbesondere Heizungen auf Basis fossiler und oder erneuerbarer Energieträger in festem, flüssigem oder gasförmigem Zustand. Weiterhin fallen hierunter alle Anlagen die Umweltwärme (Erdwärme, sonstige Umweltwärme, Solarthermie) für die Nutzung als Raumwärme oder Kälte aufbereiteten. Umweltauswirkungen des dafür notwendigen Energiebedarfs (Elektrizität für die Pumpen) werden aber dem Systemraumbestandteil Energieeinsatz in der Allgemeinen Versorgung zugeordnet, solange er nicht vom Betreiber der Heizungsanlage selbst erzeugt wird. Auch Industriekraftwerke und Industriekesselanlagen sind diesem Systemraumbestandteil zuzuordnen.

3.3.2.5 Die Infrastruktur

Unter der Überschrift Infrastruktur werden im Systemraum verschiedenen Aspekte abgebildet. Zum einen die für den Vertrieb der erzeugten Energie notwendige Infrastruktur, bestehend aus Nah- und Fernwärmenetzen und Übertragungs- und Verteilleitungen jeweils ober- wie unterirdisch sowie alle notwendigen Speicher und Verteilstationen.

Desweiteren sind hier alle Infrastrukturen zu finden, die es ermöglichen die eingesetzten Energieträger zum Ort der Umwandlung zu bringen. Dazu gehören die Pipelines für Gas und Öl inkl. Verteil und Absperrstationen ebenso wie die Infrastruktureinrichtungen für den Schiffs-, Schienen- und Straßentransport von Energieträgern.

Und schlussendlich sind in der Infrastruktur auch alle Anlagen selbst im Sinne der Gebäude und technischen Bestandteile zu verstehen. Dazu gehören neben den verbauten Materialien auch die durch die Anlagen belegten Flächen inklusive der Anbindung der Anlagenstandorte an das öffentliche Verkehrsnetz (Straßen, Schienen, Wasserwege). Fahrzeuge und allgemeine Verkehrsflächen gehören nicht zur Infrastruktur im Sinne des hier definierten Systemraums für das Umweltmonitoring der Energiewende.

3.3.2.6 Das Thema Energieeffizienz

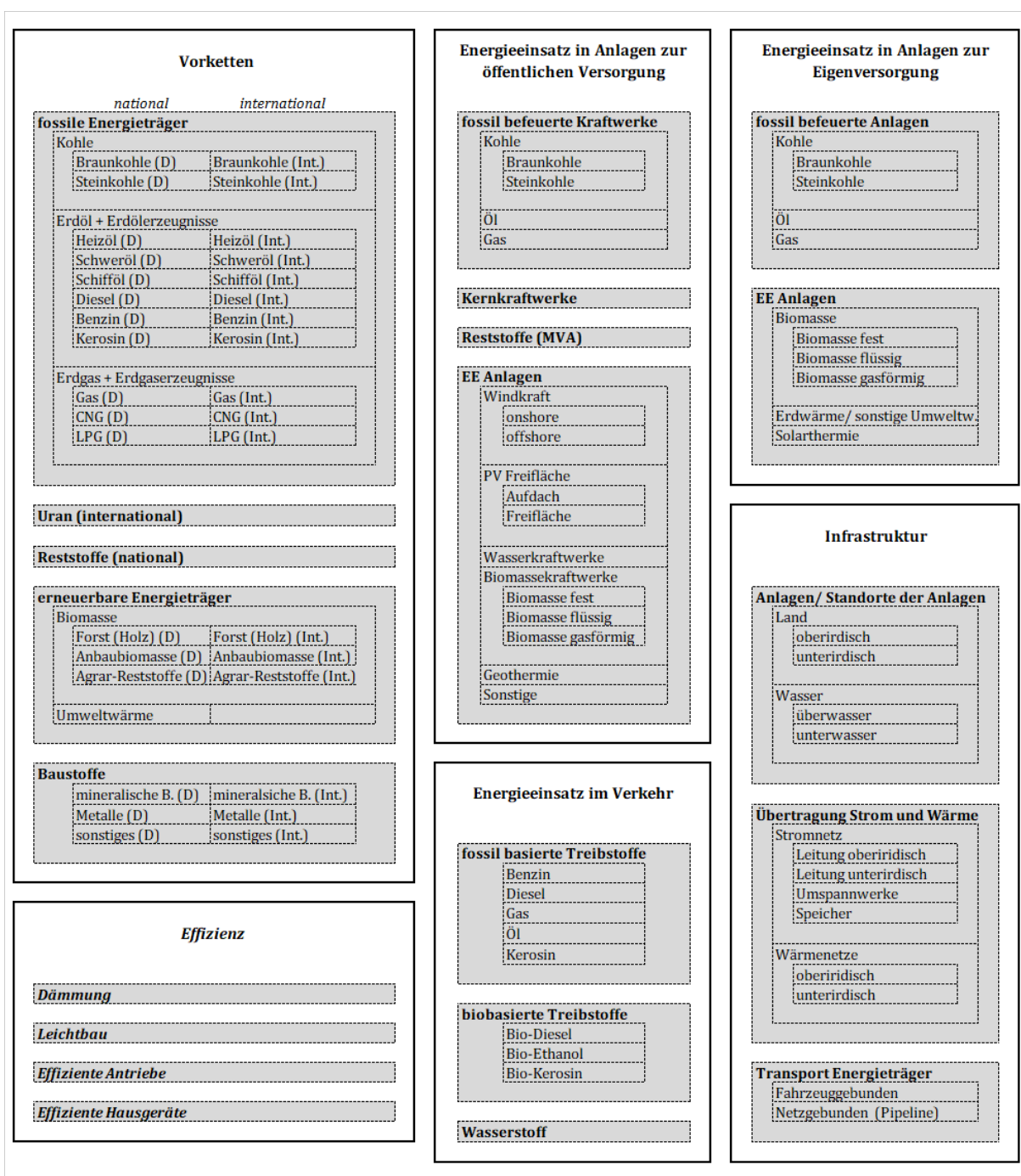
Energieeffizienz ist ein eigenständiges Ziel innerhalb der Energiewende und umfasst Maßnahmen, die dazu führen den Energiebedarf zu reduzieren. Darunter fallen alle Maßnahmen, die dazu geeignet sind bei Umwandlungsverfahren mehr nutzbare Energie aus den eingesetzten Energieträgern zu ziehen (z.B. Brennwertkessel statt einfacher Gasheizung) ebenso wie alle Maßnahmen, die dazu geeignet sind in definierten Prozessen eine vergleichbare Funktionalität bei reduziertem Energieeinsatz zu erreichen (z.B. Gebäudedämmung oder energieeffiziente Haushaltsgeräte).

Ein konsequentes Umsetzen des Themas Energieeffizienz führt in der Summe also langfristig zu einem sinkenden Energiebedarf. Die Energieeffizienz ist im Rahmen des Systemraums nicht separat abbildbar, die Umweltwirkungen ergeben sich aus den Veränderungen im Energieverbrauch und den für die Bereitstellung der Energie genutzten Prozessen und deren verknüpften Anforderungen an die Infrastruktur. So hat bspw. ein Gebäude nach Umsetzung umfangreicher Dämmmaßnahmen einen signifikant geringeren Energiebedarf, der dann auch noch statt mit einer Ölheizung durch den Einbau einer Wärmepumpe zu erheblichen Teilen durch Umweltwärme gedeckt wird. So zeigt sich dies im Gesamtsystem dadurch, dass für den Betrieb dieses Gebäude kein Erdöl mehr gefördert, aufbereitet und transportiert werden muss. Ebenso entfallen die Emissionen aus der Heizung. Stattdessen muss in den Anlagen der Energiewirtschaft Elektrizität erzeugt werden, mit der die Anlagen im Gebäude die Umweltwärme nutzbar machen. Diese Elektrizität muss zum Gebäude geleitet werden, im Zweifelsfall bedarf dies neuer Infrastrukturmaßnahmen zur Ableitung von Strom (angenommenen das Gebäude wäre bis dato noch gar nicht ans Netz angeschlossen). Es finden also durch die Umsetzung von Effizienzmaßnahmen neben den reinen Reduktionen (weniger Umweltauswirkungen) auch Verlagerungseffekte (andere Umweltwirkungen) statt, die vom definierten Systemraum aber gut abgebildet werden können. Insofern ist das Thema Energieeffizienz immanenter Bestandteil des Systemraums, wird jedoch vom Monitoringmodell nicht separat adressiert.

3.3.2.7 Zusammenfassung Systemraum

Die folgende Abbildung 7 zeigt eine zusammenfassende Darstellung des im Monitoringmodell zu betrachtenden Systemraums in einem umfänglichen Detailierungsgrad. Die Bereiche Vorketten und Infrastruktur sind dabei nicht nach Technologien differenziert. Im Verlaufe des Projektes kann es notwendig sein, insbesondere das Thema Infrastruktur – Anlagen/ Anlagenstandorte noch weiter nach Technologiearten zu differenzieren (sowie die Bereiche Allgemeine Versorgung, Anlagen zur Eigenerzeugung und Verkehr nach Technologien differenziert sind. Dies wird kontextbezogen in den jeweiligen Unterkapiteln stattfinden. Die Abbildung 7 zeigt einen idealtypischen Systemraum für den in Kapitel 3.3.1 definierten Modellansatz 1. In Kapitel 4 wird diskutiert, inwieweit dieser Systemraum auf Ebene der Wirkpfade bzw. auf Ebene der Indikatoren umgesetzt werden kann.

Abbildung 7: Systemraum der Umweltbewertung



Quelle: eigene Darstellung ifeu 2020

Alle diese im Systemraum inkludierten Prozesse können potenziell Umweltauswirkungen auf die Schutzgüter hervorrufen. Im Folgenden soll in Form einer Matrix dargestellt werden, welche Auswirkungen durch die einzelnen Prozesse auf die definierten Wirkpfade zu erwarten sind.

Tabelle 2: Matrix zur Identifikation der potenziellen Umweltauswirkungen des Systemraumbestandteils „Vorkette“

Prozess	Wirkpfad Luftgetragene Schadstoffe	Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden	Wirkpfad Schall-, Licht- und Wärme-emissionen	Wirkpfad Flächeninanspruchnahme	Wirkpfad Rohstoffnutzung	Wirkpfad direkte Auswirkungen/ Unfälle
Braunkohle	Emission von Luftschadstoffen beim Förderbetrieb und bei der Aufbereitung der Braunkohle als Energieträger für Kraftwerke und Einzelöfen	Auswirkungen auf das Grundwasser durch Wasserhaltung Auswirkungen auf Oberflächengewässer durch Wassereinleitung Indirekte Auswirkungen durch die Deposition von Luftschadstoffen	Schall und Lichtemissionen durch den Förderbetrieb	oberirdische Flächenbelegung (Tagebau)	Verbrauch von Rohstoffen im Sinne des Abbaus	Verlust von Lebensräumen durch Flächeninanspruchnahme
Steinkohle	Emission von Luftschadstoffen beim Förderbetrieb und bei der Aufbereitung der Steinkohle als Energieträger für Kraftwerke und Einzelöfen	Einbringung von Schadstoffen in Boden und Wasser (Grubenabwässer) Auswirkungen auf das Grundwasser durch Wasserhaltung Auswirkungen auf Oberflächengewässer durch Wassereinleitung Indirekte Auswirkungen durch die Deposition von Luftschadstoffen	Schall und Lichtemissionen durch den Förderbetrieb	oberirdische Flächenbelegung (Tagebau, Mountain-Top) unterirdische Flächenbelegung (Bergwerke)	Verbrauch von Rohstoffen im Sinne des Abbaus	Verlust von Lebensräumen durch Flächeninanspruchnahme

Prozess	Wirkpfad Luftgetragene Schadstoffe	Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden	Wirkpfad Schall-, Licht- und Wärme-emissionen	Wirkpfad Flächeninanspruchnahme	Wirkpfad Rohstoffnutzung	Wirkpfad direkte Auswirkungen/ Unfälle
Erdöl und Erdölerzeugnisse (Heizöl, Schweröl, Diesel, Benzin, Kerosin)	Emission von Luftschadstoffen bei der Förderung und Aufbereitung des Erdöls	Einbringung von Schadstoffen in Boden und Wasser Auswirkungen auf das Grundwasser durch Wasserhaltung Auswirkungen auf Oberflächengewässer durch Wassereinleitung Indirekte Auswirkungen durch die Deposition von Luftschadstoffen	Schall und Lichtemissionen durch den Förderbetrieb	oberirdische Flächenbelegung durch Förderanlagen	Verbrauch von Rohstoffen im Sinne des Abbaus	Verlust von Lebensräumen durch Flächeninanspruchnahme
Erdgas + Erdgaszeugnisse (Gas, CNG, LPG)	Emission von Luftschadstoffen beim Förderbetrieb	Einbringung von Schadstoffen in Boden und Wasser (insbesondere bei Fracking) Auswirkungen auf das Grundwasser durch Wasserhaltung Auswirkungen auf Oberflächengewässer durch Wassereinleitung Indirekte Auswirkungen durch die Deposition von Luftschadstoffen	Schall und Lichtemissionen durch den Förderbetrieb	oberirdische Flächenbelegung durch Förderanlagen	Verbrauch von Rohstoffen im Sinne des Abbaus	Verlust von Lebensräumen durch Flächeninanspruchnahme

Prozess	Wirkpfad Luftgetragene Schadstoffe	Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden	Wirkpfad Schall-, Licht- und Wärme-emissionen	Wirkpfad Flächeninanspruchnahme	Wirkpfad Rohstoffnutzung	Wirkpfad direkte Auswirkungen/ Unfälle
		fen				
Uran (Import)	Emission von Luftschadstoffen beim Förderbetrieb	Einbringung von Schadstoffen in Boden und Wasser Auswirkungen auf das Grundwasser durch Wasserhaltung Auswirkungen auf Oberflächengewässer durch Wassereinleitung Indirekte Auswirkungen durch die Deposition von Luftschadstoffen	Schall und Lichtemissionen durch den Förderbetrieb	oberirdische Flächenbelegung durch Förderanlagen	Verbrauch von Rohstoffen im Sinne des Abbaus	Verlust von Lebensräumen durch Flächeninanspruchnahme
Reststoffe	Keine Umweltwirkungen, da Reststoffe per Definition lastenfrei in den Systemraum übernommen werden (Cut-off Approach)					
Forst (fest)	Emission von Luftschadstoffen durch forstwirtschaftliche Geräte	Nährstoffeinträge durch Düngung Deposition von Luftschadstoffen	Schall- und Lichtemissionen durch forstwirtschaftliche Geräte	Flächenbelegung Forst	Verbrauch von Rohstoffen im Sinne des Abbaus	Verlust von Lebensräumen durch Flächeninanspruchnahme
Anbau (fest und gasförmig)	Emission von Luftschadstoffen durch landwirtschaftliche Geräte und die Ausbringung von Gärres-	Nährstoffeinträge durch Düngung Deposition von Luftschadstoffen	Schall- und Lichtemissionen durch landwirtschaftliche Geräte	Flächenbelegung Felder	Verbrauch von Rohstoffen im Sinne des Abbaus	Verlust von Lebensräumen durch Flächeninanspruchnahme

Prozess	Wirkpfad Luftgetragene Schadstoffe	Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden	Wirkpfad Schall-, Licht- und Wärme-emissionen	Wirkpfad Flächeninanspruchnahme	Wirkpfad Rohstoffnutzung	Wirkpfad direkte Auswirkungen/ Unfälle
Agrar-Reststoffe	ten					
	Keine Umweltwirkungen, da Reststoffe per Definition lastenfrei in den Systemraum übernommen werden (Cut-off Approach)					
Baustoffe mineralisch	Emission von Luftschadstoffen bei der Förderung und Aufbereitung	Einbringung von Schadstoffen in Boden und Wasser Auswirkungen auf das Grundwasser durch Wasserhaltung Auswirkungen auf Oberflächengewässer durch Wassereinleitung Indirekte Auswirkungen durch die Deposition von Luftschadstoffen	Schall und Lichtemissionen durch den Förderbetrieb und der Aufbereitungsanlagen	oberirdische Flächenbelegung (Tagebau)	Verbrauch von Rohstoffen im Sinne des Abbaus	Verlust von Lebensräumen durch Flächeninanspruchnahme
Baustoffe metallisch	Emission von Luftschadstoffen bei der Förderung und Aufbereitung	Einbringung von Schadstoffen in Boden und Wasser Indirekte Auswirkungen durch die Deposition von Luftschadstoffen	Schall und Lichtemissionen durch den Förderbetrieb und der Aufbereitungsanlagen	oberirdische Flächenbelegung durch Förderanlagen	Verbrauch von Rohstoffen im Sinne des Abbaus	Verlust von Lebensräumen durch Flächeninanspruchnahme
Baustoffe sonstige	Emission von Luftschadstoffen bei der Förderung und Aufbereitung	Einbringung von Schadstoffen in Boden und Wasser	Schall und Lichtemissionen durch den Förderbetrieb und der	oberirdische Flächenbelegung durch Förder-	Verbrauch von Rohstoffen im Sinne des Abbaus	Verlust von Lebensräumen durch Flächeninanspruchnahme

Prozess	Wirkpfad Luftgetragene Schadstoffe	Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden	Wirkpfad Schall-, Licht- und Wärme-emissionen	Wirkpfad Flächeninanspruchnahme	Wirkpfad Rohstoffnutzung	Wirkpfad direkte Auswirkungen/ Unfälle
	reitung	Indirekte Auswirkungen durch die Deposition von Luftschadstoffen	Aufbereitungsanlagen	dereinrichtungen		me

Quelle: eigene Darstellung ifeu 2020

Tabelle 3: Matrix zur Identifikation der potenziellen Umweltauswirkungen des Systemraumbestandteils „Energieeinsatz in Anlagen zur öffentlichen Versorgung“

Prozess	Wirkpfad Luftgetragene Schadstoffe	Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden	Wirkpfad Schall-, Licht- und Wärme-emissionen	Wirkpfad Flächeninanspruchnahme	Wirkpfad Rohstoffnutzung	Wirkpfad direkte Auswirkungen/ Unfälle
Fossil befeuerte Kraftwerke	Luftschadstoffe über den Schornstein	Einleitung von Kühlwasser und Abwässern aus der Rauchgasreinigung sowie Deposition von Luftschadstoffen	Schallemissionen durch den Kraftwerksbetrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	Nutzung fossiler Rohstoffe als Brennstoff	Verlust von Lebensräumen durch Flächeninanspruchnahme Emissionen in Luft/ Boden und Wasser im Falle eines Unfalls
Kernkraftwerke	Emission von Strahlung	Einleitung von Kühlwasser	Schallemissionen durch den Kraftwerksbetrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	Nutzung von Uran	Verlust von Lebensräumen durch Flächeninanspruchnahme Großräumige Auswirkungen auf Menschen sowie Tiere und Pflanzen im Falle eines Unfalls
Müllverbrennungsanlage	Luftschadstoffe über den Schornstein	Abwässer aus dem Anlagenbetrieb sowie Deposition von Luftschadstoffen	Schallemissionen durch den Kraftwerksbetrieb	Verbringung von Schlacken	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	Verlust von Lebensräumen durch Flächeninanspruchnahme Emissionen in Luft/ Boden und Wasser im Falle eines Unfalls

Prozess	Wirkpfad Luftgetragene Schadstoffe	Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden	Wirkpfad Schall-, Licht- und Wärme-emissionen	Wirkpfad Flächen-inanspruchnahme	Wirkpfad Rohstoffnutzung	Wirkpfad direkte Auswirkungen/ Unfälle
Wind Land	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	Schallemissionen durch den Kraftwerksbetrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	Potenzielle Schädigung der Avifauna durch Kollision
Wind offshore	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	Schallemissionen durch den Kraftwerksbetrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	Potenzielle Schädigung der Avifauna und der marinen Fauna durch die Bestandteile Unterwasser durch Kollision
PV Aufdach	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	Lichtreflexionen	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb
PV Fläche	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	Lichtreflexionen und Verschattung	Direkte Flächennutzung und damit direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	Verlust von Lebensräumen durch Flächeninanspruchnahme
Wasserkraft	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	Wassernutzung im Sinne von Turbinendurchgang	Schallemissionen durch den Kraftwerksbetrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	Potenzielle Schädigung der Wasserlebewesen durch Kollision
Biomasse (fest)	Luftschadstoffe über den Schornstein	Deposition von Luftschadstoffen sowie Ausbringung von Gärresten auf Felder	Schallemissionen durch den Kraftwerksbetrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	Nutzung nachwachsender Rohstoffe als Brennstoff	Verlust von Lebensräumen durch Flächeninanspruchnahme

Prozess	Wirkpfad Luftgetragene Schadstoffe	Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden	Wirkpfad Schall-, Licht- und Wärme-emissionen	Wirkpfad Flächeninanspruchnahme	Wirkpfad Rohstoffnutzung	Wirkpfad direkte Auswirkungen/ Unfälle
						Emissionen in Luft/ Boden und Wasser im Falle eines Unfalls
Biomasse (flüssig)	Luftschadstoffe über den Schornstein	Deposition von Luftschadstoffen sowie Ausbringung von Gärresten auf Felder	Schallemissionen durch den Kraftwerksbetrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	Nutzung nachwachsender Rohstoffe als Brennstoff	Verlust von Lebensräumen durch Flächeninanspruchnahme Emissionen in Luft/ Boden und Wasser im Falle eines Unfalls
Biomasse (gasförmig)	Luftschadstoffe über den Schornstein	Deposition von Luftschadstoffen sowie Ausbringung von Gärresten auf Felder	Schallemissionen durch den Kraftwerksbetrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	Nutzung nachwachsender Rohstoffe als Brennstoff	Verlust von Lebensräumen durch Flächeninanspruchnahme Emissionen in Luft/ Boden und Wasser im Falle eines Unfalls
Geothermie	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	Wärmeentzug des Bodens/ Grundwasser Verunreinigung durch Leckage	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	Verlust von Lebensräumen durch Flächeninanspruchnahme Emissionen in Boden und Wasser bei Leckage

Quelle: eigene Darstellung ifeu 2020

Tabelle 4: Matrix zur Identifikation der potenziellen Umweltauswirkungen des Systemraumbestandteils „Energieeinsatz im Verkehr“

Prozess	Wirkpfad Luftgetragene Schadstoffe	Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden	Wirkpfad Schall-, Licht- und Wärme-emissionen	Wirkpfad Flächeninanspruchnahme	Wirkpfad Rohstoffnutzung	Wirkpfad direkte Auswirkungen/ Unfälle
Fossil basierte Treibstoffe (Benzin, Diesel, Gas, Öl, Kerosin)	Emission von Luftschadstoffen mit dem Abgas	Deposition von Luftschadstoffen	Schall- und Wärme-emissionen von Verbrennungsmotoren/ Turbinen	keine direkten Umweltwirkungen durch Fahrzeugbetrieb	Nutzung fossiler Rohstoffe als Brennstoff	keine direkten Umweltwirkungen durch Fahrzeugbetrieb
Biobasierte Treibstoffe (Bio-Diesel, Bio-Ethanol, Bio-Kerosin)	Emission von Luftschadstoffen mit dem Abgas	Deposition von Luftschadstoffen	Schall- und Wärme-emissionen von Verbrennungsmotoren/ Turbinen	keine direkten Umweltwirkungen durch Fahrzeugbetrieb	Nutzung fossiler Rohstoffe als Brennstoff	keine direkten Umweltwirkungen durch Fahrzeugbetrieb
Wasserstoff	Emission von Wasserdampf	keine direkten Umweltwirkungen durch Fahrzeugbetrieb	Schall- und Lichtemissionen des Fahrzeugs	keine direkten Umweltwirkungen durch Fahrzeugbetrieb	keine direkten Umweltwirkungen durch Fahrzeugbetrieb	keine direkten Umweltwirkungen durch Fahrzeugbetrieb

Quelle: eigene Darstellung ifeu 2020

Tabelle 5: Matrix zur Identifikation der potenziellen Umweltauswirkungen des Systemraumbestandteils „Energieeinsatz in Anlagen zur Eigenversorgung“

Prozess	Wirkpfad Luftgetragene Schadstoffe	Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden	Wirkpfad Schall-, Licht- und Wärme-emissionen	Wirkpfad Flächeninanspruchnahme	Wirkpfad Rohstoffnutzung	Wirkpfad direkte Auswirkungen/ Unfälle
Braunkohle	Emission von Luftschadstoffen über den Schornstein	Deposition von Luftschadstoffen Einleitung von Kühlwasser und Abwässern aus dem Anlagenbetrieb	Schall- und Wärme-emission im Betrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	Nutzung fossiler Rohstoffe als Brennstoff	Verlust von Lebensräumen durch Flächeninanspruchnahme Emissionen in Luft/ Boden und Wasser im

Prozess	Wirkpfad Luftgetragene Schadstoffe	Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden	Wirkpfad Schall-, Licht- und Wärme-emissionen	Wirkpfad Flächeninanspruchnahme	Wirkpfad Rohstoffnutzung	Wirkpfad direkte Auswirkungen/ Unfälle
						Falle eines Unfalls
Steinkohle	Emission von Luftschadstoffen über den Schornstein	Deposition von Luftschadstoffen Einleitung von Kühlwasser und Abwässern aus der Anlagenbetrieb	Schall- und Wärmeemission im Betrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	Nutzung fossiler Rohstoffe als Brennstoff	Verlust von Lebensräumen durch Flächeninanspruchnahme Emissionen in Luft/ Boden und Wasser im Falle eines Unfalls
Öl	Emission von Luftschadstoffen über den Schornstein	Deposition von Luftschadstoffen Einleitung von Kühlwasser und Abwässern aus der Anlagenbetrieb	Schall- und Wärmeemission im Betrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	Nutzung fossiler Rohstoffe als Brennstoff	Verlust von Lebensräumen durch Flächeninanspruchnahme Emissionen in Luft/ Boden und Wasser im Falle eines Unfalls
Gas	Emission von Luftschadstoffen über den Schornstein	Deposition von Luftschadstoffen Einleitung von Kühlwasser und Abwässern aus der Anlagenbetrieb	Schall- und Wärmeemission im Betrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	Nutzung fossiler Rohstoffe als Brennstoff	Verlust von Lebensräumen durch Flächeninanspruchnahme Emissionen in Luft/ Boden und Wasser im Falle eines Unfalls
Biomasse (fest)	Emission von Luftschadstoffen über den	Deposition von Luftschadstoffen Einleitung von Kühl-	Schall- und Wärmeemission im Betrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den	Nutzung nachwachsender Rohstoffe als	Verlust von Lebensräumen durch Flächeninanspruchnahme

Prozess	Wirkpfad Luftgetragene Schadstoffe	Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden	Wirkpfad Schall-, Licht- und Wärme-emissionen	Wirkpfad Flächeninanspruchnahme	Wirkpfad Rohstoffnutzung	Wirkpfad direkte Auswirkungen/ Unfälle
	Schornstein	wasser und Abwässern aus der Anlagenbetrieb		Anlagenbetrieb	Brennstoff	me Emissionen in Luft/ Boden und Wasser im Falle eines Unfalls
Biomasse (flüssig)	Emission von Luftschadstoffen über den Schornstein	Deposition von Luftschadstoffen Einleitung von Kühlwasser und Abwässern aus der Anlagenbetrieb	Schall- und Wärmeemission im Betrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	Nutzung nachwachsender Rohstoffe als Brennstoff	Verlust von Lebensräumen durch Flächeninanspruchnahme Emissionen in Luft/ Boden und Wasser im Falle eines Unfalls
Biomasse (gasförmig)	Emission von Luftschadstoffen über den Schornstein	Deposition von Luftschadstoffen Einleitung von Kühlwasser und Abwässern aus der Anlagenbetrieb	Schall- und Wärmeemission im Betrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	Nutzung nachwachsender Rohstoffe als Brennstoff	Verlust von Lebensräumen durch Flächeninanspruchnahme Emissionen in Luft/ Boden und Wasser im Falle eines Unfalls
Erdwärme	keine direkten Umweltwirkungen durch den Anlagenbetrieb	Wärmeentzug des Bodens/ Grundwasser Verunreinigung durch Leckage	Schallemission im Betrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	Verlust von Lebensräumen durch Flächeninanspruchnahme Emissionen in Boden und Wasser bei Le-

Prozess	Wirkpfad Luftgetragene Schadstoffe	Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden	Wirkpfad Schall-, Licht- und Wärme-emissionen	Wirkpfad Flächeninanspruchnahme	Wirkpfad Rohstoffnutzung	Wirkpfad direkte Auswirkungen/ Unfälle
						ckage
Solarthermie	keine direkten Umweltwirkungen durch den Anlagenbetrieb	keine direkten Umweltwirkungen durch den Anlagenbetrieb	Schallemission im Betrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbetrieb

Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 6: Matrix zur Identifikation der potenziellen Umweltauswirkungen des Systemraumbestandteils „Infrastruktur“

Prozess	Wirkpfad Luftgetragene Schadstoffe	Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden	Wirkpfad Schall-, Licht- und Wärme-emissionen	Wirkpfad Flächeninanspruchnahme	Wirkpfad Rohstoffnutzung	Wirkpfad direkte Auswirkungen/ Unfälle
Kraftwerke (im Sinne von Standort der Anlage) an Land (Ober- und Unterirdisch)	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbestand	ortsgebundene Kontamination des Bodens durch Schadstoffmigration aus den Fundamenten Auswirkungen unterirdischer Gebäudeteile auf das Grundwasser	Lichtemissionen durch Anlagenbeleuchtung In der Errichtungsphase direkte Schall- und Erschütterungsereignisse	Flächenbelegung durch Gebäude	Gebundene Rohstoffe in den Baumaterialien Rohstoffnutzung im Sinne von Energie während der Bauphase	Ggf. Kollisionsrisiko für Avifauna bei Anlagenbestandteilen im Luftraum
Kraftwerke (im Sinne von Standort der Anlage) im Wasser (Über- und Unterwasser)	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbestand	ortsgebundene Kontamination des Wassers und des Bodens durch Schadstoffmigration aus den Fundamenten Auswirkungen unterir-	Lichtemissionen durch Anlagenbeleuchtung In der Errichtungsphase direkte Schall- und Erschütterungs-	Flächenbelegung durch Gebäude	Gebundene Rohstoffe in den Baumaterialien Rohstoffnutzung im Sinne von Energie während der Bauphase	Ggf. Kollisionsrisiko für Wasserlebewesen bei Anlagenbestandteilen im Wasser Ggf. Kollisionsrisiko

Prozess	Wirkpfad Luftgetragene Schadstoffe	Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden	Wirkpfad Schall-, Licht- und Wärme-emissionen	Wirkpfad Flächeninanspruchnahme	Wirkpfad Rohstoffnutzung	Wirkpfad direkte Auswirkungen/ Unfälle
		discher Gebäudeteile auf das Grundwasser	ereignisse		se	für Avifauna bei Anlagenbestandteilen im Luftraum
Übertragungs- und Verteilnetze (Freileitung)	Ggf. Partikelemissionen durch Korrosion	ortsgebundene Kontamination des Bodens durch Schadstoffmigration aus den Fundamenten Auswirkungen unterirdischer Gebäudeteile auf das Grundwasser	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbestand ggf. Beeinträchtigung durch elektromagnetische Felder (Elektrosmog)	Flächenbelegung durch Masten und Schutzstreifen	Gebundene Rohstoffe in den Baumaterialien Rohstoffnutzung im Sinne von Energie während der Bauphase	Ggf. Kollisionsrisiko für Avifauna bei Anlagenbestandteilen im Luftraum
Übertragungs- und Verteilnetze (Erdkabel)	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbestand	ortsgebundene Kontamination des Bodens durch Schadstoffmigration aus den Fundamenten Auswirkungen unterirdischer Gebäudeteile auf das Grundwasser	Bodenerwärmung durch Abstrahlwärme der Erdkabel ggf. Beeinträchtigung durch elektromagnetische Felder (Elektrosmog)	Flächenbelegung durch freizuhaltenden Schutzstreifen	Gebundene Rohstoffe in den Baumaterialien Rohstoffnutzung im Sinne von Energie während der Bauphase	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbestand
Umspannwerke	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbestand	ortsgebundene Kontamination des Bodens durch Schadstoffmigration aus den Fundamenten	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbestand	Flächenbelegung	Gebundene Rohstoffe in den Baumaterialien Rohstoffnutzung im	Risiko der SF6 Freisetzung bei Leckage oder Brand

Prozess	Wirkpfad Luftgetragene Schadstoffe	Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden	Wirkpfad Schall-, Licht- und Wärme-emissionen	Wirkpfad Flächeninanspruchnahme	Wirkpfad Rohstoffnutzung	Wirkpfad direkte Auswirkungen/ Unfälle
		menten Auswirkungen unterirdischer Gebäudeteile auf das Grundwasser			Sinne von Energie während der Bauphase	
Speicher (Pumpwasserspeicher)	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbestand	ortsgebundene Kontamination des Bodens durch Schadstoffmigration aus den Fundamenten Auswirkungen unterirdischer Gebäudeteile auf das Grundwasser	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbestand	Flächenbelegung	Gebundene Rohstoffe in den Baumaterialien Rohstoffnutzung im Sinne von Energie während der Bauphase	Ggf. direkte Organismtötung bei Überschwemmung durch Leckage
Wärmenetze (oberirdisch)	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbestand	ortsgebundene Kontamination des Bodens durch Schadstoffmigration aus den Fundamenten Auswirkungen unterirdischer Gebäudeteile auf das Grundwasser	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbestand	Flächenbelegung	Gebundene Rohstoffe in den Baumaterialien Rohstoffnutzung im Sinne von Energie während der Bauphase	Freisetzung von Heißdampf bei Leckage
Wärmenetze (unterirdisch)	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbestand	ortsgebundene Kontamination des Bodens durch Schadstoffmigration aus den Fundamenten Auswirkungen unterirdischer Gebäudeteile auf das Grundwasser	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbestand	Flächenbelegung durch	Gebundene Rohstoffe	Wärmeeintrag in den

Prozess	Wirkpfad Luftgetragene Schadstoffe	Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden	Wirkpfad Schall-, Licht- und Wärme-emissionen	Wirkpfad Flächeninanspruchnahme	Wirkpfad Rohstoffnutzung	Wirkpfad direkte Auswirkungen/ Unfälle
irdisch)	auswirkung durch den Anlagenbestand	mination des Bodens durch Schadstoffmigration aus den Fundamenten Auswirkungen unterirdischer Gebäudeteile auf das Grundwasser	auswirkung durch den Anlagenbestand	freizuhaltenden Schutzstreifen	in den Baumaterialien Rohstoffnutzung im Sinne von Energie während der Bauphase	Boden bei Leckage
Transporte für Energieträger	Emissionen aus dem Betrieb von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor	Deposition von Luftschadstoffen	Schall- und Wärmeemissionen von Verbrennungsmotoren	keine direkten Umweltwirkungen durch Fahrzeugbetrieb	Nutzung fossiler Rohstoffe als Brennstoff	keine direkten Umweltwirkungen durch Fahrzeugbetrieb
Pipeline	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbestand	ortsgebundene Kontamination des Bodens durch Schadstoffmigration aus den Fundamenten Auswirkungen unterirdischer Gebäudeteile auf das Grundwasser	keine direkte Umweltauswirkung durch den Anlagenbestand	Flächenbelegung durch Leitung, Servicegebäude und Schutzstreifen	Gebundene Rohstoffe in den Baumaterialien Rohstoffnutzung im Sinne von Energie während der Bauphase	Emissionen in Luft/ Wasser/ Boden bei Leckagen

Quelle: eigene Darstellung ifeu 2020

3.3.3 Referenzpunkte/ -jahre

Die Festlegung eines Referenzpunktes ist wesentlich für die Ergebnisse der Quantifizierung und Visualisierung der Entwicklung der Umweltwirkungen. Je früher der Referenzpunkt gewählt wird, umso länger ist die Beobachtungsphase für die Indikatoren, aber umso schlechter sind ggf. die verfügbaren Datengrundlagen. Für den Themenkomplex Energiewende bieten sich verschiedene Referenzzeitpunkte:

- Das Jahr 1990 als Bezugsjahr für die Minderung der Treibhausgasemissionen und als das Jahr in dem das Stromeinspeisungsgesetz (StromEinspG) verabschiedet wurde, das dem EEG vorausging.
- Das Jahr 1995 als Basisjahr für den nationalen Energieeffizienz-Aktionsplan.
- Das Jahr 2000 als Startpunkt der Energiewende (Einführung des EEG).
- Das Jahr 2005 als Bezugsjahr für die Minderung des Endenergiebedarfs im Verkehr.
- Das Jahr 2008 als Bezugsjahr für die Minderung des Primärenergiebedarfs, des Gebäudewärmebedarfs und des Strombedarfs (ohne Wärmepumpe und E-Mobilität, jedoch inkl. des Bahnverkehrs).

Darüber hinaus sind die festgelegten Zwischenstände bei den zu erreichenden Zielen mit zu berücksichtigen. Insbesondere für das Jahr 2020 sind verschiedene Zwischenziele definiert (bspw. -20% Primärenergiebedarf usw.). Das Bezugsjahr 1990 ist in dem Sinne problematisch, als das die DDR-Industrie- und Energieerzeugungsstruktur noch einen erheblichen Einfluss hat. Die nachfolgenden Entwicklungen bis ca. Mitte der 1990er Jahre sind eher Ausdruck der strukturellen Umbrüche in den fünf neuen Bundesländern als Auswirkungen einer Energie- oder Klimaschutzpolitik. Jedoch sind diese sogenannten „Wall Fall Profits“ wie z.B. die Luftreinhaltungseffekte mit der Nachrüstung der Großfeuerungsanlagen in den neuen Ländern Effizienzmaßnahmen deren Effekte auch in der Formulierung der aktuellen Klima- und sonstigen Umweltziele und auch der Ziele der Energiewende eingerechnet sind. Im Endeffekt ist zu vermuten, dass die Ziele ohne die wiedervereinigungsbedingten Effekte vermutlich anders ausgefallen wären.

Das Bezugsjahr 1995 bietet sich nicht wirklich an, da es eine enge thematische Verknüpfung mit dem Thema Energieeffizienz herstellt, das jedoch aufgrund der Systemraumdiskussion nicht im Fokus des Vorhabens steht (vgl. Kap. 3.3.2.6).

Das Bezugsjahr 2000 ist für das Umweltmonitoring der Energiewende aufgrund der Einführung des EEG als Referenzjahr thematisch passender. Zudem ist ab diesem Zeitpunkt der oben ausgeführte Effekt durch die Integration der DDR-Industrie- und Energieerzeugungsstruktur weitestgehend nivelliert. Auch ist die Datenverfügbarkeit für den Zeitraum einer Rückschau bis zum Jahr 2000 besser als bis zum Jahr 1990, einem Zeitraum, in dem viele Daten nur analog vorlagen und nachträglich digitalisiert wurden, was immer eine tendenziell erhöhte Fehlerwahrscheinlichkeit bedingt.

Die Bezugsjahre 2005 und 2008 adressieren lediglich Einzelkomponenten des Energiesystems (Verkehr und Gebäude). Für ein Monitoring, das explizit den gesamten Systemraum des Energiesystems in den Fokus nimmt, erscheinen diese Jahre nicht sachgerecht.

Als geeignete Referenzjahre kristallisieren sich somit die folgenden Jahre heraus:

- 1990 als international verwendetes Bezugsjahr für die Minderung der Treibhausgase

► 2000 als Beginn der Energiewende durch Einführung des EEG

Für 1990 als Referenzjahr spricht, dass es durch die internationale Konvention als Referenzjahr für die Bemühungen um den Klimaschutz gilt und die im Monitoring abgebildeten Umweltveränderungen somit mit der Reduktion der Treibhausgasemissionen ins Verhältnis gesetzt werden können. Gegen 1990 sprechen Probleme mit der Datenverfügbarkeit und ggf. Datenqualität sowie die möglicherweise in Kauf genommene Verfälschung aufgrund der Integration der DDR-Industrie- und Energieerzeugungsstruktur. Zudem erschweren die großen Sprünge in einzelnen Indikatoren zwischen 1990 und 2018 die Lesbarkeit einer grafischen Darstellung der Indikatoren als Zeitreihe.

Für das Jahr 2000 sprechen die bessere Datenverfügbarkeit und Datenqualität sowie der klare Bezug zum EEG. Jedoch passt ein Referenzjahr 2000 nicht zu den kommunizierten prozentualen Treibhausgasminderungen der Energiewende.

Insofern wird vorgeschlagen im Rahmen des Monitorings der Energiewende zukünftig zwei Referenzjahre zu führen. Wo immer datenseitig abbildbar soll das Jahr 1990 als Referenzjahr dienen, wenn die im Monitoring abgebildeten umweltseitigen Veränderungen mit den Treibhausgasminderungen in Relation gesetzt werden sollen.

Wenn es - wie im weiteren Verlauf des vorliegenden Forschungsvorhabens - um die interne Bewertung der Veränderung des Umweltzustandes durch das Fortschreiten der Energiewende geht, ist das Referenzjahr 2000 heranzuziehen. Wirklich aussagekräftig ist ohnehin allein der Blick auf die Zeitreihe. Nur so ist eine Aussage möglich, ob es sich bei der Veränderung um einen ggf. kurzzeitigen oder gar einmaligen Effekt oder einen Trend handelt. Daher sind im Rahmen der Indikatorenauswahl bzw. -entwicklung solche Indikatoren vorzuziehen, die eine numerische Darstellung in Form von Zeitreihen zulassen. Dabei ist zu beachten, dass die amtliche Energiestatistik, die eine der Grundlagen für das geplante Umweltmonitoring ist, auf absoluten Zahlen basiert und den jährlichen Energieverbrauch in Deutschland miteinschließt. Dieser unterliegt einem jährlichen Wandel, der durch viele Faktoren beeinflusst wird (Demografie, Wirtschaftsleistung, Temperatur etc.). Dies bedingt, dass ein Zeitreihenvergleich der Umweltauswirkungen auch immer diese Faktoren impliziert, was unter Umständen zu Verzerrungen hinsichtlich vergleichender Aussagen zu den Umwelteffekten der Energiewende führen kann.

3.4 Fazit zur Definition des Monitoringkonzeptes

Zur Auswahl, Betrachtung und Bewertung der Umweltauswirkungen wird das aus dem UVPG bekannte Schutzgutkonzept genutzt und erweitert. Insofern werden die durch das Fortschreiten der Energiewende intendierten Umweltveränderungen anhand ihrer **Auswirkungen** auf die Schutzgüter betrachtet und soweit möglich bewertet. Die Beschreibung der Umweltveränderungen entlang der Schutzgüter ist somit die **Bewertungsebene** im Modell.

Die Indikatoren stellen die **quantifizierbare Ebene** des Bewertungskonzeptes dar. Hier werden die Umweltauswirkungen der einzelnen Elemente des Energiesystems quantifiziert. Auf dieser Ebene werden also verschiedene umweltrelevante Einzelaspekte als Zeitreihe numerisch dokumentiert. Anhand der Veränderung in der Zeitreihe können die in den Indikatoren abgebildeten Umwelteffekte bewertet werden. Die Identifikation und Ableitung der Indikatoren ist Aufgabe des Kapitels 4.

Die **Zuordnung** der Indikatoren zu den Schutzgütern – also die Verknüpfung der Ebene der Quantifizierung (Indikator) mit der Bewertungsebene (Auswirkung auf die Schutzgüter des UVPG inkl. Ressource exkl. Klima) erfolgt über die Wirkpfade. Diese Wirkpfade geben an, auf

welchem Weg eine mögliche Umweltwirkung von der Quelle auf das Schutzgut wirkt (bspw. Emissionen über den Luftpfad oder Wärmeeintrag über Kühlwassereinleitung in Gewässer).

Die **Systemgrenze** des Monitoringkonzeptes geht im Kern von den Umweltauswirkungen der einzelnen Konzepte zur Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie und weitere Energieinfrastrukturen aus (Territorialprinzip). Wo möglich und/ oder nötig werden Vorketten und Infrastrukturen mitberücksichtigt. In der Praxis wird der Systemraum jeweils spezifisch auf die Wirkpfade und Indikatoren anzupassen sein. Abweichungen vom hier beschriebenen – generell zugrunde gelegten – Systemraum werden in Kapitel 4 bei der Ableitung der Indikatoren dargelegt und dokumentiert.

Das Umweltmonitoring der Energiewende führt zwei **Referenzjahre** mit. Zum einen das Jahr 1990, um eine Vergleichbarkeit mit der Treibhausgasberichterstattung herstellen zu können. Ein zweites, eher internes Referenzjahr ist das Jahr 2000 das üblicherweise als Startpunkt der Energiewende gilt. Dieses Referenzjahr wird im Bericht als alleiniges Referenzjahr mitgeführt, da es bei der Erarbeitung der Ergebnisse insbesondere um die Bewertung einer Zeitreihe geht (interne Bewertungsebene).

Das Monitoring selbst ist auf der quantifizierbaren Ebene im Sinne einer Zeitreihendarstellung angelegt, um die Trends in den Umweltveränderungen zu bewerten. Somit erfährt die Frage nach dem Referenzjahr weniger Bedeutung als in einem Programm, das auf eine prozentuale Reduktion gegenüber einem definierten Startpunkt zielt.

4 Ableitung der Indikatoren

Ziel dieses Kapitels ist es, die Ebene der Indikatoren mit numerischen Werten zu bedienen (bspw. Menge an einem definierten Luftschadstoff pro Jahr). Durch das fortlaufende Monitoring zeigen sich Veränderungen in den Zahlen, die als positiv oder negativ gewertet werden können. Für einzelne Indikatoren sind Ziele festgelegt. Das Erreichen dieser Ziele wird bei der Bewertung der Zahlenreihen berücksichtigt. Die Bewertung, ab wann Veränderungen positiv oder negativ sind, wird anschließend in der Diskussion um jeden Indikator eigenständig geführt.

Die einzelnen über die Wirkpfade den Schutzgütern zugeordneten Indikatoren zeigen dann jeweils positive oder negative Veränderungen. In der Gesamtschau kann dann für jedes Schutzgut eine positive oder negative Entwicklung konstatiert werden. Die Auswertung für die einzelnen Schutzgüter und für alle Schutzgüter zusammen (unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen) erfolgt im nächsten Schritt auf einer verbal argumentativen Ebene.

4.1 Grundlegende Anforderungen bei der Ableitung/ Entwicklung der Indikatoren

4.1.1 Allgemeine Anforderungen

Übergeordnetes Ziel eines indikatorbasierten Umweltmonitorings ist es, dass die Gesamtheit der Indikatoren den Transformationsprozess des Energiesystems hinsichtlich der relevanten Umwelteffekte im Zeitverlauf vollständig abbildet und dabei ein realistisches Gesamtbild der Umwelteffekte des Energiesystems und ihrer Veränderung im Zeitverlauf darstellt. Dabei sollten die Indikatoren und ihre Wirkungsspektren so gewählt werden, dass sie gleichwertig bzw. äquidistant sind sowie sich möglichst wenig überschneiden und so ein homogenes Gesamtbild des Wirkungsspektrums des Energiesystems darstellen.

Die jeweiligen Indikatoren sollen die über den jeweiligen Wirkpfad indizierten Veränderungen am Zustand der jeweilig adressierten Schutzgüter und somit in der Gesamtschau aller Schutzgüter auch der Umwelt beschreiben. Es werden die folgenden Anforderungen an die Indikatoren gesetzt:

- ▶ **Relevanz:** Ist die Anzahl der Indikatoren hoch, muss ggf. eine Priorisierung durchgeführt werden. Dabei hilft die Einordnung der Relevanz der Indikatoren auf Basis der bereits im Projekt erarbeiteten Erkenntnisse. Diese Relevanz kann für verschiedene Sichtweisen unterschiedlich ausfallen: der umweltwissenschaftlichen, politischen und öffentlich/ medialen Relevanz.
- ▶ **Aussagekraft und Repräsentativität:** Die Indikatoren müssen aussagekräftig stellvertretend für die Umweltwirkungen des Energiesystems stehen. Dies bedeutet, dass folgende Kriterien so gut als möglich erfüllt sein sollen:
 - Die Indikatoren beschreiben ausschließlich oder zumindest überwiegend die Wirkungen des Energiesystems
 - Jeder Indikator deckt hinsichtlich der durch ihn beschriebenen Wirkungen einen möglichst konkret abgegrenzten Teil des Wirkungsspektrums des Energiesystems ab.
 - Die Indikatoren und deren Darstellung sind verständlich und gut interpretierbar
- ▶ **Berechenbare Indikatoren:** Die Indikatoren sollen quantifizierbar sein (in Zahlen ausgedrückte Umweltwirkungen) und sich als Zeitreihe abbilden lassen, um die Veränderungen des Umweltzustandes im Verlauf darzustellen.

- **Bewertbarkeit der Veränderungen:** Bestehende Schutz- und Reduktionsziele sollen in den Indikatoren abbildbar sein. So ist bspw. die Betrachtung einer Reduktion der Emissionen von Luftschadstoffen notwendig für eine positive Bewertung aber nicht immer hinreichend - So soll auch die Höhe der Reduktion betrachtet werden: nur wenn sie hinreichend ist und auch die Bemühungen geeignet erscheinen, das festgelegte Reduktionsziel innerhalb der Zeitschiene zu erreichen, kann die Minderung uneingeschränkt positiv bewertet werden.
- **Regionalbezug:** Umweltwirkungen können einen geringen (grenzüberschreitende Effekte) oder hohen Regionalbezug (lokale Belastungen) aufweisen. Dies ist bei der Auswahl von repräsentativen Indikatoren entsprechend zu berücksichtigen, da je nach Ursache-Wirkungs-Beziehung die Aussagekraft verschieden ist. Z. B. können für die Darstellung von Emissionen zu grenzüberschreitenden Luftschadstoffen Jahreswerte auf gesamtdeutscher Ebene verwendet werden. Für die Darstellung von Immissionen tritt dagegen die konkrete Belastungssituation vor Ort in den Fokus, so dass hier ggf. räumlich differenzierte Datensätze erforderlich werden.

4.1.2 Anforderungen an die Daten

Um für relevante Umweltwirkungen auch tatsächlich eine Quantifizierung vornehmen zu können, sind Mindestanforderungen an verfügbare Daten zu stellen:

- **Anforderungen an die Datenquellen:** Die Datenquelle sollte unabhängig und transparent sein. Darüber hinaus nach Möglichkeit kostenfrei öffentlich verfügbar sein und einem Aktualisierungsrhythmus unterliegen, der die Daten aktuell (nicht älter als 5 Jahre) hält.
 - Die Unabhängigkeit der Datenquelle wird unterschieden nach: amtlich, halbamtlich, Verbandsstatistik, sonstige Erhebung Dritter, Einzelstudie
 - Die Transparenz der Datenquelle wird unterschieden nach: umfassend, teilweise, keine
 - Der Rhythmus der Aktualisierung wird als Zeitraum angegeben
 - Die Datenverfügbarkeit wird unterschieden als frei verfügbar, auf Nachfrage verfügbar, kostenpflichtig
- **Kriterien an die Datenbasis:** Im Idealfall handelt es sich um vollständige, genaue Zeitreihen mit hoher inhaltlicher Kohärenz (d.h. möglichst großer Anschlussfähigkeit und geringer Unstimmigkeit). Eine Qualitätssicherung sollte öffentlich zugänglich sein.
- **Kriterien an die Indikatorableitung:** Der Aufwand der Indikatorableitung sollte nach Möglichkeit gering ausfallen. Somit wird unterschieden nach:
 - Primärstatistik direkt nutzbar,
 - Aufbereitung mit geringem Aufwand,
 - Aufbereitung mit hohem Aufwand

4.1.3 Vom Bewertungsmodell zum Indikator

Die Erarbeitung eines Sets an Indikatoren erfolgt in mehreren Schritten. Zunächst ist die Frage zu betrachten, welche Indikatoren notwendig wären, um den jeweiligen Wirkpfad adäquat zu beschreiben (das so genannte „Denkmodell“). Erst in einem zweiten Schritt werden dann die vorhandenen Daten mit den hierfür notwendigen Datenbedarfen abgeglichen, realisierbare Indikatoren vorgeschlagen, und Lücken aufgezeigt. Prinzipiell gibt es bei der Erarbeitung der Indikatoren folglich drei mögliche Situationen:

- ▶ Es existiert ein „Denkmodell“ welche Indikatoren den entsprechenden Wirkpfad hinlänglich beschreiben und die identifizierten Indikatoren sind mit verfügbaren Daten bedienbar.
- ▶ Es existiert ein „Denkmodell“ welche Indikatoren den entsprechenden Wirkpfad hinlänglich beschreiben, doch die identifizierten Indikatoren sind nicht mit verfügbaren Daten bedienbar. Hier ist zu prüfen, wie groß der Abstand zwischen verfügbaren Daten und den für das Denkmodell als erforderlich erachteten Daten ist und ob unter Hinnahme qualitativer Abstriche dennoch eine Quantifizierung möglich ist.
- ▶ Es kann kein schlüssiges Denkmodell erarbeitet werden, weil die Wirkungszusammenhänge nicht auf der für das Umweltmonitoring notwendigen Ebene abgeleitet werden können.

Die erste Situation ist sicherlich die wünschenswerte, die letztere begründet womöglich weiteren Forschungsbedarf. Der Mittelweg ist in der Praxis der häufigste und sollte mit Augenmaß beschritten werden.

4.2 Wirkpfad luftgetragene Schadstoffe

4.2.1 Definition

Als Luftschadstoffe werden gem. der EU-Luftqualitätsrichtlinie (Richtlinie 2008/50/EG) alle Beimengungen der Luft bezeichnet, welche die menschliche Gesundheit und/oder die Umwelt insgesamt gefährden können. Im Rahmen des im F&E Vorhaben zu entwickelnden Bewertungskonzeptes liegt der Fokus ausschließlich auf anthropogenen Luftschadstoffen, da hier die Umweltwirkungen des Energiesystems betrachtet werden sollen.

4.2.2 Rechtliche Regelungen

Es gibt verschiedene internationale und nationale Regelungen, die den Bereich der Luftschadstoffe adressieren. Diese setzen entweder an den Emissionsquellen (z. B. Emissionsgrenzwerte der 13. BImSchV, TA-Luft, u. v. m.), den nationalen Emissionsfrachten (NEC-RL/43.BImSchV, etc.) oder bei der Begrenzung der Auswirkungen (Luftqualitätsrichtlinie inkl. Immissionsgrenzwerte, etc.) an. Die erst kürzlich novellierte NEC-Richtlinie (EU) 2016/2284 gibt prozentuale Reduktionsverpflichtungen der jährlichen nationalen Emissionen für fünf definierte Luftschadstoffe (SO₂, NO_x, NH₃, NMVOC und PM_{2.5}) ab 2020 sowie ab 2030 gegenüber den Emissionen des Jahres 2005 vor. Die Inhalte der novellierten NEC-Richtlinie werden mit der 43. BImSchV in nationales Recht umgesetzt. Ziel der novellierten NEC-Richtlinie ist es, die Luftqualität, insbesondere die Feinstaubbelastung, insgesamt zu verbessern und die Stoffeinträge zu verringern. Der Nutzen der vorgeschriebenen Emissionsreduktionen wird insbesondere darin gesehen, den der Feinstaubbelastung attributablen Anteil der Todesfälle in der EU um etwa 50 % im Vergleich zum Jahr 2005 zu verringern. Auch negative Auswirkungen auf Ökosysteme sollen sich dadurch deutlich reduzieren.

Ausgehend von der Genfer Luftreinhaltekonvention der UN ECE sind in verschiedenen Protokollen Verpflichtungen zur Emissionsminderung verankert. Das nationale Recht betreibt mit dem BImSchG und seinen nachgelagerten Verordnungen und Verwaltungsvorschriften Vorsorge vor schädlichen Umweltauswirkungen durch Luftschadstoffemissionen und genügt dabei den europarechtlichen Vorschriften und den vorgenannten Protokollen der UN ECE oder geht über diese Anforderungen im Einzelfall auch hinaus.

4.2.3 Berichtspflichten und Daten zur Erfolgskontrolle

Zur Erfolgskontrolle gehen Emissionsreduktionsverpflichtungen des Europarechts und/oder der UN ECE in der Regel mit Berichtspflichten einher, die vom Umweltbundesamt vorbereitet wer-

den und über die ZSE-Datenbank (Zentrales System Emissionen) erfolgen. In der Datenbank werden Emissionen von 27 Luftschadstoffen und Treibhausgasen berechnet. Die nationalen Jahresemissionssummen für die Luftschadstoffe werden anhand von quellgruppenspezifischen Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren bilanziert und im NFR-Format (Nomenclature for Reporting) berichtet.

Auch das Europäische Schadstoff-Freisetzungs- und Verbringungsregister (PRTR, abrufbar unter <https://www.thru.de/thrude/>), in dem in Summe 91 Schadstoffe geführt werden, dient der Erfüllung von Berichtspflichten zu anlagenbezogenen Emissionsfrachten aus Emissionsmessungen und -berechnungen. Es handelt sich jedoch nicht um eine Vollerfassung, da nur Emissionen ab einer bestimmten Größenordnung und nur aus größeren Anlagen von Energiewirtschaft, Industrie und Landwirtschaft berichtet werden.

4.2.4 Der Wirkpfad Luftschadstoffe im Bewertungsmodell

Das entwickelte Bewertungsmodell nutzt die im UVPG definierten Schutzgüter für die Visualisierung und Bewertung der Veränderungen am Umweltzustand. Die Identifikation der Betroffenheit der Schutzgüter erfolgt über das Wirkpfadmodell. Den Wirkpfaden kommt dabei die Rolle der (Zu)Ordnung und der Bündelung von Indikatoren zur Beschreibung der Umweltauswirkungen zu. Beschrieben werden die Wirkpfade mittels der ausgewählten bzw. erarbeiteten Indikatoren.

Luftschadstoffe wirken selbstverständlich auf das Schutzgut Luft (im Sinne der Luftqualität) und auf direktem Wege (also durch Einatmen) auf die Schutzgüter Menschen (menschliche Gesundheit) und Tiere, sowie aufgrund versauernder und eutrophierender Wirkung auf die Schutzgüter Pflanzen und Kulturelles Erbe (Saurer Regen). Die Schutzgüter Boden und Wasser sind darüber hinaus durch die Deposition von Luftschadstoffen betroffen.

4.2.5 Systemraum und Ableitung der Indikatoren für den Wirkpfad Luftschadstoffe

4.2.5.1 Auswahl der Indikatoren

Für den Wirkpfad Luftschadstoffe werden die folgenden Indikatoren als geeignet für die Abbildung der Umweltauswirkungen der Energiewende bewertet:

- ▶ Emissionen von Stickstoffoxid (NO_x als NO_2) in kt/ Jahr
aufgrund der sehr hohen Emissionslast aus den Sektoren der Energiewende, der guten Datenqualität und der distance-to-target Bewertbarkeit aufgrund eines in der NEC Richtlinie festgelegten Mengenkontingentes
- ▶ Emissionen von Schwefeldioxid (Schwefelverbindungen ausgedrückt als SO_2) in kt/ Jahr
aufgrund der sehr hohen Emissionslast aus den Sektoren der Energiewende, der guten Datenqualität und der distance-to-target Bewertbarkeit aufgrund eines in der NEC Richtlinie festgelegten Mengenkontingentes
- ▶ Emissionen von Ammoniak (NH_3) in kt/ Jahr
Aufgrund der Relevanz für die Bewertbarkeit der Ausbringung von Rückständen der in Biogasanlagen eingesetzten Energiepflanzen sowie Lagerung von Gärresten, der guten Datenqualität und der distance-to-target Bewertbarkeit aufgrund eines in der NEC Richtlinie festgelegten Mengenkontingentes
- ▶ Emissionen von Feinstaub PM 2,5 in kt/ Jahr
aufgrund der hohen Emissionslast aus den Sektoren der Energiewende (mit 42% sehr nah am Schwellenwert von 50%), der guten Datenqualität und der distance-to-target Bewertbarkeit aufgrund eines in der NEC Richtlinie festgelegten Mengenkontingentes

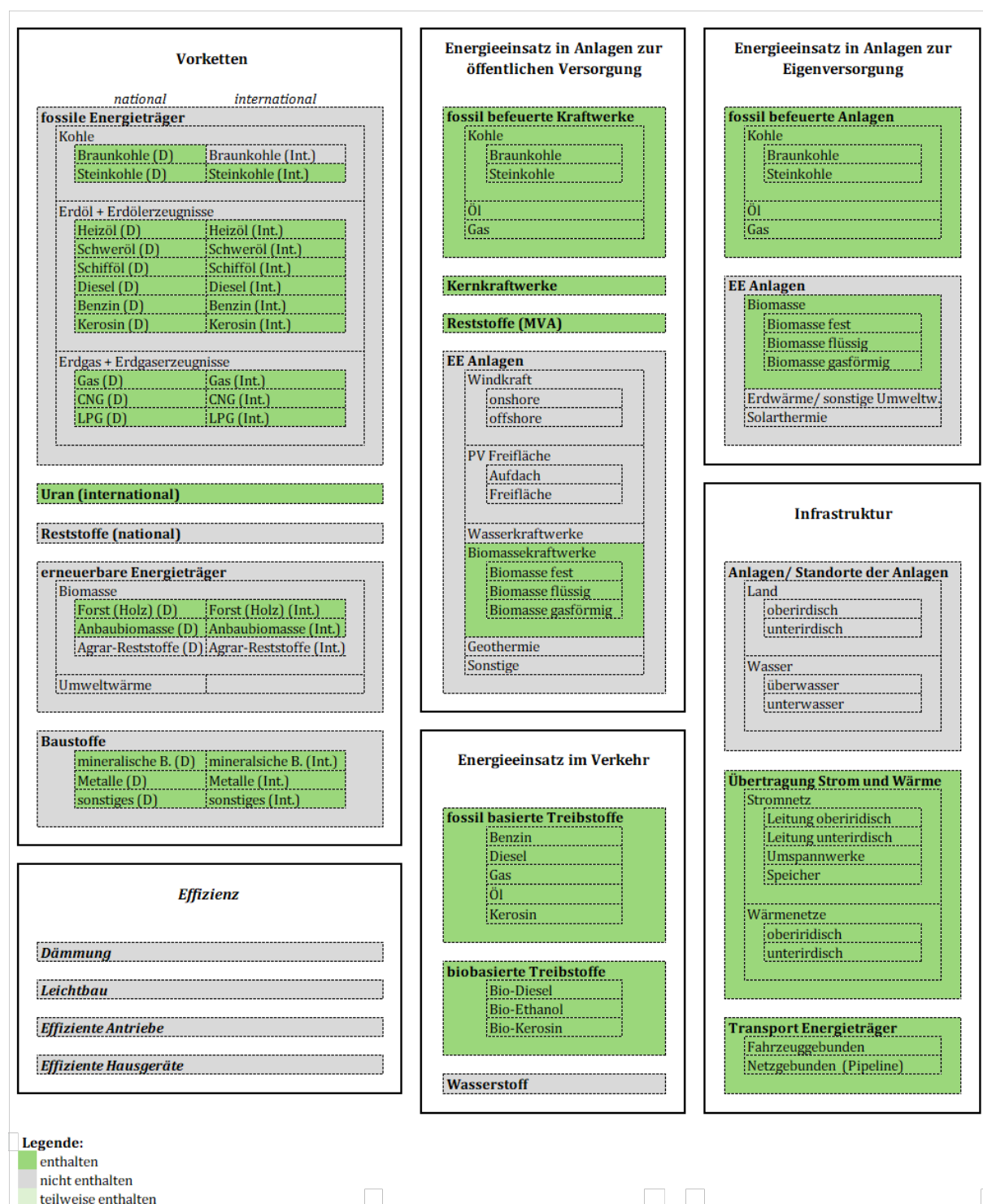
- ▶ Emissionen von Black Carbon in kt/ Jahr
aufgrund der hohen Emissionslast aus den Sektoren der Energiewende und der guten Datenqualität und als Proxy-Indikator für die Emissionen aus kleinen Holzfeuerungsanlagen
- ▶ Emissionen von Kohlenmonoxid (CO) in kt/ Jahr
aufgrund der hohen Emissionslast aus den Sektoren der Energiewende und der guten Datenqualität
- ▶ Emissionen von Quecksilber (Hg) in t/ Jahr
aufgrund der sehr hohen Emissionslast aus den Sektoren der Energiewende und der vergleichsweise ausreichenden Datenqualität – auch als Proxy-Indikator für Schwermetalle
- ▶ Attributable in Deutschland (Fälle/Jahr) durch die Luftschadstoffe PM_{2,5}, NO₂ und Ozon

4.2.5.2 Systemraum

Der in Kapitel 3.3.2 definierte Systemraum kann für den Wirkpfad Luftschadstoffe auf die Prozesse eingegrenzt werden, die Luftschadstoffe emittieren. Diese sind in der nachfolgenden Abbildung 8 grün markiert (Ausnahme Braunkohle, da in der Gesamtschau fast nur innerdeutsche Braunkohle eingesetzt wird). Die Übertragungsnetze emittieren zwar selber keine oder nur in sehr geringem Umfang Luftschadstoffe sind jedoch ursächlich für Leitungsverluste und führen somit zu höheren Luftschadstoffen, da für eine verbrauchte Einheit einer definierten Energie eine bestimmte Einheit Energie + x hergestellt werden muss (dabei ist x abhängig vom spezifischen Leitungsverlust). Dieses „+ x“ ist in den Daten zu den Luftschadstoffen bereits enthalten, da diese ja auf den Energieeinsatz zur Deckung des Energiebedarfs referenzieren.

Im Systemraum sind als „Soll-Anforderung“ auch alle internationalen Energieträgervorketten enthalten. In wie weit diese Anforderung erfüllbar ist, wird Gegenstand der Betrachtung in Kapitel 4.2.5.3 sein.

Abbildung 8: Zu betrachtender Systemraum für den Wirkpfad Luftschadstoffe



Quelle: eigene Darstellung ifeu 2020

4.2.5.3 Ableitung der Indikatoren

Denkmodell

Für die Ableitung der Indikatoren für den Wirkpfad Luftschadstoffe wird untersucht, welche Datenbasis zum Thema Luftschadstoffe bereits vorliegt und wie diese für das im F&E Vorhaben definierte Bewertungskonzept nutzbar gemacht werden kann. Mit den NFR Tabellen für die Berichterstattung von Luftschadstoffen liegt eine umfassende vom UBA erstellte und publizierte

Datenbasis vor, die als Grundlage herangezogen wurde¹¹. Die wesentlichen Anforderungen an die Datenbasis hinsichtlich Unabhängigkeit, Transparenz und Rhythmus der Aktualisierung sind damit direkt positiv bewertet. Die Fortschreibbarkeit der Datenbasis ist unter Zuhilfenahme bestehender Berichtspflichten leichter realisierbar. Da die Abgrenzung „Energiewende“ jedoch nicht deckungsgleich mit der Sektorendefinition innerhalb der NFR Tabellen ist, bedarf es einer speziellen Auswertung, die durch das UBA vorgenommen wird. Alternativ können die Daten zu den Emissionen auch den umweltökonomischen Gesamtrechnungen entlehnt werden oder auf Basis des Energieträgereinsatzes in die Prozesse im Systemraum Energiewende neu und eigenständig berechnet werden. Diese Bilanzierung könnte dann bspw. mittels eines Ökobilanzmodells erfolgen. Vorteilhaft wäre sicherlich die größere Freiheit bei der Wahl der Indikatoren zur Bewertung der Umweltauswirkungen, die direkt auf die einzelnen Umweltproblemfelder zugeschnitten erscheinen wie bspw. Human- und Ökotoxizität, Eutrophierung und Versauerung, Klimawandel etc. Ebenso erscheint bei diesem Ansatz das Risiko, wichtige Emittenten nicht zu berücksichtigen, geringer. Nachteilig ist jedoch die Etablierung eines konkurrierenden Berechnungssystems neben der bereits existierenden Emissionsberichterstattung unter dem Rahmen der Genfer Luftreinhaltekonvention, die konsistent zur der im Monitoring Energie der Zukunft bereits heran gezogenen Quantifizierung der THG-Emissionen ist. In Tabelle 7 werden die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Modellierungsansätze noch einmal zusammengefasst.

Tabelle 7: Vor- und Nachteile der verschiedenen Datengrundlagen und Modellierungsansätze

Methode der Indikatorenableitung	Vorteile	Nachteile
teilweise Nutzung vorhandener Emissionsdaten auf Basis der NFR Tabellen	UBA eigene Daten Eingrenzung auf den zu betrachtenden Systemraum „Energiewende“ weitestgehend möglich	Zusatzaufwand, da Auswertung zwingend durch UBA im Rahmen der Datenbank Zentrales System Emissionen (ZSE) erfolgen muss
Nutzung vorhandener Emissionsdaten auf Basis der umweltökonomischen Gesamtrechnungen	Datenbestand des StaBa	Eingrenzung auf den zu betrachtenden Systemraum „Energiewende“ evtl. nicht möglich
eigenständiges Ökobilanzmodell mit publizierten Aktivitätsdaten (AGEB, AGEE Stat) als Inputparameter zur Ableitung von Emissionen	100% Abdeckung des zu betrachtenden Systemraums „Energiewende“ Freiheit bei der Wahl der Indikatoren	Konkurrierendes System zum NFR – Ergebnisse werden nicht deckungsgleich sein Passende Emissionsfaktoren nicht vollumfänglich verfügbar Unterschiedliche Ergebnisse je nach Allokationsmethode und Bilanzraum

Quelle: eigene Darstellung ifeu 2020

In Abwägung der Vor- und Nachteile wird das Modell auf Basis von Ökobilanzmodellen an dieser Stelle nicht weiter verfolgt jedoch sollen Elemente des Modells für die Auswahl der NFR Sekto-

¹¹ Weitere potenzielle Datenquellen wie das Schadstoffemissionsregister E-PRTR sowie Daten zu Critical Loads wurden untersucht und für die Ableitung der Indikatoren schlussendlich verworfen: In E-PRTR sind nur stationäre Anlagen ab einer bestimmten Größenordnung gelistet, was die Auswahl an Prozessen im Systemraum der Energiewende massiv einschränkt. Zudem sind keine komplementären Inventare für die Prozesse in den Sektoren Mobilität und Raumwärme verfügbar. Das System der Critical Loads und Critical Levels adressiert die Ebene der Immission. Diese sind jedoch derzeit datenseitig nicht auf die Verursacher herunter zu brechen, sprich, es kann nur die Gesamtmenge aller Immissionen in Deutschland bewertet werden, nicht aber die Menge der Immissionen, die durch die Aktivitäten im Zusammenhang mit der Energiewende hervorgerufen werden.

ren genutzt werden. Für die Verwendung als Indikator müssen die Inhalte der ZSE-Datenbank des UBA entsprechend der Prozesse abgefragt werden, die im Systemraum der Energiewende zu finden sind (vgl. Kap. 3.3.2).

In den Indikatoren abbildbarer Systemraum

Die Abgrenzung dieser Sektoren ist nicht in allen Fällen identisch mit den Prozessen innerhalb des Systemraums der Energiewende. So sind bspw. die Anlagen zur Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie für die Industrie dem Sektor „B_Industry“ zugeordnet und aus den publizierten Daten nicht weiter extrahierbar. Doch für die interne Berechnung können die NFR Codes durch das UBA noch weiter aufgelöst werden. Anhand dieser Auflösung konnte grob bestimmt werden welche NFR Codes für eine sachgerechte Abbildung der Luftschadstoffemissionen des Systemraums Energiewende nach Maßgabe der für das F&E Vorhaben geltenden Systemraumdefinition zu berücksichtigen sind. Für die zu quantifizierenden Luftschadstoffe werden die NFR Codes bewertet, ob sie vollständig, teilweise oder gar nicht dem Systemraum der Energiewende zuzuordnen sind. Als NFR Codes, deren enthaltende Prozesse vollständig dem Systemraum zuzuordnen werden demnach identifiziert¹²:

- ▶ **NFR Code A_PublicPower (1A1a) Public electricity and heat production**
Die Quellenkategorie Öffentliche Strom- und Wärmeerzeugung umfasst Fernwärmeanlagen und die Strom- und Wärmeerzeugung von Kraftwerken. Die Abfallverbrennung ist ebenfalls enthalten.
- ▶ **NFR Code B_Industry (1A1b) Petroleum refining**
Die Quellenkategorie Erdölraffination umfasst sowohl Raffinerieunterfeuerungen als auch die Strom- und Wärmeproduktion von Raffineriekraftwerken.
- ▶ **NFR Code B_Industry (1A1c) Manufacture of solid fuels and other energy industries**
Die Quellenkategorie Herstellung von festen Brennstoffen und anderen Energieindustrien umfasst Kraftwerke des Steinkohle- und Braunkohlebergbaus, Kokerei- und Brikettfabriken sowie die Förderung von Erdöl und Erdgas. Auch Altölverarbeitungsanlagen sind enthalten. CO-Emissionen aus Kokereien werden in der Quellenkategorie 1.B.1 Feste Brennstoffe Unterkategorie 1.B.1.b. - alle anderen Schadstoffe werden in der Quellenkategorie 1.A.1.c. erfasst.
- ▶ **NFR Codes H_Aviation (1A3ai(i)) International aviation LTO (civil) und H_Aviation (1A3aii(i)) Domestic aviation LTO (civil)**
Die Quellenkategorie internationale Zivilluftfahrt umfasst die Emissionen während der Start- und Landephase internationaler Flugverbindungen (0-3.000 Fuß), die Quellenkategorie nationale Zivilluftfahrt umfasst die Emissionen während der Start- und Landephase von Inlandsflügen (0-3.000 Fuß).
- ▶ **NFR Codes F_RoadTransport (1A3bi) Road transport: Passenger cars; F_RoadTransport (1A3bii) Road transport: Light duty vehicles, F_RoadTransport (1A3biii) Road transport: Heavy duty vehicles and buses; F_RoadTransport (1A3biv) Road transport: Mopeds & mo-**

¹² Die inhaltliche Kurzbeschreibung ist den Informationen des *German Informative Inventory Report* entnommen, der unter der Web-Adresse <https://iir-de.wikidot.com/einsehbar> ist.

torcycles und F_RoadTransport (1A3bv) Road transport: Gasoline evaporation

In der Quellenkategorie Straßenverkehr werden Emissionen aus der Verbrennung von Kraftstoffen sowie abrasive und flüchtige Emissionen in folgender Unterteilung gemeldet:

- Personenkraftwagen (1.A.3.b i), leichte Nutzfahrzeuge (1.A.3.b ii), schwere Nutzfahrzeuge (falls nicht gesondert ausgewiesen: einschließlich Busse) (1.A.3.b ii), Motorräder (falls nicht gesondert gemeldet: einschließlich Mopeds) (1.A.3.b iv)
- In Kategorie 1.A.3.b v - Straßenverkehr werden flüchtige Emissionen aus der Verdunstung von Benzin aus Straßenfahrzeugen gemeldet.

Die Emissionen des motorisierten Straßenverkehrs in Deutschland umfassen den Verkehr auf öffentlichen Straßen innerhalb Deutschlands, ausgenommen land- und forstwirtschaftliche Transporte und militärische Transporte.

► NFR Code I_Offroad (1A3c) Railways

In der Kategorie Eisenbahnen werden Emissionen aus der Kraftstoffverbrennung bei deutschen Eisenbahnen und aus dem damit verbundenen Abrieb und Verschleiß von Fahrleitung, Bremssystemen und Reifen auf Schienen gemeldet.

► NFR Codes G_Shipping (1A3di(ii)) International inland waterways und G_Shipping (1A3dii) National navigation (shipping)

Es werden alle Aktivitätsdaten der Binnenschifffahrt den Emissionen in der Quellenkategorie 1.A.3.d ii - Nationale Schifffahrtsemissionen zugeordnet und entsprechend berichtet.

► NFR Code I_Offroad (1A3ei) Pipeline transport

Unter der Quellenkategorie Pipelinetransport werden Emissionen von Kompressoren für den Transport von Erdgas gemeldet.

► NFR Code C_OtherStationaryComb (1A4bi) Residential: Stationary

Unter der Quellenkategorie werden Emissionen aus tendenziell kleinen Verbrennungsanlagen in Wohngebäuden gemeldet, was vor allem den gesamten Bereich der Wohngebäudeheizung umfasst.

► NFR Codes D_Fugitive (1B1a) Fugitive emission from solid fuels: Coal mining and handling; D_Fugitive (1B1b) Fugitive emission from solid fuels: Solid fuel transformation und D_Fugitive (1B1c) Other fugitive emissions from solid fuels

Die Quellenkategorie feste Brennstoffe besteht aus drei Unterquellenkategorien - der Quellenkategorie Kohlebergbau (1.B.1.a), der Quellenkategorie Kohleumwandlung (1.B.1.b) und der Quellenkategorie Sonstige (1.B.1.c). In diesen Kategorien werden flüchtige Emissionen aus dem Kohlebergbau, dem Kohleumschlag und Koksgewinnung berichtet (Emissionen des Ofens werden in Kategorie 1.A.1.c). Der Bergbausektor wird unterschieden in Tagebau und geschlossene Gruben unter Tage. In Deutschland wurde Steinkohle nur Untertage abgebaut (eingestellt Ende 2018), während Braunkohle seit 2003 nur noch im Tagebau in vier Feldern abgebaut wird.

► NFR Codes: D_Fugitive 1B2ai Fugitive emissions oil: Exploration, production, transport, D_Fugitive 1B2aiv Fugitive emissions oil: Refining / storage, D_Fugitive 1B2av Distribution of oil products, D_Fugitive 1B2b Fugitive emissions from natural gas (exploration, produc-

tion, processing, transmission, storage, distribution and other) und D_Fugitive 1B2c Venting and flaring (oil, gas, combined oil and gas)

Die Quellenkategorie 1.B.2 umfasst insgesamt 14 Unterkategorien. Für den gewählten Systemraum sind die folgenden zu berücksichtigen:

- Emissionen aus 1.B.2.a.i - Exploration, Produktion, Transport bestehen aus Emissionen, die aus den Aktivitäten von Bohrunternehmen und anderen Teilnehmern des Explorationssektors stammen. Die Exploration von Gas und Öl findet in Deutschland statt.
 - Emissionen der Kategorie 1.B.2.a.iv - Raffination / Lagerung bestehen aus Emissionen aus den Aktivitäten von Raffinerien und Raffinerieunternehmen der Erdölindustrie. In Deutschland werden Rohöl und Mineralölzwischenprodukte verarbeitet. Die betroffenen Unternehmen erhalten zum größten Teil Rohöl zur Raffination und Verarbeitung. Zum Teil werden die Mineralölzwischenprodukte außerhalb der Raffinerien in Verarbeitungsnetzen weiterverarbeitet. Diese Verarbeitung erfolgt in hochmodernen Anlagen.
 - In der Kategorie 1.B.2.a.v - Verteilung von Ölprodukten werden die Emissionen aus der Verteilung von Ölprodukten beschrieben. Die Erdölprodukte werden über Schiffe, Produktpipelines, Eisenbahnkesselwagen und Tankwagen transportiert und von den Tanks in andere Tanks umgefüllt.
 - Die Quellenkategorie 1.B.2.b.i wird zusammen mit der Quellenkategorie 1.B.2.a.i (Öl, Exploration) betrachtet. Folglich sind die aggregierten, nicht unterteilten Daten von 1.B.2.b.i in der Quellenkategorie 1.B.2.a.i enthalten.
 - 1.B.2.c - Entlüftung und Abfackeln - Wo immer möglich, werden gesammelte Gase bei der Prozessverbrennung verbrannt. Wo dies nicht möglich ist, werden die Gase zu einer Fackel geleitet. Emissionen aus Tankentlüftungen und aus Fackeln sind hier subsummiert.
- Für eine sachgerechte Integration der Umweltwirkungen durch NH₃- und NO_x-Emissionen aus der Ausbringung von Rückständen der in Biogasanlagen eingesetzten Energiepflanzen sowie der Lagerung von Gärresten sind ebenso die beiden folgenden NFR Codes zu berücksichtigen: NFR Code L_AgriOther (3Da2c) Other organic fertilisers applied to soils (including com-post) und NFR Code L_AgriOther (3I) Agriculture other (storage of fermentation residues from energy crops)

Des Weiteren sind, wiederum im Sinne der Grobeinteilung ‚nicht‘/ ‚teilweise‘/ ‚vollständig‘, die folgenden beiden NFR Codes zu berücksichtigen, da sie teilweise Prozesse beinhalten, die dem Systemraum Energiewende zuzurechnen sind:

- NFR Code B_Industry (1A2gviii) Stationary combustion in manufacturing industries and construction:
Die Quellenkategorie Stationäre Verbrennung in der verarbeitenden Industrie umfasst stationäre Verbrennungssysteme zur Wärme- und Stromerzeugung von Industriekraftwerken und Industriekesselanlagen, was nur teilweise der öffentlichen Versorgung dient.
- NFR Code C_OtherStationaryComb (1A4ai) Commercial/institutional: Stationary
Die Quellenkategorie beinhaltet Emissionen aus stationären Verbrennungsanlagen des GHD-Sektors, der ebenso nur teilweise der öffentlichen Versorgung zuzurechnen ist.

Exkurs

Eine besondere Abgrenzung zwischen den Wirkpfaden „Luftschadstoffe“ und „Emissionen in Wasser und Boden“ ist für die Betrachtung des Ammoniaks aus der Landwirtschaft zu treffen. Für den Systemraum Energiewende ist hier der Stickstoffanteil relevant, der mit den Gärresten aus der Biogaserzeugung mittels Energiepflanzen auf landwirtschaftlichen Flächen in den Boden eingebracht wird. Von den ausgebrachten Gärresten aus der Biogaserzeugung entweicht NH_3 in die Luft.

Auch wenn die NH_3 -Emissionen aus Gärresten letztlich die Gesamtstickstoffdeposition in Böden, Ökosysteme und Gewässer beeinflussen, schlagen wir vor, NH_3 -Emissionen als Indikator für den Wirkpfad Luft aufzunehmen, u.a. weil im Luftbereich die Emissionserfassung stattfindet und weil Minderungsverpflichtungen und Reduktionsmaßnahmen mehrheitlich rechtlichen Verpflichtungen und Strategien der Luftreinhaltung entstammen.

Die zu berücksichtigenden NFR Codes decken nicht den gesamten für den Wirkpfad Luftschadstoffe identifizierten Systemraum (vgl. Kap. 4.2.5.2) ab, sondern nur einen Teilbereich. Es fehlen insbesondere im Bereich der Vorketten die Emissionen der internationalen Prozesse, sprich der Förderung der meisten fossilen Energieträger aber auch die Aufbereitungsprozesse, wenn Energieträger fertig zur Verwendung importiert werden. Die nachfolgende Abbildung stellt den in den Indikatoren betrachteten Systemraum dar, Abweichungen zum Model aus Kap. 4.2.5.2 sind orange markiert. Die Biogasanlagen sind als „teilweise enthalten“ markiert, da bei der Auswahl der NFR Codes die Abbildung der Emissionen aus der Lagerung und Ausbringung der Gärreste im Fokus stand.

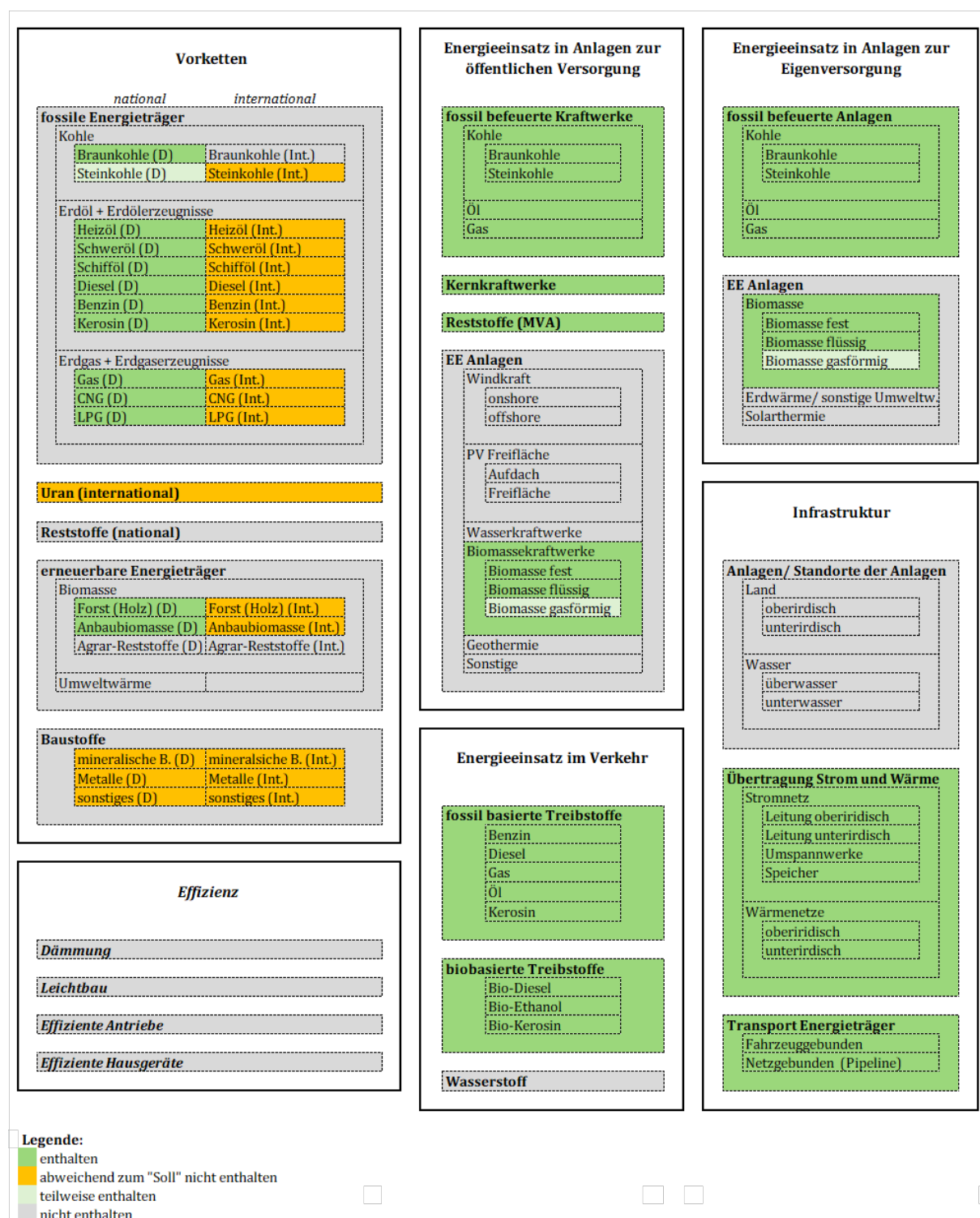
Auch die Umweltlasten der Baustoffe können nicht berücksichtigt werden, da sich die Emissionen der Baustoffindustrie und Bauwirtschaft rechnerisch nicht auf den Anteil der Baustoffe für Infrastrukturanlagen des Energiesystems eingrenzen lassen.

Der abgebildete Systemraum entspricht trotz seiner Einschränkungen immer noch den Maßgaben des in Kapitel 3.3.1 formulierten ersten Modells:

Die Bilanzierung der für die Energiewende relevanten Sektoren nach dem Territorialprinzip ohne Berücksichtigung der Im- und Exporte, in der nur die in Deutschland entstehenden Umweltauswirkungen aus der Förderung bzw. Anbau, Aufbereitung, Transport und Nutzung der Energieträger und der Übertragung der elektrischen Energie und der zentral erzeugten Wärme betrachtet werden.

Der von den Indikatoren auf Basis der NFR Auswertung beschriebene Systemraum kann daher als sachgerecht für die Abbildung der Umweltauswirkungen des Energiesystems über den Wirkpfad der luftgetragenen Schadstoffe angesehen werden.

Abbildung 9: Betrachteter Systemraum für den Wirkpfad Luftschadstoffe



Quelle: eigene Darstellung ifeu 2020

Auswahl geeigneter Indikatoren für die Bereiche der Energiewende

Im Folgenden werden nun die 27 in den NFR Tabellen gelisteten Luftschadstoffe dargestellt und hinsichtlich Ihrer Eignung als Indikator für Umweltauswirkungen auf die Schutzgüter über den Wirkpfad Luftschadstoffe bewertet.

In den NFR Tabellen sind 27 Luftschadstoffe gelistet, die sich in die Gruppen der Haupt-Luftschadstoffe (NO_x, SO_x, NMVOC und NH₃), Partikelemissionen (PM_{2,5}, PM₁₀, Staub und Black Carbon), Schwermetalle und POP Emissionen einteilen lassen. Im Folgenden soll eine begründete Auswahl getroffen werden, da nicht alle 27 Luftschadstoffe als Indikatoren für die durch den Transformationsprozess der Energiewende angestoßenen Umweltveränderungen im Wirkpfad Luftschadstoffe berücksichtigt werden können.

Die Repräsentativität ist ein wichtiges Bewertungskriterium bei der Indikator-Auswahl. Es wird analysiert, ob ein Luftschadstoff überhaupt aus einer Emissionsquelle stammt, die in den Sektoren der Energiewende zu lokalisieren ist. Dabei werden explizit nur die oben beschriebenen NFR-Sektoren, wie Kraftwerke, Verkehr, Haushalte etc. betrachtet, die zu 100% oder 50% Prozesse aus dem oben beschriebenen Systemraum der Energiewende repräsentieren.

Dazu wird im Folgenden analysiert, wieviel Prozent der Gesamtemissionen für einen Schadstoff den jeweiligen NFR Code-Aggregaten, die Sektoren der Energiewende repräsentieren, zuzuordnen sind. Die nachfolgende Tabelle 8 arbeitet mit einem Farbcode. Entstammen die Emissionen zu mehr als 50% den Sektoren der Energiewende sind die Zellen gelb markiert, entstammen sie zu mehr als 70% den Sektoren der Energiewende sind die Zellen grün markiert.

Aus Gründen der Repräsentativität sollten Emissionen von NFR Codes, die zu vollständig und teilweise den Sektoren der Energiewende zugeordnet wurden, als Indikatoren berücksichtigt werden, wenn sie einen Anteil von mehr als 50% der Emissionen dieses Schadstoffs verursachen. Ausnahmen werden begründet.

Tabelle 8: Repräsentativität für die Bereiche der Energiewende

Luftschadstoff	Emission in 2018		Anteil der Sektoren der Energiewende an der Gesamtemission (Varianten der Auswertung)	
	Einheit	Menge	NFR Codes vollständig im Energiesystem	NFR Codes vollständig und teilweise im Energiesystem
NO _x als NO ₂	kt	1.202	70%	77%
NMVOC	kt	1.140	15%	16%
-SO _x als SO ₂	kt	289,0	62%	73%
NH ₃ inkl. NFR Code 3Da2c und 3I	kt	636,4	11%	11%
PM 2,5	kt	96,71	37%	41%
PM 10	kt	210,8	21%	24%
Staub (TSP)	kt	387,7	14%	16%
Black Carbon	kt	12,55	49%	54%
CO	kt	2.938	51%	53%

Luftschadstoff	Emission in 2018		Anteil der Sektoren der Energiewende an der Gesamtemission (Varianten der Auswertung)	
Blei	t	207,4	11%	20%
Cadmium	t	12,69	21%	24%
Quecksilber	t	8,248	71%	76%
Arsen	t	8,747	43%	50%
Chrom	t	76,18	45%	48%
Kupfer	t	606,2	19%	19%
Nickel	t	155,3	90%	91%
Selen	t	7,209	14%	14%
Zinn	t	292,9	22%	32%
Dioxine und Furane	g I-TEQ	120,7	25%	41%
Benzo(a)pyrene	t	28,21	86%	97%
Benzo(b) fluoranthene	t	1,848	60%	60%
Benzo(k) fluoranthene	t	1,184	73%	73%
Indeno (1,2,3-cd) pyrene	t	0,845	80%	80%
PAH Summe	t	174,9	80%	93%
HCB	kg	11,89	19%	20%
PCBs	kg	212,9	54%	64%

Quelle: eigene Darstellung ifeu 2020

Es wird deutlich, dass insbesondere die Schwermetalle (inkl. Quecksilber) und die POP-Emissionen in großen Teilen Emissionsquellen aus den Sektoren der Energiewende zugeordnet werden können. Bei den klassischen Luftschadstoffen stehen NO_x und SO_x, PM_{2,5} sowie Black Carbon im Fokus. Schwermetall- und PAK-Emissionen zeigen zwar fallweise eine deutliche Überschreitung der definierten Relevanzschwelle, werden aber wegen der von UBA als nicht

ausreichend erachteten Datenqualität als Indikatoren nicht berücksichtigt. Dies ist mit Blick auf die hohe Energiewenderelevanz bedauerlich, die z.B. PAK-Emissionen aus den kleinen Holzfeuerungsanlagen haben. PM 2,5 wird zusätzlich berücksichtigt, da die definierte Relevanzschwelle nur geringfügig unterschritten wird (PM 2,5: 41%).

Obwohl die Emissionen von Ammoniak (NH_3) auch unter Berücksichtigung der Emissionen durch die Lagerung und Ausbringung von Gärresten aus der Energiepflanzennutzung deutlich unterhalb der für die Auswahl der Luftschadstoffe gesetzten Relevanzschwellen liegen, wird diesem Schadgas eine besondere Rolle beigemessen: Gemäß der NEC-RL und dem deutschen Luftreinhalteprogramm muss Ammoniak in der Landwirtschaft massiv gemindert werden. Der Anteil der Ausbringung von Gärresten an den gesamten Ammoniakemissionen ist bereits heute hoch und dafür mitverantwortlich, dass Gesamtemissionen auch zukünftig unverändert hoch bleiben, wenn keine ambitionierten Minderungsmaßnahmen ergriffen werden. Um diesen negativen Effekt der Energiewende im Rahmen des Monitorings zu beobachten, wird der Luftschadstoff NH_3 im Projekt als relevant für die Sektoren der Energiewende bewertet, auch wenn er in der Status Quo Betrachtung unterhalb der definierten Schwellenwerte liegt.

Zusammenfassung - Indikatoren für den Wirkpfad luftgetragene Schadstoffe

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die folgenden Luftschadstoffe als geeignete Indikatoren bewertet wurden:

- ▶ Emissionen von Stickstoffoxid (NO_x als NO_2) in kt/ Jahr
aufgrund der sehr hohen Emissionslast aus den Sektoren der Energiewende, der guten Datenqualität und der distance-to-target Bewertbarkeit aufgrund eines in der NEC Richtlinie festgelten Mengenkongingentes
- ▶ Emissionen von Schwefeldioxid (SO_2) in kt/ Jahr
aufgrund der sehr hohen Emissionslast aus den Sektoren der Energiewende, der guten Datenqualität und der distance-to-target Bewertbarkeit aufgrund eines in der NEC Richtlinie festgelten Mengenkongingentes
- ▶ Emissionen von Ammoniak (NH_3) in kt/ Jahr
aufgrund der Relevanz für die Bewertbarkeit für die Bewertbarkeit der Ausbringung von Rückständen der in Biogasanlagen eingesetzten Energiepflanzen sowie Lagerung von Gärresten, der guten Datenqualität und der distance-to-target Bewertbarkeit aufgrund eines in der NEC Richtlinie festgelegten Mengenkongingentes
- ▶ Emissionen von Feinstaub PM 2,5 in kt/ Jahr
aufgrund der hohen Emissionslast aus den Sektoren der Energiewende (mit 42% sehr nah am Schwellenwert von 50%), der guten Datenqualität und der distance-to-target Bewertbarkeit aufgrund eines in der NEC Richtlinie festgelten Mengenkongingentes
- ▶ Emissionen von Black Carbon in kt/ Jahr
aufgrund der hohen Emissionslast aus den Sektoren der Energiewende und der guten Datenqualität und als Proxy-Indikator für die Emissionen aus kleinen Holzfeuerungsanlagen
- ▶ Emissionen von Kohlenmonoxid (CO) in kt/ Jahr
aufgrund der hohen Emissionslast aus den Sektoren der Energiewende und der guten Datenqualität
- ▶ Emissionen von Quecksilber (Hg) in t/ Jahr
aufgrund der sehr hohen Emissionslast aus den Sektoren der Energiewende und der vergleichsweise ausreichenden Datenqualität – auch als Proxy-Indikator für Schwermetalle

Für alle als Indikator ausgewählten Luftschadstoffe liegt eine ausreichend valide, fortschreibefähige Datenbasis vor. Zudem sind drei der ausgewählten Schadstoffe in der NEC Richtlinie adressiert, so dass Minderungsziele vorliegen, was die Bewertung der Veränderungen vereinfacht bzw. erst ermöglicht, da eine reine Reduktion der Emissionen noch nicht als Umweltentlastung gewertet wird, solange die festgelegten Schwellen noch überschritten werden bzw. die definierten Minderungsziele noch nicht erreicht wurden. Mit diesen Indikatoren sind die durch das Fortschreiten der Energiewende indizierten Veränderungen der Luftqualität visualisierbar und bewertbar und können hinsichtlich der damit verbundenen direkten Umweltauswirkungen auf die Schutzgüter Menschen, Tiere und Pflanzen, biologische Vielfalt sowie Luft und Kultur- und sonstige Sachgüter hinreichend detailliert diskutiert werden. Das Thema Umweltauswirkungen auf die Schutzgüter Wasser und Boden durch die Deposition von Luftschadstoffen wird in der Diskussion zum Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden thematisch aufgegriffen.

Im Praxistest hat sich gezeigt, dass ein ergänzender Indikator zur Bewertung der gesundheitlichen Auswirkungen durch Luftschadstoffe zielführend wäre. Dieser wird wie folgt definiert:

- Attributable Todesfälle in Deutschland (Fälle/Jahr) durch die Luftschadstoffe PM 2,5, NO₂ und Ozon

Der Indikator basiert auf den Analysen der Europäischen Umweltagentur (European Environment Agency, EEA), in der für alle Länder der EU die gesundheitlichen Auswirkungen auf der Basis von Daten zur Luftqualität und zur Dosis-Wirkungs-Beziehung quantifiziert werden. Es erfolgt jedoch keine Zuordnung zu den Quellen der Luftschadstoffe (geographisch oder sektoral).

Für Immissionen von PM 2,5, NO₂ und Ozon sind auch Emissionen aus dem Energiesystem verantwortlich (bei PM 2,5 primäres PM 2,5 sowie Vorläufersubstanzen für Sekundärpartikel wie NO_x, SO_x, NH₃, VOC; bei NO₂: NO_x; bei Ozon NO_x und VOC). An den Immissionen in Deutschland haben die Emissionen in Deutschland in Abhängigkeit z. B. vom Schadstoff aber auch von der Meteorologie einen variablen Anteil. Der rechnerische Beitrag der Emissionen in Deutschland an den Immissionen von PM 2,5, NO₂ und Ozon in Deutschland ist derzeit nicht verfügbar.

Der Indikator attributable Todesfälle durch Luftschadstoffe ist direkt aus der Literatur übernommen, eine vollumfängliche Bewertung kann und soll daher hier nicht vorgenommen werden. Er beschreibt einen völlig anderen Systemraum und ist eher als Absicherung der umweltbezogenen Aussagen der quantifizierten Zeitreihen der Indikatoren zu verstehen. Er zeigt, dass die Energiewende eine positive Auswirkung auf die Luftqualität hat. Von daher ist die Reduktion in der Zahl der attributablen Todesfälle ein relevanter und zielführender Indikator.

4.3 Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden

4.3.1 Definition

Emissionen in Wasser und Boden können über zwei unterschiedliche Eintragspfade erfolgen:

- Direkte Emissionen durch das Einbringen bzw. Einleiten von Schadstoffen
- Indirekte Emissionen durch die Deposition von Luftschadstoffen.

Der erstgenannte Eintragspfad ist primär für das Schutzgut Wasser von Interesse und erfolgt durch das Einleiten von Abwässern aus Anlagen zur Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie in oberirdische Gewässer.

Direkte Emissionen in den Boden finden über die Düngung von Energiepflanzen sowie durch das Ausbringen von Gärresten aus Biogasanlagen auf landwirtschaftliche Flächen statt.

Das illegale und nicht geplante Einbringen von Schadstoffen gehören thematisch zum Wirkpfad Unfälle, sind aber nicht hinreichend quantifizierbar. Es bleibt somit an dieser Stelle lediglich der legale, wenn auch nur tolerierte, Übergang von in die Umwelt ausgebrachten Stoffen in den Boden (bspw. PAK-Emissionen aus Schutzanstrichen von Fundamenten etc.).

Indirekte Umweltauswirkungen durch die Deposition von Schadstoffen in Böden und Wasserkörper stehen im direkten Zusammenhang mit den Emissionen luftgetragener Schadstoffe und sind - solange Schadstoffe in die Luft gelangen - nicht vermeidbar. Die Quellen der Deposition sind identisch mit denen des Wirkpfades Emissionen in die Luft und werden an dieser Stelle als Eintragspotenzial bewertet.

Grundwasser wird durch die im Rahmen des Umweltmonitorings der Energiewende zu betrachtenden Prozesse vornehmlich indirekt beeinträchtigt. Schadstoffeinträge in den Boden gelangen auch in das Grundwasser. Dieser Eintragspfad ist somit in der Bewertung des Schutzgutes Boden inkludiert. Weitere mögliche Umweltauswirkungen entstehend durch Grundwasserhaltungsmaßnahmen im Zuge der Errichtung der Infrastrukturbawerke.

4.3.2 Rechtliche Regelungen

Die gesetzlichen Regelungen finden sich im Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG), der Bodenschutzverordnung (BBodSchV) und im Wasserhaushaltsgesetz (WHG). Dort sind spezifische Qualitätsanforderungen und Schutzwürdigkeiten definiert. Ebenso relevant für die Umweltmedien Wasser und Boden sind die Regelungen und Auslegungen des Bundesnaturschutzgesetzes (BNatSchG) in Verbindung mit der Natura 2000 Richtlinie, die strenge Vorgaben zu den maximalen Nährstoff- und Säuredepositionen in den Natura 2000 Gebieten definieren.

Neben den gesetzlichen Regelungen sind sowohl für das Umweltmedium „Boden“ als auch für das „Wasser“ verschiedene mehr oder weniger verbindliche Qualitätsziele definiert. So benennt bspw. die deutsche Nachhaltigkeitsstrategie (DNS) politisch gesetzte Reduktionsziele für den Eintrag bestimmter Schadstoffe in die Umweltmedien Wasser und Boden. Die atmosphärischen Stickstoffeinträge sollen so reduziert werden, dass die von Eutrophierung betroffenen terrestrischen Ökosysteme zwischen 2005 und 2030 um 35 % sinken. Bei einem Wert von 57 % im Jahr 2005 ergibt sich für 2030 ein Zielwert von 37 %. In der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) ist als Ziel festgelegt, dass bis zum Jahr 2027 100% aller Wasserkörper in einem guten ökologischen und guten chemischen Zustand sein müssen.

4.3.3 Berichtspflichten und Daten zur Erfolgskontrolle

Für die Einträge von Schadstoffen in Wasser und Boden bestehen vielfältige Berichtspflichten und definierte Schutzziele, die sich aus der Wasserrahmenrichtlinie, dem Düngegesetz und der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie ergeben. Viele der dort generierten Informationen stellt das UBA zur Verfügung (Bsp. Kartendienst Stickstoffdeposition) bzw. nutzt ausgewählte Informationen im Rahmen der Umweltbeschreibung „Daten zur Umwelt“.

Daten zur Abwassereinleitung können den Fachserien des Statistischen Bundesamts (Destatis) entnommen werden (z.B. Fachserie 19, Reihe 2.2, Erhebung der nichtöffentlichen Wasserversorgung und nichtöffentlichen Abwasserbeseitigung), die direkt für die Quantifizierung der Indikatoren verwendet werden können.

4.3.4 Der Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden im Bewertungsmodell

Emissionen in Wasser und Boden verursachen Auswirkungen auf die gleichnamigen Schutzgüter im Sinne von qualitativen Beeinträchtigungen, so dass die natürlichen Funktionen des Bodens und der Wasserkörper gestört oder sogar geschädigt werden. Darüber hinaus bestehen direkte Auswirkungen auf die Schutzgüter Mensch (im Sinne von Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit), Tiere und Pflanzen (im Sinne von direkten toxischen Auswirkungen und Verlust von Lebensräumen) sowie auf das Schutzgut Kultur- und sonstige Sachgüter (hier insbesondere Verschlechterung der Bodenqualität).

4.3.5 Systemraum und Ableitung der Indikatoren für den Wirkpfad Emissionen in Wasser inkl. Grundwasser und Boden

4.3.5.1 Auswahl der Indikatoren

Für den Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden werden die folgenden Indikatoren als geeignet für die Abbildung der Umweltauswirkungen der Energiewende bewertet:

- ▶ Abwasser aus der Energiewirtschaft in Tsd. m³/ Jahr
- ▶ Eutrophierung von terrestrischen Ökosystemen durch die Deposition von eutrophierenden Luftschadstoffen in der gewählten Systemgrenze „Energiewende“ in kg N(gesamt) ha⁻¹ a⁻¹
- ▶ Versauerung von terrestrischen Ökosystemen durch die Deposition von versauernden Luftschadstoffen in der gewählten Systemgrenze „Energiewende“ in eq ha⁻¹ a⁻¹.
- ▶ Stickstoffüberschuss in Böden aus dem Anbau von Energiepflanzen in kt N/a

4.3.5.2 Systemraum

Der in Kapitel 3.3.2 definierte Systemraum kann für den Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden auf die Prozesse eingegrenzt werden, die ursächlich für Schadstoffeinträge in Wasser und Boden sind. Diese sind in Abbildung 10 grün markiert.

Der Systemraum deckt sich grundsätzlich mit dem Systemraum des Wirkpfades Luftschadstoffe, da hier die Luftschadstoffe in Form von Depositionspotenzialen wieder aufgegriffen werden. Darüber hinaus sind im Sinne einer „Soll-Betrachtung“ auch die Emissionen zu berücksichtigen, die auf direktem Wege in Wasser und Boden abgegeben werden können.

Abbildung 10: Zu betrachtender Systemraum für den Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden



Quelle: eigene Darstellung ifeu 2020

4.3.5.3 Ableitung der Indikatoren

Denkmodell

Wesentlich für die Erwägung der potenziell erheblichen Auswirkungen auf die Schutzgüter über den Wirkpfad Emissionen in Boden und Wasser ist die Analyse, welche der im Systemraum stattfindenden Prozesse und Infrastrukturleitungen überhaupt relevante Beiträge hervorrufen

können (vgl. Systemraumdefinition in Kapitel 3.3.2). Dabei gilt es indirekte und direkte Eintragspfade zu unterscheiden:

- ▶ Indirekte Einträge entstehen durch die Deposition von Luftschadstoffen in Wasser und Boden und vom Boden langfristig auch ins Grundwasser.
- ▶ Relevante Schadstoffemittenten für direkte Emissionen ins Wasser sind insbesondere Feuerungsanlagen der Energiewirtschaft, die Schadstoffe aus der Rauchgaswäsche mit dem Abwasser in Oberflächengewässer ableiten. Direkte Emissionen in den Boden entstehen vor allem über den tolerierten Übergang von in die Umwelt ausgebrachten Stoffen in den Boden (bspw. PAK Emissionen aus Schutzanstrichen von Fundamenten etc.). Die potenziellen Umweltwirkungen sind lokal auf das direkte Umfeld des unterirdischen Gebäudeteils beschränkt und in hohem Maße von der Vor-Ort-Situation abhängig. Eine Quantifizierung ist auf Basis der vorliegenden Datenbasis für den Betrachtungsraum Deutschland nicht möglich.
- ▶ Durch das Ausbringen von Gärresten aus Biogasanlagen auf landwirtschaftliche Flächen finden neben den in Kapitel 4.2 beschriebenen Emissionen in die Luft auch direkte Einträge von Stickstoff in den Boden statt.
- ▶ Direkte Schadstoffeinträge durch Sickerwasser oder Abwasser von Abraumhalden oder offenen Kohlelagern sind unter den gegebenen gesetzlichen Rahmenbedingungen nicht vorgesehen. Finden sie bei nicht konsequenter Einhaltung dennoch statt, wären sie prinzipiell dem Wirkpfad Unfälle zuzuordnen, können aber aufgrund der fehlenden Quantifizierbarkeit nicht weiter betrachtet werden.
- ▶ Das Grundwasser kann ggf. von Erdwärmesonden, die ins Grundwasser reichen, mit direkten Emissionen beeinträchtigt werden, wenn es sich um so genannte offene Systeme handelt. Der Anteil dieser Anlagen ist gering und stagniert zudem seit Jahren [Griebler et al. 2015]. Daher wird dieser Eintragspfad aufgrund fehlender Bedeutung der Technologie und mangelnder Datenverfügbarkeit über die möglicherweise eingetragenen Schadstoffe nicht weiter betrachtet.

Für die Abbildung der zu betrachtenden Umweltwirkungen werden die folgenden Denkmodelle vorgeschlagen, die zu den in Kapitel 4.3.5.1 aufgelisteten Indikatoren führen:

Vorschlag für einen Indikator zur Abbildung indirekter Einträge durch Deposition von Luftschadstoffen

Nahezu alle Schadstoffe, die in die Luft emittiert werden, werden durch Deposition in Wasser und Boden abgelagert. Wie sich die emittierten Luftschadstoffe in der Umwelt an die Immissions- und Depositionsorte verteilen, hängt insbesondere von den jeweiligen physikalischen Ausbreitungsbedingungen ab. Diese sind abhängig von verschiedenen Parametern an der Quelle (Höhe, Quellstärke, Schadstoffgehalte im Ab-/ Rauchgas etc.) als auch der Umgebung (Windrichtung und -stärke, Temperatur, Niederschlag, Topografie etc.).

Zwar sind weitreichende Informationen zur räumlichen Verteilung von Emissionen verfügbar, da sie für eine Vielzahl von Fragestellungen im Bereich der Luftreinhaltung von großer Bedeutung sind, z.B. im Rahmen der Erfüllung von internationalen Berichtspflichten, der Bereitstellung von Eingangsdaten für Ausbreitungsmodellierungen von Luftschadstoffen oder zur Visualisierung der räumlichen Verteilungsstruktur der Emissionen (vgl.

<https://www.umweltbundesamt.de/deutschland-karten-zu-luftschadstoff-daten>). Doch die verfügbaren Daten und Karten zur räumlichen Verteilung der Emissionen sind nicht ohne weiteres eingrenzbar auf die Prozesse im zu betrachtenden Systemraum der Energiewende, äquivalent zur Beschreibung des Wirkpfades luftgetragene Schadstoffe.

Bereits verfügbare Daten und Karten zur Situation der Schadstoffdeposition in Boden und Wasser lassen nur begrenzt Rückschlüsse auf die Quellen der Emissionen zu. Eine entsprechende rechnerische Eingrenzung der jährlichen zusätzlichen Depositionsbelastung auf die Prozesse im Systemraum der Energiewende ist im vorliegenden F&E Vorhaben auf der vorhandenen Datenbasis bislang nicht möglich. Mit Hilfe der Luftschadstoff-Emissions-Szenarien könnten aber prinzipiell mit etwas Aufwand durchaus auch Immissions-Szenarien berechnet werden, die sich wiederum mit Critical Levels und Critical Loads vergleichen ließen.

Daher können im Rahmen des Monitorings der Umweltauswirkungen der Energiewende aktuell nur potenziell mögliche Umweltauswirkungen durch die Schadstoffdeposition dargestellt werden. Bei der Diskussion um die Deposition der Luftschadstoffe erscheint es hilfreich, nur auf die Umweltproblemfelder abzustellen, die einen großen Anteil der deutschen Land- und Wasseroberfläche betreffen. Es wird daher empfohlen die Frage der Schadstoffdeposition auf die eutrophierenden und versauernden Schadstoffeinträge in Wasser und Boden zu beschränken.

Dafür werden die Stickstoff- (N) und Schwefel- (S) haltigen Luftschadstoffe, die schon für den Wirkpfad Luftschadstoffe als Indikatoren ausgewählt wurden, mit Faktoren belegt, welche das eutrophierende und versauernde Potenzial der Luftschadstoffe beschreiben. Es gibt zwei unterschiedliche Modelle zur Errechnung des eutrophierenden und versauernden Potenzials:

- Die stöchiometrische Umrechnung:
Die Versauerungs- und Eutrophierungspotenziale der Luftschadstoffe NO_2 , NH_3 , NO und SO_2 können in Form von Versauerungs- und Eutrophierungsäquivalenten angegeben werden. Dazu berechnet man erst den N- oder S-Anteil an den jeweiligen Emissionen nach stöchiometrischem Vorgehen. Danach wird diese Masse an N (oder S) aller betrachteten Emissionen in Äquivalente umgerechnet (ein $\text{kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ entspricht $0,714 \text{ eq ha}^{-1} \text{a}^{-1}$, ein kg S entspricht $0,625 \text{ eq ha}^{-1} \text{a}^{-1}$). Die Ausgabegröße für Eutrophierung ist $\text{kg N(gesamt) ha}^{-1} \text{a}^{-1}$, für Versauerung $\text{eq ha}^{-1} \text{a}^{-1}$.
- Der Ökobilanzansatz:
Hier werden für verschiedene Emissionen sogenannte Charakterisierungsfaktoren definiert, die das eutrophierende und/oder versauernde Potenzial einer ganzen Liste an Schadstoffen beschreiben und in eine umrechenbare Einheit bringen. So werden eutrophierende Wirkungen in Form von PO_4^{2-} Äquivalenten und versauernde Wirkungen in Form von SO_2 -Äquivalenten ausgegeben [GreenDELTA 2015]. Das Eutrophierungspotenzial kann in terrestrisch und aquatisch unterschieden werden. Die Ableitung der Charakterisierungsfaktoren ist wenig transparent und beinhaltet neben der stöchiometrischen Umrechnung auch Angaben zur Verweildauer der Schadstoffe in der Atmosphäre etc.

Die Datengrundlage (die Liste an Luftschadstoffen als Eingang der Berechnung) ist durch die Festlegung der Indikatoren für den Wirkpfad Luftschadstoffe für den zu betrachtenden Systemraum des Energiesystems gegeben. Lediglich die Form der Umrechnung bedarf noch einer dezierten Bewertung. In Genehmigungsverfahren für Anlagen, die Luftschadstoffe emittieren, wird die stöchiometrische Umrechnung zur Berechnung der Depositionszusatzbelastung genutzt. Die Methode ist in [BMVBS 2013] und [LANUV 2012] beschrieben. Der Ökobilanzansatz ist detaillierter und adressiert auch deutlich mehr Luftschadstoffe als das Verfahren der TA Luft sowie auch mehr Luftschadstoffe als die im Rahmen von Kapitel 4.2 als Indikatoren für die Beschreibung der Entwicklung der Luftqualität ausgesuchten. Doch ist der Ökobilanz Ansatz weniger transparent und nachvollziehbar, folglich wird in diesem Vorhaben der Ansatz der stöchiometrischen Umrechnung weiterverfolgt.

Die Ausgabegrößen für den Indikator „Deposition von Luftschadstoffen“ innerhalb der Systemgrenze Energiewende sind somit:

- Eutrophierung von terrestrischen Ökosystemen durch die Deposition von Luftschadstoffen in kg N (gesamt) ha⁻¹ a⁻¹
- Versauerung von terrestrischen Ökosystemen durch die Deposition von Luftschadstoffen in eq ha⁻¹ a⁻¹.

Vorschlag für einen Indikator zur Abbildung direkter Emissionen mit dem Abwasser

Der vorgeschlagene Indikator steht stellvertretend für alle Emissionen, die in die Oberflächengewässer eingeleitet werden. Dabei ist die Quantifizierung der Mengen eingeleiteter Schadstoffe nicht leistbar. Diese wäre nur durch eine Auswertung der länderspezifischen Einleiterkataster zu ermitteln.

Die Daten werden vom Statistischen Bundesamt erhoben und in der Fachserie 19, Reihe 2.2, Erhebung der nichtöffentlichen Wasserversorgung und nichtöffentlichen Abwasserbeseitigung publiziert (3-jähriger Aktualisierungszyklus) und erlauben eine Differenzierung nach Wirtschaftszweigen. Die Daten können also auf den Sektor „Energieerzeugung“ fokussiert werden und erfassen somit die möglichen Eintragspfade relevanter Emissionen im definierten Systemraum.

Die Werte umfassen unbehandeltes Abwasser, darunter das produktionsspezifische und sonstige Abwasser (einschl. Kesselabschlammwasser) sowie das Abwasser aus dem Kühlsystem, das abgetötetes biotisches Material enthält. Außerdem ist das behandelte Abwasser enthalten.

Somit können die für den Indikator notwendigen Informationen direkt übernommen werden, eigene Berechnungen entfallen. Eine Darstellung als Zeitreihe ist möglich. Die Ausgabegröße für den Indikator ist somit:

- Abwasser aus der Energiewirtschaft in Tsd. m³/Jahr

Anmerkung: Der Indikator beschreibt die potenzielle Menge an Schadstoffeinträgen mit dem Kühl- und Abwasser im Sinne der Prämisse: mehr Abwasser = mehr Schadstoffe. Die Umwelteffekte der Wärmeeinträge in Gewässer mit der Ableitung von Kühlwasser sind Gegenstand der Betrachtungen zum Wirkpfad Geräusch- Licht- und Wärmeemissionen.

Vorschlag für einen Indikator zur Abbildung des Stickstoffüberschuss auf Anbauflächen von Energiepflanzen

Ein direkter Eintrag in Böden und potenziell ins Grundwasser erfolgt durch die Düngung von Energiepflanzen. Diese variieren nach Pflanzenart und Anbauregion. Spezifische Daten für eine Flächenbilanz liegen nicht vor. Aus der Stickstoff-Flächenbilanz für Deutschland ergibt sich für das Mittel der Jahre 2015 bis 2017 ein mittlerer N-Überschuss von 77,4 kg N/ha LF [Häußermann et al. 2019]. Bei der Ermittlung des Überschusses wird auch der Eintrag von Stickstoff über die Luft und die N-Zufuhr Gärresten pflanzlicher Herkunft berücksichtigt. Somit findet keine Doppelzählung statt. Näherungsweise kann der Stickstoffüberschuss durch Multiplikation der Anbaufläche für Energiepflanzen in Deutschland [FNR 2019] ermittelt werden. Zur Einordnung der Relevanz wird der Stickstoffeintrag aus der restlichen Landwirtschaft [Statista, 2020] errechnet. Somit lautet der Indikator:

- Stickstoffüberschuss auf Anbauflächen von Energiepflanzen [kt N/a]

In den Indikatoren abbildbarer Systemraum und Repräsentativität der Indikatoren für die Bereiche der Energiewende

Die Fokussierung auf die Umweltwirkungen der Deposition von Luftschadstoffen und direkte Schadstoffeinträgen mit der Ableitung von Kühlwasser und Abwässern aus der Rauchgasreinigung sowie den Stickstoffeinträgen auf Landwirtschaftliche Flächen weicht der tatsächlich betrachtete Systemraum beträchtlich von den „Soll-Anforderungen“ ab.

Für die Abbildung der Deposition der Luftschadstoffe gelten hinsichtlich der Systemraumbestandteile internationale Vorketten der Energieträger, Bauwirtschaft und Biogaswirtschaft, die gleichen Einschränkungen wie für die Luftschadstoffe (vgl. Kapitel 4.2.5.3).

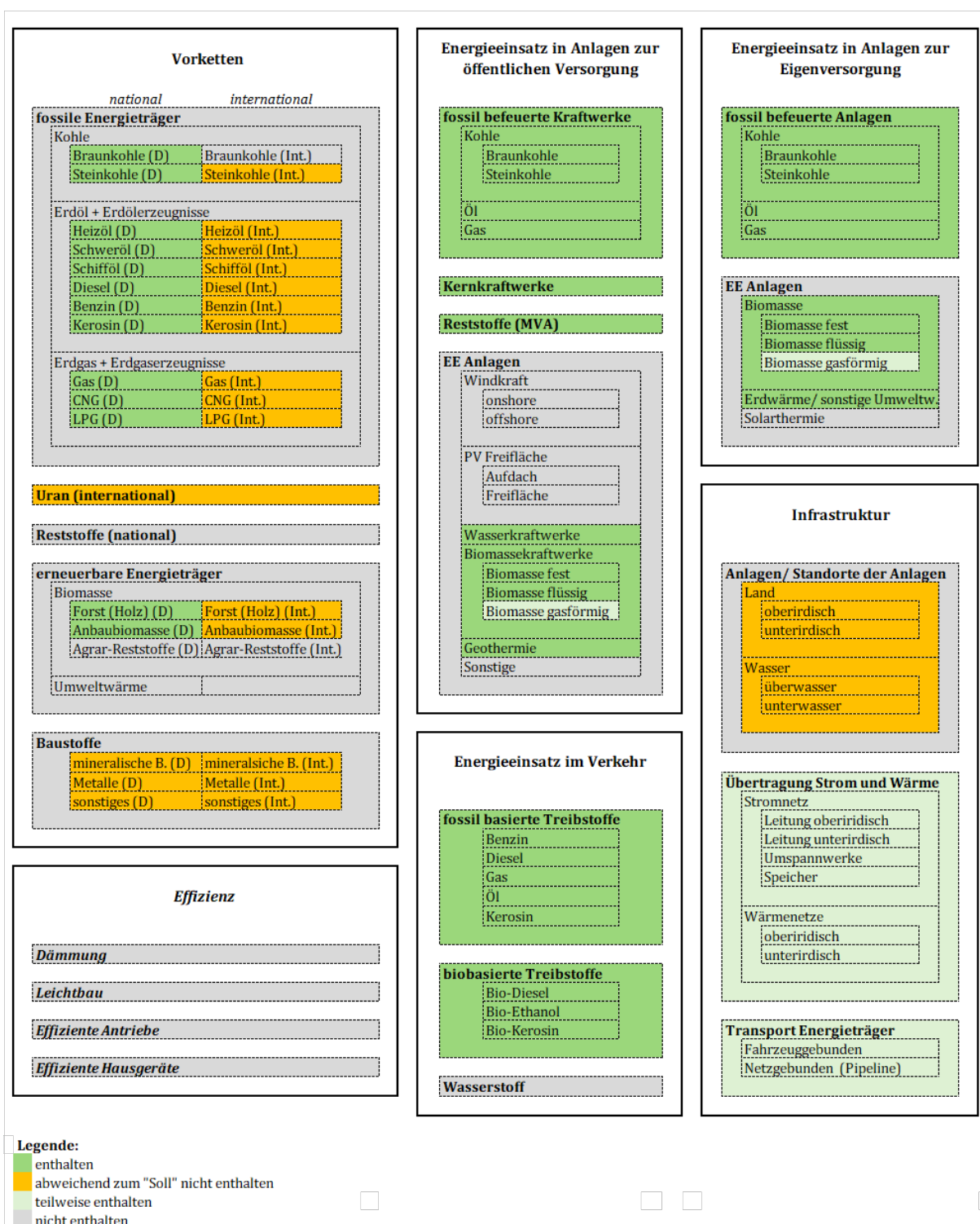
Die Nichtquantifizierbarkeit der PAK Übergänge in den Boden verhindert eine adäquate Betrachtung der Umweltwirkung der Anlageninfrastruktur – hinsichtlich der Übertragungsnetze und der Transporte der Energieträger sind hier nur die Umweltlasten betrachtet, die sich aus den Depositionen der Luftschadstoffe ergeben.

Generell ist die Abbildung des Systemraums in den vorgeschlagenen Indikatoren konsistent im Sinne des in Kapitel 3.3.1 formulierten ersten Modells:

Die Bilanzierung der für die Energiewende relevanten Sektoren nach dem Territorialprinzip ohne Berücksichtigung der Im- und Exporte, in der nur die in Deutschland entstehenden Umweltauswirkungen aus der Förderung bzw. Anbau, Aufbereitung, Transport und Nutzung der Energieträger und der Übertragung der elektrischen Energie und der zentral erzeugten Wärme betrachtet werden.

Es werden somit nicht alle im Wirkpfad entstehenden Umweltwirkungen durch die vorgeschlagenen Indikatoren beschrieben. Dies liegt darin begründet, dass sich die übrigen, im Rahmen des grundlegenden Denkmodells identifizierten Umweltwirkungen, aufgrund fehlender Daten einer Quantifizierung entziehen.

Abbildung 11: Betrachteter Systemraum für den Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden



Quelle: eigene Darstellung ifeu 2020

Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die folgenden Indikatoren als geeignet bewertet wurden:

- ▶ Abwasser aus der Energiewirtschaft in Tsd. m³/ Jahr
- ▶ Eutrophierung von terrestrischen Ökosystemen durch die Deposition von eutrophierenden Luftschadstoffen in der gewählten Systemgrenze „Energiewende“ in kg N (gesamt) ha⁻¹ a⁻¹
- ▶ Versauerung von terrestrischen Ökosystemen durch die Deposition von versauernden Luftschadstoffen in der gewählten Systemgrenze „Energiewende“ in eq ha⁻¹ a⁻¹.
- ▶ Stickstoffüberschuss in Böden aus dem Anbau von Energiepflanzen [kt N/a].

Für alle ausgewählten Indikatoren liegt eine ausreichend valide, fortschreibefähige Datenbasis vor. Die hier gewählten Indikatoren liefern die Informationen mit denen ausgewählte Umweltauswirkungen der direkten und indirekten Emissionen aus dem Energiesystem über den Wirkpfad Wasser und Boden auf die Schutzgüter Wasser und Boden sowie Tiere und Pflanzen, biologische Vielfalt hinreichend detailliert abgebildet und diskutiert werden können. Die Auswirkungen auf das Schutzgut Kultur- und sonstige Sachgüter sind über die Darstellung der mit der Eutrophierung und Versauerung einhergehenden Schäden an Gebäuden und möglichen qualitativ abträglichen Bodenveränderungen ersichtlich.

Die ausgewählten Indikatoren sind in sich stimmig, bilden aber nicht die Summe der möglichen Umweltauswirkungen, die durch Emissionen in Wasser und Boden hervorgerufen werden, ab.

4.4 Wirkpfad Geräusch, Licht- und Wärmeemissionen

4.4.1 Definition

Geräusch- und Lichtemissionen haben dann eine Umweltwirkung, wenn ein Rezipient (z. B. Mensch oder Tier) vorhanden ist. Gesundheitliche Auswirkungen können mit oder ohne wahrgenommene Belästigung auftreten. Für die gesundheitliche Bewertung der Exposition ist die Kenntnis der Vorbelastungssituation und der Empfindlichkeitsschwelle des Rezipienten nicht grundsätzlich erforderlich, sie kann aber für eine Bewertung der Umweltbelastung hilfreich sein. Die Quellen der Geräusch- und Lichtemissionen sind vielfältig:

- ▶ Betriebsgeräusche von Umwandlungsanlagen als lokal wirkende Punktquellen (z.B. Kraftwerke, dezentrale Energieverteilung durch BHKW, Offshore Windenergieanlagen).
- ▶ Verkehrsgeräusche im Sektor Mobilität (Straße, Schiene, Luftverkehr). Neben den Geräuschen der Motoren entstehen Abrollgeräusche der Reifen/ Räder sowie die Bremsgeräusche und künstlich erzeugte Geräusche im Fahrbetrieb (bei Elektrofahrzeugen bei geringen Fahrgeschwindigkeiten). Im Sinne einer stringenten Abgrenzung des Systemraums Energiewende sollen nur die Geräusche des Energieeinsatzes im Verkehr bewertet werden.
- ▶ Beleuchtung von Anlagenstandorten und Positionsleuchten an Anlagenbestandteilen die ggf. als Luftfahrthindernis einer entsprechenden Kennzeichnung bedürfen (Windenergieanlagen)

und Schornsteine ab einer definierten Höhe – gem. § 12 und § 17 LuftVG üblicherweise 100 m über Grund, in dicht besiedelten Bereichen auch 150 m über Grund).

- ▶ Reflexionen und Schattenwürfe, insbesondere bewegliche durch den Betrieb von Anlagen zur Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie (bspw. Stroboskopeffekte, Schattenwürfe und Discoeffekte an Windenergieanlagen).

Anders verhält es sich mit den Wärmeemissionen. Hier gilt es zu unterscheiden:

- ▶ Lokal wirkenden Emission von Wärme über Abstrahlwärme von Gebäuden als Wärmeeintrag in die Luft oder von Erdkabeln als Wärmeeintrag in den Boden
- ▶ Lokal wirkenden Emission von Wärme durch Ableitung von Abgasen aus Verbrennungsprozessen (bspw. an Kühltürmen, Schornsteinen, Kaminmündungen)
- ▶ Lokal wirkende Umweltfolgen durch den Entzug von Wärme durch Erdwärmesonden und Tiefengeothermie
- ▶ Überregional wirkende Emission von Wärme über Kühlwassereinleitungen aus Kraftwerken

4.4.2 Rechtliche Regelungen

Geräuschemissionen

Für den Lärmschutz existieren in Deutschland umfangreiche gesetzliche Regelungen im Sinne des vorsogenden Gesundheitsschutzes. Zur Erfassung und Beurteilung von Geräuschemissionen aus Gewerbe und Industrie wird in Deutschland die Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm vom 26. August 1998 (GMBI. Nr. 26 vom 28.08.1998 S. 503 - Geändert durch Verwaltungsvorschrift vom 01.06.2017 (BANz AT 08.06.2017 B5)) herangezogen. Danach werden die Geräuschemissionen einer Anlage getrennt für den Tag und die Nacht ermittelt und beurteilt.

Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) empfiehlt in den Night Noise Guidelines (2009), dass die nächtliche Lärmbelastung 40 dB(A) nicht überschreiten sollte. Diese Empfehlungen wurden 2018 in den WHO Environmental Noise Guidelines nochmals grundsätzlich bestätigt. Für Straßen- und Schienenverkehr wurden diese Werte gerinfügig angepasst auf 45 bzw. 44 dB(A), für den Luftverkehr bestätigt (WHO 2018)¹³. Die Begrenzung der Lärmeissionen dient dem Gesundheitsschutz. So formuliert das UBA in seiner Publikation „Daten zur Umwelt 2015“ zum Thema Lärm wie folgt: „Steigt die Lärmbelastung nachts auf mehr als 55 dB(A) oder beträgt der Mittelungspegel tagsüber mehr als 65 dB(A), erhöht sich das Risiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen deutlich“¹⁴.

In der TA Lärm sind unter der Nr. 6.1 Immissionsrichtwerte für die Tag- und Nachtzeiten festgelegt, die sich in Abhängigkeit von der planerischen Gebietsausweisung¹⁵ unterscheiden. Maßgebend für die Beurteilung der Nacht ist die volle Nachtstunde (z.B. 1.00 – 2.00 Uhr) mit

¹³ Für Windenergieanlagen sind ausschließlich Empfehlungen für den LDEN (Ganztag) enthalten. Aussagen zum Nachtzeitraum oder zu anderen gewerblichen Emittenten (bspw. Kraftwerke) sind nicht enthalten.

¹⁴ Ein weiteres Schallthema, das noch nicht in den gesetzlichen Grenzwerten vollständig erfasst wird, ist das Thema Infraschall bzw. die Emission tieffrequenter Geräusche. Dies ist für das Monitoring der Energiewende von Bedeutung, da Anlagen der Erzeugung von Energie und des Energietransportes (33,0 % der Fälle) sowie Raumluftechnische Anlagen (22,8 % der Fälle) am häufigsten zu Beschwerden über Infraschall und tieffrequente Geräusche führten (UBA Texte 40/2014).

¹⁵ Ist ein Gebiet nicht beplant, so werden Art und Maß der baulichen Nutzung für die Bestimmung der Immissionsrichtwerte herangezogen.

dem höchsten Beurteilungspegel, zu dem die zu beurteilende Anlage relevant beiträgt (vgl. Nr. 6.4).

- ▶ Industriegebiete: Tag und Nacht 70 dB(A)
- ▶ Gewerbegebiete: Tag: 65 dB(A) und Nacht: 50 dB(A)
- ▶ Urbane Gebiete: Tag: 63 dB(A) und Nacht: 45 dB(A)
- ▶ Kern-, Dorf- und Mischgebiete: Tag: 60 dB(A) und Nacht: 45 dB(A)
- ▶ Wohn- und Kleinsiedlungsgebiete: Tag: 55 dB(A) und Nacht: 40 dB(A)
- ▶ Reine Wohngebiete: Tag: 50 dB(A) und Nacht: 35 dB(A)
- ▶ Kurgebiete sowie im Umfeld von Krankenhäusern und Pflegeanstalten: Tag: 45 dB(A) und Nacht: 35 dB(A)

Lichtemissionen

Auf Länderebene gibt es Erlasse in denen Maßstäbe zur Beurteilung der Lästigkeitswirkung von Lichtemissionen definiert sind (so z.B. in NRW: Runderlass des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz –V-5 8800.4.11 – und des Ministeriums für Bauen, Wohnen, Stadtentwicklung und Verkehr – VI.1 – 850 v. 11.12.2014 zur Messung, Beurteilung und Verminderung von Lichtimmissionen). Dort werden Lichtemissionen gem. § 3 Absatz 2 des Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I Nr. 25 S. 1274) zu den Immissionen und gemäß § 3 Absatz 3 BImSchG zu den Emissionen im Sinne des Gesetzes gezählt. Lichtimmissionen gehören demnach gem. dem BImSchG zu den schädlichen Umwelteinwirkungen, wenn sie „nach Art, Ausmaß oder Dauer geeignet sind, Gefahren,, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder für die Nachbarschaft herbeizuführen“.

Genehmigungsbedürftige Anlagen sind gem. BImSchG so zu errichten und zu betreiben, dass schädliche Umwelteinwirkungen durch Licht nicht hervorgerufen werden können. Nicht genehmigungsbedürftige Anlagen sind gem. BImSchG so zu errichten und zu betreiben, dass schädliche Umwelteinwirkungen durch Licht verhindert werden, die nach dem Stand der Technik vermeidbar sind. Schädliche Umwelteinwirkungen liegen immer dann vor, wenn die Nachbarschaft oder die Allgemeinheit erheblich belästigt wird. Zudem gibt es viele Normen, in denen festgelegt ist, wie viel Tageslicht in Wohngebäuden und in Arbeitsräumen vorhanden sein muss und wie dieses beschaffen sein sollte.

Wärmeemissionen

Wärmeemissionen sind immer dann ein Thema von Genehmigungsverfahren, wenn Kühlwasser in Oberflächengewässer eingeleitet werden soll. In den wasserrechtlichen Genehmigungsverfahren steht insbesondere der Schutz des Gewässers vor schädlichen Umwelteinwirkungen im Vordergrund. Das maximale Delta zum Wärmeeintrag wird üblicherweise im Genehmigungsverfahren festgelegt und berücksichtigt die kleinräumige Vorbelastungssituation und die örtlichen Einleitbedingungen. Daher wurden in den letzten Jahren nur noch wenige Genehmigungen zur Nutzung von Flusswasser als Kühlmittel für Großfeuerungsanlagen erteilt. In den Genehmigungsverfahren der vergangenen Jahre wird in der Regel maximale Aufwärmung von 5 bis 10 K bei gleichzeitiger Begrenzung der maximalen Wassertemperatur am Ort der Einleitung festgelegt. Bestehende Kraftwerke mit Durchflussskühlung dürfen aufgrund bestehender Genehmigun-

gen teilweise deutlich höhere Wärmelasten in die Flusssysteme abgegeben. Dies kann insbesondere bei Bedingungen wie in den Hitzesommern 2018 und 2019 zu erheblichen Auswirkungen auf Flora und Fauna führen, da die höheren Wärmelasten auf erheblich reduzierte Wasservolumina treffen.

4.4.3 Berichtspflichten und Daten zur Erfolgskontrolle

Schallereignisse werden dann als Lärm bezeichnet, wenn sie das menschliche Wohlbefinden beeinträchtigen. Aufgrund dieser subjektiven Prägung ist der Begriff „Lärm“ keine messbare Größenordnung. Messen lassen sich lediglich auftretende Geräusche und Schallereignisse, die (gesundheitliche) Auswirkungen auf den Menschen entfalten.

Auch aufgrund dieser gesundheitlichen Auswirkungen werden gem. der Vorgaben der EU-Umgebungslärmrichtlinie und deren Umsetzung im BImSchG entsprechende Lärmkartierungen erstellt und publiziert (bspw.

<https://gis.uba.de/maps/resources/apps/laermkartierung/index.html?lang=de>) und Minderungskonzepte (bspw. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/E/initiativen-des-bundes-zur-laermreduzierung.html>) etabliert. In repräsentativen Umfragen in der Bevölkerung wird Straßenverkehrslärm von 75% der Deutschen als Lärmquelle an erster Stelle benannt, vor Nachbarschaftslärm mit 60%. (<https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/laermwirkung/laermbelastigung>). Auch Lärm von Industrien und Gewerbelärm (42%), Fluglärm (42%) und Lärm von Schienenverkehr (32%) werden von den Deutschen als Lärmquelle benannt, wenngleich mit geringerer Häufigkeit, da nur ein begrenzter Teil der Bevölkerung dem Schall dieser Quellen exponiert ist.

Äquivalente umfangreiche Kartierungen zu den Themen Licht- und Wärmeemissionen existieren bislang nicht. Das Statistische Bundesamt publiziert im Rahmen der Fachserie 19 Reihe 2.2 „Daten zur nichtöffentlichen Wasserversorgung und nichtöffentlichen Abwasserversorgung“ die Menge an entnommenem Kühlwasser.

4.4.4 Der Wirkpfad Geräusch,- Licht- und Wärmeemissionen im Bewertungsmodell

Die Geräusch-, Licht- und Wärmeemissionen treten bei den Rezipienten als Belästigung auf und sind mit konkreten Umweltauswirkungen insbesondere auf die menschliche Gesundheit und die Tier- und Pflanzenwelt verbunden. Lärmimmissionen können bei Menschen auf direktem Wege bei sehr hohen Schallpegeln Gehörschäden und über den indirekten Pfad aufgrund der Belästigung Stress verursachen, der sich langfristig in Herz- und Kreislauferkrankungen, manifestieren kann. Auch Tiere werden durch Geräuschimmissionen gestört und somit aus ihren Habitaten vertrieben¹⁶Licht stört insbesondere den zirkadianen Rhythmus von Menschen, Tieren und auch Pflanzen. Die Emissionen und Immissionen von Licht aus dem Energiesystem werden im Vergleich zu Geräuschen als geringfügiger eingeschätzt, können jedoch lokal von Bedeutung sein.

Wärmeeinträge in Gewässer sind kritisch zu bewerten, da veränderte Temperaturbedingungen zu Lebensraumveränderungen führen und der Sauerstoffgehalt im Gewässer nachteilig beeinflusst wird. Dadurch entstehen z.T. erhebliche Auswirkungen auf die aquatische Flora und Fauna kommen. Die Entnahme von Kühlwasser führt zudem direkt zur Tötung von Wasserlebewesen.

¹⁶ So werden in der Literatur für verschiedene Brutvogelarten kritische Schallpegel benannt, die je nach Aktivitätszeitraum für die Tag- oder Nachtzeit gültig sind und die zwischen 47 dB(A) nachts und 58 dB(A) tags liegen (BMVBS 2010).

4.4.5 Systemraum und Ableitung der Indikatoren im Wirkpfad Geräusch,- Licht- und Wärmeemissionen

4.4.5.1 Auswahl der Indikatoren

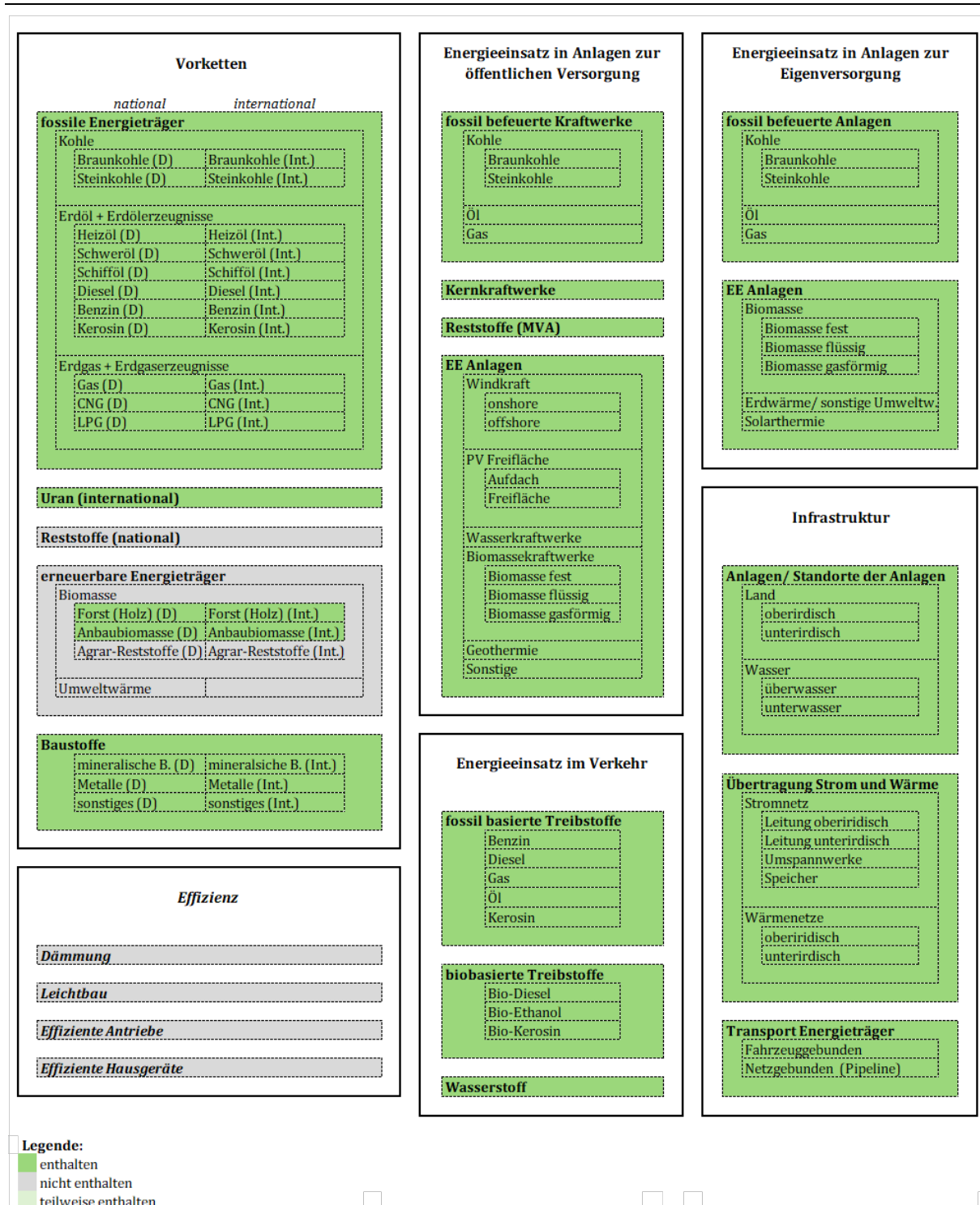
Für den Wirkpfad Geräusch,- Licht- und Wärmeemissionen werden die folgenden Indikatoren als geeignet für die Abbildung der Umweltauswirkungen der Energiewende bewertet:

- ▶ Geräuschemissionen als Lärmbelastungspotenzialflächen in denen 40 dB(A) in der Nacht überschritten wird in km²
- ▶ Menge an entnommenem Kühlwasser aus der Energiewirtschaft in Deutschland in Mrd. m³/a

4.4.5.2 Systemraum

Der in Kapitel 3.3.2 definierte Systemraum gilt vollumfänglich für den Wirkpfad Geräusch,- Licht- und Wärmeemissionen da alle Bestandteile des Systemraums entweder Geräusche oder Licht oder Wärme emittieren, meist sogar in Kombination. Lediglich die Vorketten der Reststoffe bleiben ausgespart, da diese per Definition lastenfrei in das System übernommen werden.

Abbildung 12: Zu betrachtender Systemraum für den Wirkpfad Geräusch,- Licht- und Wärmeemissionen



Quelle: eigene Darstellung ifeu 2020

4.4.5.3 Ableitung der Indikatoren

Denkmodell für einen Indikator für Geräuschemissionen

Die umweltpolitische Zielgröße für Schallemissionen ergibt sich aus der WHO Empfehlung, dass eine dauerhafte Belastung der Bevölkerung über 40 dB(A) nachts zu vermeiden ist. Abweichend davon definieren die in Deutschland geltenden Anforderungen der TA Lärm einen an Ortsrändern regelmäßig einen nächtlichen Immissionsrichtwert von 45 dB(A). Insofern wäre im Sinne eines quantifizierbaren Indikators die Anzahl der Menschen zu ermitteln, die nachts durch verursachenden Lärm der betrachteten Prozesse im Systemraum belästigt werden. Diese Zahl ist jedoch nur für den Einzelfall bekannt, eine Skalierung von Einzelfalldaten auf den gesamten Betrachtungsraum Deutschland erscheint vor dem Hintergrund der stark lokal wirkenden Umweltbelastungen der Geräusche nicht sachgerecht.

Stattdessen wurde im Austausch mit dem UBA Fachgebiet I 2.4 ein Modell entwickelt, dass anhand definierter Schalleistungen ausgewählter Prozesse des Energiesystems sowie der Annahme einer geometrischen Pegelabnahme die Flächen berechnet, die einem Lärmbelastungspotenzial größer 40 dB(A) ausgesetzt sind.

Die Anzahl der lärmbelasteten Menschen wird dabei direkt proportional zur lärmbelasteten Fläche angenommen. Daher wird ersatzweise für den Indikator die lärmbelastete Fläche oberhalb von 40 dB(A) verwendet.

Die Berechnung ergibt hypothetische Schadpotenziale. Eine Umrechnung auf die Zahl Betroffener unter zu Hilfenahme durchschnittlichen Bevölkerungsdichten wäre nicht sachgerecht. Maximal können zukünftig in einer verbalen Bewertung der differenzierten Ergebnisse auf die zu bewertenden Schutzgüter Unterscheidungen vorgenommen werden, ob die betrachteten Erzeugungsanlagen eher im urbanen Umfeld anzutreffen sind und somit primär das Schutzgut Mensch adressiert wird oder ob die Anlagen typischerweise im siedlungsfernen Bereichen stehen und somit tendenziell eher das Schutzgut Tiere beeinträchtigt werden kann.

Bei der Ableitung des Indikators gelten die folgenden grundsätzlichen Annahmen und Festlegungen:

- Es werden nur Erzeugungsanlagen für Strom und Wärme berücksichtigt, die entweder ein eigenes Bauwerk sind oder außerhalb an bestehenden Bauwerken festmontiert sind. Somit werden keine dezentralen Anlagen zur Erzeugung von Raumwärme wie Gas- oder Öl- bzw. Pellet-brenner bzw. Feststoff-Einzelöfen (Holz oder Kohle-Brikett) betrachtet, da diese innerhalb geschlossener Gebäude aufgestellt sind.
- Die Prozesse im Sektor Verkehr werden nicht betrachtet, da sich die Geräuscentwicklung der Verkehrsmittel nur begrenzt über den Energieträgereinsatz definiert. So sind bspw. im Straßenverkehr schon ab geringen Geschwindigkeiten die Abrollgeräusche der Reifen dominant¹⁷.

Die Ausgabegröße des Indikators ist:

- Geräuschemissionen als Lärmbelastungspotenzialflächen in denen 40 dB(A) in der Nacht überschritten wird [km²]

¹⁷ <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/verkehrslaerm/strassenverkehrslaerm#welche-faktoren-haben-einen-einfluss-auf-den-strassenverkehrslarm>

Denkmodell für einen Indikator für Lichtemissionen

Das Denkmodell zum Thema Lärm lässt sich nicht auf die Lichtemissionen übertragen. Zum einen, da es deutlich weniger rechtsverbindliche Regelungen abseits des allg. Minimierungsgebotes von Umweltauswirkungen und der LAI Empfehlungen gibt, die eine Differenzierung zwischen den verschiedenen im Systemraum der Energiewende inkludierten Prozesse erlauben, zum anderen ist die generelle Datenlage zu diesem Umweltthema noch nicht so weit fortgeschritten wie diese beim Thema Lärm der Fall ist. Problematisch ist, dass es nicht für alle Prozesse im Systemraum einen äquivalenten Problemaufriss gibt - ggf. existiert nicht einmal ein entsprechendes Problembewusstsein. So betrifft die Frage der Lichtemissionen durch Hinderniskennzeichnung neben den Windenergieanlagen auch alle Feuerungsanlagen mit Schornsteinen ab einer definierten Höhe, die Frage der Lichtreflexionen betreffen nicht nur Windenergieanlagen sondern auch Photovoltaikanlagen.

Für Einzelaspekte wie etwa der Schattenwurf durch WEA oder der Einfluss Beleuchtung in der Nacht auf die menschliche Gesundheit liegen Forschungsergebnisse vor, die auch schon in konkrete Handlungsempfehlungen überführt wurden. So ist der Schattenwurf von Windenergieanlagen für bestimmte im Rahmen des Genehmigungsverfahrens benannten Immissionsorte aus auf 30 Minuten pro Tag und maximal 30 Stunden pro Jahr kontingentiert, wobei die echte Verschattung nicht mehr als 8 Stunden pro Jahr betragen darf [UBA 2019b]. Neuere Windenergieanlagen werden mit einer entsprechenden Abschaltautomatik versehen. Ähnliche technische Lösungen gibt es auch für die Problemfelder Diskoeffekt (Lösung: reflexionsarme Farbe, bereits seit 2002 in der Umsetzung) und der Lichtemissionen durch Hinderniskennzeichnung (Lösung: bedarfsgerechte Kennzeichnung, LED- statt Xenon Lichter und Synchronisierung der Blinkfolge). All diese Maßnahmen sind per Stand heute bekannt und bereits in der Umsetzung [UBA 2019b]. Mit der fortschreitenden Erneuerung bzw. Nachrüstung des Anlagenparks (die Frist für die Umrüstung des Altbestandes endet derzeit am 01.07.2021, mit einer Verlängerung ist ggf. zu rechnen) werden diese Problemstellungen sukzessive in naher Zukunft aller Voraussicht nach gelöst. Potenzielle Beeinträchtigungen würden somit nur noch hinsichtlich der Hinderniskennzeichnung im temporär oder lokal begrenzten Ausnahmefall bestehen (bspw. Anfliegen von Windenergieanlagen und Windenergieanlagen in Einflugbereichen von Flughäfen, die gem. der Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Kennzeichnung von Luftfahrthindernissen vom 24. April 2020 einer besonderen Kennzeichnung bedürfen) Als Hilfsindikator böte sich somit theoretisch eine Darstellung des Alters des Anlagenparks an, unter der Annahme, dass sich die Probleme lösen, sobald keine Anlagen mehr in Betrieb sind, die vor einem definierten Stichtag errichtet wurden (bspw. das Jahr 2002 Für den Diskoeffekt ist aufgrund der Empfehlung ab 2002 nur noch Reflexionsarme Farben wie bspw. RAL 7035 „Lichtgrau“ zu verwenden) oder der Altbestand entsprechend umgerüstet ist (Stichwort bedarfsgerechte Nachtkennzeichnung gem. § 9 Abs. 8 des EEG 2017). Da dieser Hilfsindikator aber aufgrund der zeitnahen Umsetzung der bereits getroffenen Maßnahmen zur Minimierung der potenziellen Umweltauswirkungen rein retrospektiv wäre, wird auf eine solche Betrachtung im Rahmen des F&E Vorhabens verzichtet.

Um das Thema sachgerecht für ein Indikatormodell aufzubereiten bedürfte es der folgenden grundlegenden Forschungsarbeiten:

- Bestandsaufnahme von Lichtemissionen an unterschiedlichen Anlagen zur Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie und Verkehrsträgern mit dem Ziel, substanzielle Unterschiede durch die Anlagen und den Betrieb der Anlagen bzw. der Mobilitätsdienstleistung herauszuarbeiten

- Ableitung spezifischer rechtlicher Regelungen für Lichtemissionen differenziert nach Siedlungsbereichen, Außenbereichen und schutzwürdigen Habitaten.

Für die Bewertung der Ergebnisse eines möglichen Indikators müsste auch der Wissensstand über die Umweltfolgen der Lichtemissionen auf die zu betrachtenden Schutzgüter weiter vertieft werden. Aktuell stehen vor allem die Wirkungen auf den Menschen und seine Gesundheit im Vordergrund. Umweltfolgen der durch Lichtemissionen durch die Prozesse im Systemraum der Energiewende hervorgerufenen Beeinträchtigung von Tieren und Pflanzen bedürfen noch weiterer Analysen.

Daher sollen an dieser Stelle keine Proxy-Indikatoren für spezielle aber im Fokus der öffentlichen Wahrnehmung stehenden Umweltauswirkungen einzelner Anlagenkonzepte definiert werden, solange kein einheitliches Denkmodell, mindestens äquivalent zu den Lärmbelastungspotenzialflächen umrissen werden kann. Inwieweit die hier beschriebenen Teilansätze Ankerpunkte für einen erweiterten Forschungsbedarf darstellen, soll innerhalb der Schlussfolgerungen noch einmal erwogen werden.

Denkmodel für einen Indikator für Wärmeemissionen

Anders als Schall- und Lichtemissionen gibt es bei Wärmeemissionen sehr direkt wirkende und auch eindeutige Ursache- Wirkung- Beziehungen, was die Ableitung eines entsprechenden Indikators erheblich vereinfacht. Es gilt zwischen den Wärme- bzw. auch Kälteeinträgen in den Boden bspw. durch die Nutzung von Erdwärme/ Geothermie und den Wärmeeinträgen in Oberflächengewässer zu unterscheiden.

Temperaturveränderung im Boden wirken bleiben lokal sehr begrenzt und sind aufgrund der relativ geringen Anteile von Erdwärme/ Geothermie im Energiesystem auch von nachgelagerter Bedeutung. Anders hingegen die Wärmeeinträge in Oberflächengewässer. Diese entstehen insbesondere dann, wenn thermische Kraftwerke Fluss- oder Meerwasser zur Kühlung nutzen. Dadurch entfällt die Notwendigkeit der Errichtung eines Kühlturms. Der Wärmeeintrag verändert den Sauerstoffgehalt im Gewässer nachteilig und führt zu Auswirkungen auf die aquatische Flora und Fauna¹⁸.

Im Rahmen des Vorhabens fokussiert sich die Bewertung von Wärmeeinträgen auf das Medium Wasser. Es wurde ein Denkmodell erwogen, dass sich die Wärmelast proportional mit dem Bedarf an Kühlwasser in Anlagen zur öffentlichen Versorgung entwickelt.

Die Ausgabegröße für den Indikator ist somit:

- Menge an entnommenem Kühlwasser durch die Energiewirtschaft in Deutschland [Mrd. m³/a]

In den Indikatoren abbildbarer Systemraum und Repräsentativität der Indikatoren für die Bereiche der Energiewende

Die innerhalb der Denkmodelle erarbeiteten Indikatoren können nur einen Teil antizipierten Umweltwirkungen im Wirkpfad Geräusch-, Licht- und Wärmeemissionen abbilden, insofern ist auch der abgebildete Systemraum gegenüber den „Soll-Anforderungen“ gem. Kapitel 4.4.5.2 deutlich reduziert.

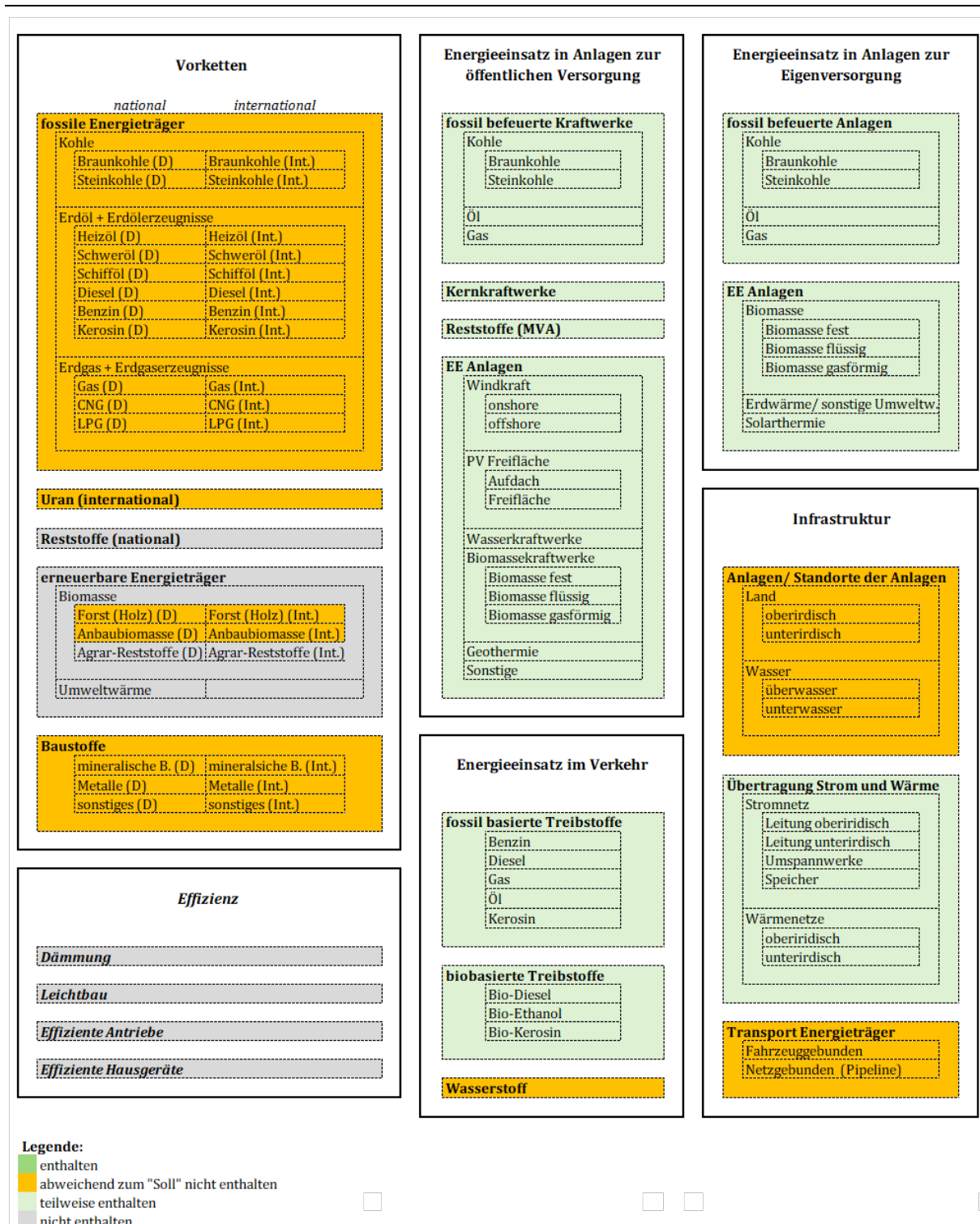
¹⁸ Auch ist die Entnahme von Kühlwasser ein Eingriff in die Oberflächengewässer, der zu nicht unerheblichen Auswirkungen auf alle Wasserlebewesen führen kann, wenn diese mit dem Entnahmebauwerk kollidieren oder gar mit dem Kühlwasser das Kraftwerk durchlaufen

So fehlen alle Lärmemissionen der Förderung und Aufbereitung der Energieträger, des Energieeinsatzes im Verkehr und Teile des Energieeinsatzes in Anlagen der öffentlichen Versorgung und Anlagen zur Eigenversorgung. Das Thema der Infrastruktur kann nur soweit bedient werden, als dass – äquivalent wie im Wirkpfad Luftschadstoffe die Leitungsverluste bei der Übertragung der Energie im Sinne der Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie mitberücksichtigt werden.

Lichtemissionen werden nicht betrachtet und Wärmeemissionen bleiben auf die Umweltwirkungen von Großfeuerungsanlagen der öffentlichen Versorgung beschränkt.

Diese Einschränkungen schmälern die Aussagekraft des Wirkpfades Geräusch-, Licht- und Wärmeemissionen für das schlussendliche Bewertungsmodell. Dies wird bei einer verbal argumentativen Bewertung der Ergebnisse zwingend zu berücksichtigen sein.

Abbildung 13: Betrachteter Systemraum für den Wirkpfad Geräusch-, Licht- und Wärmeemissionen



Quelle: eigene Darstellung ifeu 2020

Im Rahmen der Ableitung des Indikators zur Darstellung der Geräuschemissionen wird – wie bereits bei der Darstellung des Denkmodells erwähnt - nur stationäre Anlagen außerhalb geschlossener Räume berücksichtigt. Im Detail sind daher im Indikator die folgenden Prozesse des Systemraums integriert:

- Windenergieanlagen
- Kohle, Öl und Gaskraftwerke
- Biomasseheizkraftwerke
- BHKWs
- PV-Anlagen

Mit dieser Auswahl wird ein erheblicher Teil der geräuschemittierenden Anlagen zur öffentlichen Versorgung und zur Eigenversorgung im Systemraum erfasst. Die Ausklammerung der Geräuschentwicklungen des Verkehrs führt, wie im Denkmodell beschrieben, nur zu geringfügigen Verzerrungen. Die nicht Betrachtung der Vorketten und weiter Teile der Infrastruktur jedoch führen dazu, dass dieser Indikator nur eingeschränkt repräsentativ für die Energiewende ist. Generell ist anzumerken, dass in der Gesamtheit der Lärmbelastungen nicht die Emissionen des Energiesystems im Fokus stehen. Wie in Kapitel 2.4.2 ausgeführt, fühlt sich die Mehrheit der deutschen Bevölkerung von Straßenverkehrslärm belastigt. An zweiter Stelle steht der Nachbarschaftslärm.

Anders hingegen sieht die Bewertung der Repräsentativität für den Indikator zur Darstellung der Wärmeemissionen in das Oberflächenwasser aus. Zwar wird hier nur ein kleiner Teil des gesamten Systemraums betrachtet, doch ist dieser verantwortlich für alle dem Energiesystem zuzurechnenden Wärmeeinträge in Oberflächengewässer und darüber hinaus ursächlich für die Gesamtheit der Wärmeeinträge in Oberflächengewässer in Deutschland.

Zusammenfassung

Der Wirkpfad Geräusch,- Licht- und Wärmeemissionen ist ein wichtiger Wirkpfad, weil er Umweltproblemfelder adressiert, welche von der Bevölkerung direkt wahrgenommen werden, aber auch Tiere und Pflanzen potenziell negativ beeinträchtigen kann. Insofern sind Maßnahmen, die zur Reduktion von Belästigungen und negativen Auswirkungen aufgrund von Geräusch, Licht- und Wärmeemissionen beitragen, von hoher Relevanz für die Akzeptanz der Energiewende insgesamt.

Die Berechnung von Indikatoren, welche die Ursache-Wirkung-Beziehungen zwischen Emission und Umweltauswirkung auf Menschen oder Tiere und Pflanzen darstellen, ist jedoch schwierig. Das Thema Lichtemissionen wird aufgrund nicht abschließend zu klärenden Fragen zur Methodik und zur Datengrundlage vorerst nicht weiter als Indikator berücksichtigt. Lichtemissionen sind gegenüber den Geräusch- und Wärmeemissionen aber auch gegenüber den Schadstoffeinträgen in Luft, Boden und Wasser aus einer anthropogenen Sichtweise heraus als nachrangig zu bewerten, da weniger Rezipienten betroffen sind. Ein Indikator, der bspw. das Thema Schattenwurf durch Windenergieanlagen aufgreift wäre grundsätzlich in den Fokus zu nehmen, würde aber im Endeffekt zu der Aussage führen, dass mehr Windenergieanlagen auch mehr Verschattung bedingen. An dieser Stelle ist es aus fachlicher Sicht geboten, noch mehr Informationen für eine Ursache-Wirkung Beziehung zu erarbeiten und auch sicherzustellen, dass der Indikator sowohl den gesamten Systemraum gem. Kapitel 3.3.1 als auch alle Schutzgüter adressieren kann.

Die folgenden Indikatoren werden als geeignet bewertet wurden, um die Auswirkungen des Fortschreitens der Energiewende auf die Schutzgüter über den Wirkpfad Schall,- Licht- und Wärmeemissionen zu beschreiben:

- Geräuschemissionen als Lärmbelastungspotenzialflächen in denen 40 dB(A) in der Nacht überschritten wird [km²]

- Menge an entnommenem Kühlwasser aus der Energiewirtschaft in Deutschland [Mrd. m³/a]

Die erforderliche Datenbasis für beiden Indikatoren ist vorhanden und fortschreibefähig. Der Geräuschindikator bildet jedoch die Umweltauswirkungen nur sehr rudimentär ab. Von daher bedarf der Indikator, zusätzlich zu den anderen Indikatoren, einer gesonderten Interpretation.

4.5 Wirkungspfad Flächeninanspruchnahme

4.5.1 Definition

Ein schonender Umgang mit der Fläche sollte Maßgabe jeder in die Zukunft gerichteter Strategie sein, somit auch beim Umbau der Energieversorgung. Durch die Transformation des Energiesystems im Rahmen der Energiewende sind sowohl entlastende wie auch zusätzlich beanspruchende Wirkungen auf die Fläche verbunden. Eine klare Aussage zur Quantifizierung dieser Wirkungen kann nach aktuellem Forschungsstand nicht getroffen werden, was vor allem darin begründet ist, dass Methodik und Daten zur Flächeninanspruchnahme nicht die Aufmerksamkeit und Standardisierung, wie z.B. für Treibhausgasbilanzen beigemessen wurde. Dabei sind genaue räumliche, aber auch zeitliche Zuordnungen Aspekte, die zu betrachten und in ein Verhältnis zueinander zu setzen sind. Beispielsweise: Welche Fläche ist einer Windenergieanlage oder einer Stromtrasse zuzurechnen? Welche Zeitdimension ist der Tagebaufläche von abgebauter Braunkohle anzurechnen?

Im Rahmen des UBA-Projekts „Flächenrucksäcke für Güter und Dienstleistungen“ werden diese Aspekte berücksichtigt [ifeu/ integrahl o.J.¹⁹]. Es liegt für die Aufgabenstellung hier daher nahe, die dort festgelegte Definition der Flächeninanspruchnahme zu entlehnen. Es handelt sich hier um die sogenannte **temporäre Flächenbelegung**. Sie schließt die einem Produkt oder einer Dienstleistung zuzurechnenden Belegung durch die Anlagen und Infrastrukturen ein, die – in Bezug auf das Energiesystem – im Bezugsjahr an der Energiegewinnung, Umwandlung, Verteilung und Speicherung sowie der Vorketten für Energierohstoffe beteiligt sind.

Flächenbelegung drückt das Maß an Fläche aus, die von einer Nutzung (z.B. zur Herstellung eines Produkts oder einer Dienstleistung) belegt ist und nicht für andere Nutzungen (sprich für die Bereitstellung anderer Produkte oder Dienstleistungen) zur Verfügung steht.

Als temporär wird die Flächenbelegung bezeichnet, weil die durch die aktuelle Nutzung geprägte Fläche und deren Zustand allein im Vordergrund steht, nicht das was der Art der aktuellen Flächennutzung voraus geht oder welchen Zustand die Fläche ggf. nach Ende dieser Art der Nutzung annimmt. Diese Punkte müssten miteinbezogen werden, wenn man statt der Flächenbelegung die Flächennutzungsänderung betrachten möchte.

Neben der direkten Belegung von Flächen hat das Energiesystem einen erheblichen Einfluss auf das **Landschaftsbild**. Die Wirkung ist gegeben aber schwer quantifizierbar, da die Wertung des Landschaftsbildes ästhetisch stark von der persönlichen Einschätzung geprägt ist.

4.5.2 Rechtliche Regelungen und politische Ziele zur Flächeninanspruchnahme

Gesetzliche Regelungen im Kontext der **Flächeninanspruchnahme** gibt es insbesondere im Kontext von Naturschutz (BNatSchG) und Bauen (Baugesetzbuch, BauGB), Letzteres mit der Pflicht zum *sparsamen und schonenden Umgang mit Grund und Boden*. Die Umwandlung von

¹⁹ F&E Vorhaben aktuell noch unveröffentlicht - FKZ 3717 31 105 0 „Ermittlung und Verifizierung von Datenquellen und Datengrundlagen für die Berechnung der Flächenrucksäcke“

Wald oder anderen Fluren ist u.a. durch das Bundeswaldgesetz oder Dauergrünlanderhaltungsgesetz mit Genehmigungspflichten versehen. Mit Blick auf die Frage der Wertigkeit von Flächen wird der Entwurf der Bundeskompensationsverordnung – BkompV zukünftig von Relevanz sein. Darin soll bundeseinheitlich der Kompensationsbedarf bei Eingriffen in die Natur ermittelt werden, wofür der vorhandene Zustand von Natur und Landschaft bewertet werden muss.

Von diesen Regelungen abgesehen, sind es vorwiegend politische Ziele, die den Umgang mit dem Flächenverbrauch gestalten. Zu allererst ist hier das in der aktualisierten Nationalen Nachhaltigkeitsstrategie (DNS) (Bundesregierung 2018) verankerte Ziel zu nennen, bis zum Jahr 2030 die Neuinanspruchnahme von Flächen für Siedlungen und Verkehr auf **unter 30 Hektar pro Tag** zu verringern. Im Durchschnitt der Jahre 1993 bis 2003 lag der Flächenverbrauch noch bei 120 Hektar pro Tag.

Ein weiteres zentrales Ziel stellt die nationale Umsetzung des *Sustainable development goal* (SDG) 15.3 *Landdegradationsneutralität* (LDN) dar. Hier stehen der Boden bzw. die nachhaltige Nutzung der Ressource Boden im Vordergrund. Ein solcher Bodenschutzindikator soll gemäß Aussage in der zuletzt 2018 aktualisierten DNS (Bundesregierung 2018, S.41) mit deren Weiterentwicklung in 2020 aufgenommen werden.²⁰ Damit sollen die Folgen von Bodenverlusten aus dem Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsflächen (unter anderem als Einbußen an der Produktion von Biomasse, der Fähigkeit der Aufnahme von Niederschlagswasser oder der Bindung von Treibhausgasen) erfasst und bewertet werden [Bundesregierung 2017²¹].

Der Schutz des **Landschaftsbildes** ergibt sich aus dem Bundesnaturschutzgesetz. Dort ist in § 1 Abs. 1 Nr. 3 BNatSchG formuliert, dass „Vielfalt, Eigenart und Schönheit“ sowie der „Erholungswert von Landschaft“ auf Dauer zu sichern sind. §§ 13 ff. BNatSchG regelt die Eingriffe in Natur und Landschaft, erhebliche Beeinträchtigungen der Schutzgüter sind weitest möglich zu vermeiden. Unvermeidbare Eingriffe bedürfen gem. § 15 Abs. 2 BNatSchG eines entsprechenden Ausgleichs oder einer entsprechenden Ersatzmaßnahme (ggf. auch in Form eines monetären Ausgleichs - Form und Höhe von Kompensationsmaßnahmen sind üblicherweise im Landesrecht geregelt). Die Belange des Landschaftsbildes (insbesondere vorhandene Landschaftsschutzgebiete) sind bei der Planung zu berücksichtigen.

4.5.3 Berichtspflichten und Daten zur Erfolgskontrolle

Die Flächennutzung wird über Destatis Fachserie 3 Reihe 5.1 (Land- und Forstwirtschaft, Fischerei - Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung) jährlich erhoben. Dort werden auch die Flächen für Siedlung nach Nutzungsarten in Deutschland dokumentiert.

Für die Anwendung von Daten zur Flächeninanspruchnahme in einem Monitoring zur Energiewende bedarf es jedoch z.T. differenzierter Daten, als sie von den Statistiken zur Verfügung gestellt werden. In dem aktuell laufenden UFO-Plan-Vorhaben „Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen“ (FKZ 3717 31 105 0) wird eine grundlegende Basis für einen konsistenten Ansatz erarbeitet, um datentechnische und methodische Fragen zur temporären Flächenbelegung durch Prozesse aller Art, sowie Flächennutzungsänderungen in Ökobilanzen von Produkten und Dienstleistungen abbilden zu können (ifeu/Integrahl (o.J.), Reißmann 2019).

Die nachfolgende Tabelle bietet eine Übersicht über die Flächenbelegungen ausgewählter Energieträger und Umwandlungstechnologien.

²⁰ Aus Bundesregierung (2018), S.41

²¹ dort S.197-198

Tabelle 9: Datengrundlage für eine Auswahl der im Rahmen des Projekts Flächenrucksack bearbeiteten Energieträger

Energieträger	Spezifizierung	Belegung ^{a)}	Quelle
Braunkohle	inländischer Abbau	0,552 m ² *a/GJ (Heizwert)	Statistik der Kohlewirtschaft e.V. (2020)
Steinkohle	Importmix	0,103 m ² *a/GJ (Heizwert)	Ecoinvent 3.5
Erdöl	Importmix	0,011 m ² *a/GJ (Heizwert)	Ecoinvent 3.5
Erdgas	Importmix (konventionelle Gewinnung)	0,014 m ² *a/GJ (Heizwert)	Ecoinvent 3.5
Windenergie	Onshore, inländisch	0,25 m ² *a/GJ Strom	ifeu/UBA
Photovoltaik	Freiflächen-PV, inländisch	6,11 m ² *a/ GJ Strom	ifeu/UBA

Quelle: Werte berechnet durch ifeu auf der Basis der jeweils angebenen Quellen, Werte zu Windenergie sind derzeit noch in Überprüfung mit Fachexperten des Umweltbundesamts

Nun unterscheiden sich die Anwendungsziele zwischen einem Flächenrucksack für einzelne Produkte und einem (Meta-)Flächenindikator für die Bewertung der Energiewende insgesamt. Jedoch lassen sich Ökobilanzdaten zur Flächenbelegung z.B. durch das Produkt Strom aus Windenergie durchaus als zweckmäßige Datengrundlage für einen (Meta-)Indikator, der u.a. die Flächenwirkung von Windenergieanlagen beinhaltet soll, verwenden. Entscheidend ist dabei der Bezug zum bewertenden System.

Ein solcher Flächenindikator kann dabei Antworten zu diesen übergeordneten Fragestellungen liefern:

- Wie entwickelt sich die Flächenbelegung (nach gewichteten Flächenkategorien)?
- Was sagt das über die Umweltverträglichkeit der Energiewende aus?

Eine bundeseinheitliche Datenerhebung zum **Landschaftsbild** besteht nicht. Für die Dokumentation der landschaftsästhetischen Aspekte durch die direkte Flächeninanspruchnahme gibt es keine Berichtspflicht.

4.5.4 Der Wirkpfad Flächeninanspruchnahme im Bewertungsmodell

Die **Nutzung von Fläche** steht mit zahlreichen Wirkungen und Schutzgütern in Beziehung. Zunächst ist Fläche an sich als Schutzgut zu werten. Sie stellt ein begrenzt zur Verfügung stehendes und durch nichts zu substituierendes Gut dar. Fläche weist jedoch eine Vielzahl von Funktionalitäten auf, die durch eine Nutzung verändert, beeinträchtigt oder sogar ganz eliminiert werden können. Viele dieser Funktionalitäten werden u.a. in den sogenannten Ökosystemleistungen zusammengefasst (TEEB 2010). So steht Fläche in Form intakter Ökosysteme in direkter oder indirekter Verbindung u.a. mit dem Klimaschutz (Kohlenstoffsенke), dem Schutz von Böden und deren Fruchtbarkeit, der Aufrechterhaltung von Wasserkreisläufen oder der Sicherstellung von sauberem Trinkwasser.²²

²² <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/flaeche/folgen-der-flaechennutzung#flaechennutzungen>

Vor den Ökosystemleistungen sind jedoch Ökosysteme selbst beziehungsweise deren Intaktheit zu sehen, und mit ihnen das zentrale Schutzgut Biodiversität. Wenngleich Biodiversität von vielen Wirkpfaden sowie auch dem Klimawandel betroffen ist, gelten die Folgen der Flächennutzung als Haupttreiber für den Verlust von Biodiversität (IPBES 2019). Allerdings sind die Wirkungen der Flächennutzung je nach Nutzungsart unterschiedlich, so dass eine Differenzierung sinnvoll ist.

Im Rahmen der Ökobilanzmethodik gemäß UBA (1999) wird die Hemerobie als Indikator für die Bewertung von Naturrauminanspruchnahme verwendet. Sie drückt das Maß an menschlichem Eingriff in ein Ökosystem aus und bezieht sich auf ein Schutzgut, welches sich formulieren lässt als: „Standortbezogene Selbstregulation von Ökosystemen“. So kann die in Anspruch genommene Fläche gemäß dessen Wirkung gewichtet werden und die Flächeninanspruchnahme verschiedener Nutzungen miteinander ins Verhältnis gesetzt werden. Dieser Ansatz wurde im Rahmen der Arbeiten im UBA-Projekt „Aktualisierung der UBA-Methodik zur Ökobilanzierung“ als auch weiterhin geeignet für die Bewertung von Flächen gewertet und zwischenzeitlich in verschiedenen Arbeiten weiterentwickelt (Fehrenbach et al. 2015). Auch im Rahmen des Projekts Flächenrucksack wird Hemerobie zur Charakterisierung von Flächenqualitäten eingesetzt.

Die Vorteile des Hemerobie-Ansatzes sind:

- ▶ Hemerobie ist ein seit etwa 50 Jahren eingeführte Werteskala seitens der landschaftsökologischen Forschung (Jalas 1955, Sukopp 1972, Kowarik 1999, Kowarik 2014), in der Fachszene etabliert und anerkannt und durch die Zuordnung in ein hierarchisches Klassensystem leicht nachvollziehbar.
- ▶ Hemerobie verhält sich nicht deckungsgleich mit Biodiversität, es besteht jedoch in weitem Maße eine Übereinstimmung (Winter 2012); in einem aktuellen Projekt des Bundesamts für Naturschutz (BfN) zu Biodiversität in Ökobilanzen [IBP/ifeu/ TUB o.J.] ist Hemerobie als repräsentatives Maß für Biodiversität definiert und wird vom BfN so mitgetragen.
- ▶ Hemerobie kann auch viele Aspekte von Ökosystemleistungen abdecken: je geringer die Eingriffe des Menschen in den Naturhaushalt, desto intakter die Ökosysteme und damit auch ihre Leistungsfähigkeit (Maes et al. 2011).

Der Einfluss auf das **Landschaftsbild** z.B. von Windenergieanlagen wird im Rahmen der Erstellung von Flächennutzungsplänen und Genehmigungsverfahren bewertet. Am Beispiel einer Planung im Schwarzwald wurden von (Miethaner und Bauer 2018) folgende Aspekte analysiert:

- ▶ Ausmaß der Sichtbarkeit (z.B. in einem 10 km Radius um einen Windpark)
- ▶ Proportionalität zu den natürlichen Höhengsprüngen im Gelände
- ▶ Anordnung in vorhandene Geländesprünge
- ▶ Blickfeldbelastung bzw. „Horizontverschmutzung“

Im Ergebnis kann durch derartige Analysen eine Kartierung der Planungsgebiete erfolgen, wie sie am Beispiel der Stadt Freiburg im Bereich Schauinsland vorgenommen wurde.

Eine einheitliche Kartierung des Einflusses der derzeit installierten ca. 29.500 Windenergieanlagen auf das Landschaftsbild liegt jedoch nicht vor. Zudem müssten in gleicher Weise andere An-

lagen des Energiesystems, insbesondere die ca. 100 GW Kraftwerke und ca. 25.000 Trassen des Übertragungsnetzes bewertet werden.

4.5.5 Systemraum und Ableitung der Indikatoren für den Wirkpfad Flächeninanspruchnahme

4.5.5.1 Auswahl der Indikatoren

Für den Wirkpfad Flächeninanspruchnahme werden die folgenden Indikatoren als geeignet für die Abbildung der Umweltauswirkungen der Energiewende bewertet:

- ▶ Temporäre Flächenbelegung durch das Energiesystem in [km²]
- ▶ Temporäre Flächenbelegung durch das Energiesystem charakterisiert anhand der Hemero-
bie in [km² aF-Äq.] ²³
- ▶ Indirekte Flächeninanspruchnahme mit potenziellen Auswirkungen auf das Landschaftsbild
[ha]

4.5.5.2 Systemraum

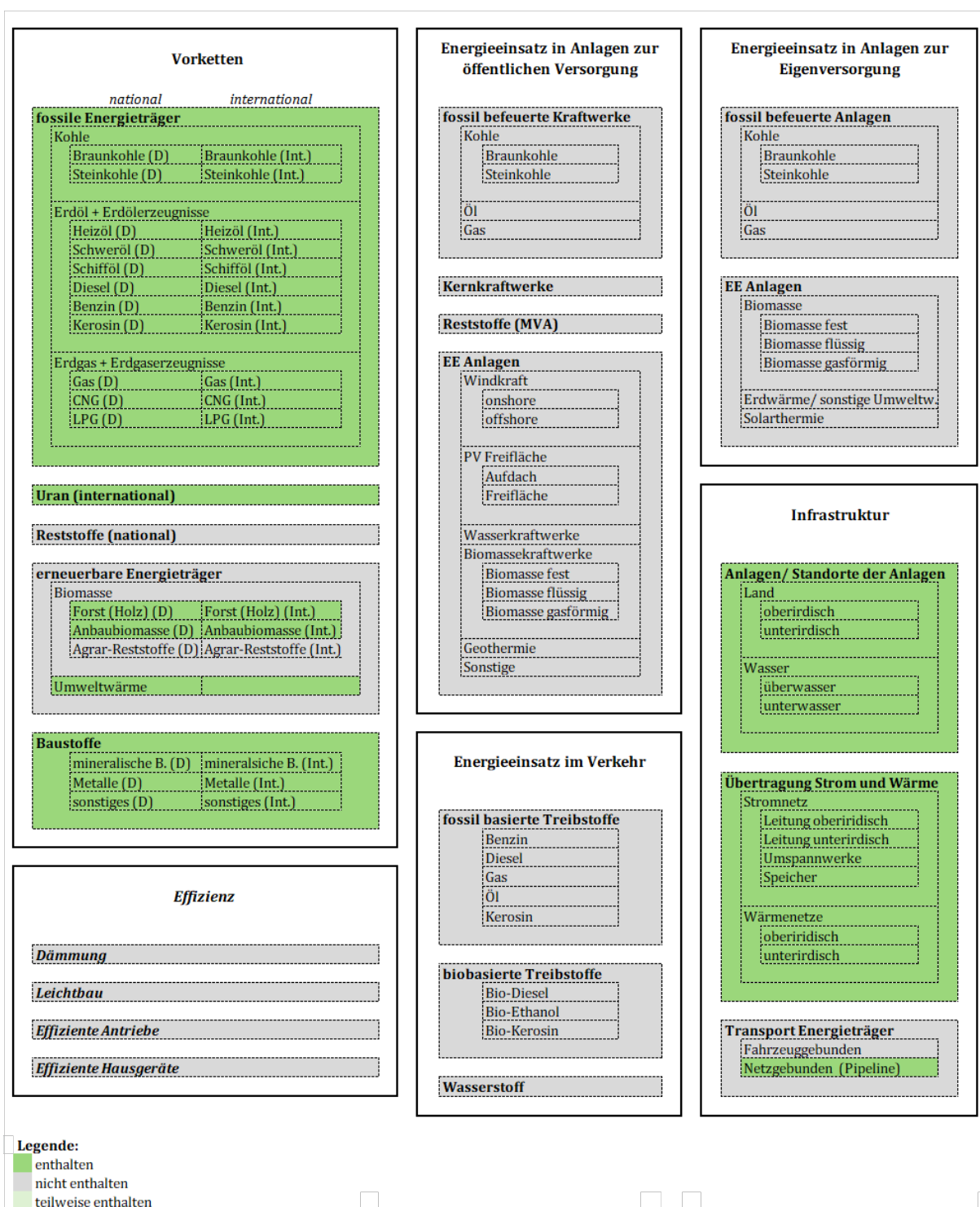
Der in Kapitel 3.3.2 definierte Systemraum wird auf die Bestandteile eingegrenzt, die mit direkten bzw. indirekten Flächenbelegungen einhergehen. Die Bestandteile Energieeinsatz in der öffentlichen Versorgung, Energieeinsatz im Verkehr und Energieeinsatz in Anlagen zur Eigenversorgung bleiben ausgeklammert, denn die Flächenbelegungen durch die Anlagen sind der Infrastruktur zuzuordnen, die Flächenbelegungen durch den Ab- bzw. Anbau der Energieträger in den Vorketten. Lediglich die Vorketten der Reststoffe bleiben ausgespart, da diese per Definition lastenfrei in das System übernommen werden.

Relevant für das Verständnis des Systemraums ist, dass alle Anlagen, die innerhalb oder auf Gebäuden installiert sind, die nicht primär dem Zweck der Ummantelung der Anlage dienen, keinen Flächenverbrauch generieren. Dies betrifft insbesondere die Dachflächen-PV- Anlagen und die Dachflächen-Solarthermie-Anlagen sowie die Mehrheit der Anlagen zur Eigenversorgung (Hausheizungen etc.).

²³ In Analogie zu anderen Charakterisierungsmodellen für Ökobilanzen wie z.B. Global Warming Potential in CO₂-Äq. für Klimawandel wurde durch ifeu als Referenzgröße für die Charakterisierung von Fläche der Begriff der artifizielle-Fläche-Äquivalenz (aF-Äq.) gewählt;

Dieser Ansatz kann natürlich auch durch einen alternativen ähnlichen Ansatz (z.B. Degradation) ersetzt werden.

Abbildung 14: Zu betrachtender Systemraum für den Wirkpfad Flächeninanspruchnahme



Quelle: eigene Darstellung ifeu 2020

4.5.5.3 Ableitung der Indikatoren

Denkmodell für einen Indikator zur Abbildung der temporären Flächenbelegung durch das Energiesystem

Dieser Indikator bildet sozusagen den primären Wert, da er keinerlei Wirkungsbezug außer der reinen Flächenbelegung beinhaltet. Das bedeutet: 1 ha Kraftwerksfläche wird hier gleichbehandelt wie 1 ha Acker oder 1 ha Wald.

Ermittelt wird der Indikator auf Basis folgender Datengrundlagen:

1. Energieträgermix:

Grundlage sind die aufgestellten Bilanzen für die Strom- und Wärmeerzeugung sowie für den Verkehr in Deutschland, die durch die Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien Statistik (AGEE-Stat) und durch die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB) erstellt werden. Relevant für den Indikator sind die Angaben der Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland (AGEB 2020) aus den Tabellen „2.1. Primärenergieverbrauch nach Energieträgern“ und „3.1 Primärenergieverbrauch Erneuerbare Energien“.

2. Flächenbelegungs-Faktoren für Primärenergieträger:

Die Mengen an eingesetzten Primärenergieträgern werden jeweils mit den Flächenbelegungs-Faktoren multipliziert. Diese Faktoren stellen ein Ergebnis des Projekts Flächenrucksack dar und sind für alle (relevanten) Energieträger verfügbar.

3. Flächenbelegungs-Faktoren für Infrastruktur:

Die Flächenwirkung des Energiesystems beruht überwiegend auf der Gewinnung von Primärenergieträgern (Abbau von fossilen Rohstoffen, Anbau von Energiepflanzen, Konversion von Wind und Sonne etc.), bedarf jedoch auch der Betrachtung von Infrastruktur im Sinne von:

- thermischen Kraftwerksanlagen (Konversion von fossilen oder biogenen Primärenergieträgern)
- Übertragungsnetzen (Einrichtungen zum Transport von Strom, Transformation, oder auch Wärmeleitungen, sofern diese Fläche belegen)

Für diese Infrastruktureinrichtungen werden im Rahmen des Projekts Flächenrucksack ebenfalls Flächenbelegungs-Faktoren definiert, bei der die funktionale Einheit (Ökobilanz-Bezug) die genutzte Endenergie darstellt (z.B. 1 kWh Strom) und die Einrichtungen somit über die Produktionskette einbezogen werden können.

Die Zusammenführung zu den Indikatorgesamtwerten (zunächst für Indikator A) erfolgt jeweils separat für die Flächenbelegungssummen der einzelnen Sektoren Strom, Wärme und Verkehr (auf Primärenergiebasis). Die Komponenten und der Berechnungsweg für den Indikator A am Beispiel Strombereich ist in Tabelle 10 zusammengestellt. Die Flächenbelegungs-Faktoren für die Rohstoffe (f_{xx}) enthalten bereits alle Belegungen bis zum Kraftwerk (Rohstoffabbauflächen, Flächen für Pipelines). Diese müssen zur Umrechnung auf Strom durch die mittleren elektrischen Wirkungsgrade der Kraftwerke im Stromnetz (η_{elxxW}) geteilt werden. Anschließend wird der spezifische Flächenbelegungsfaktor für die jeweiligen Kraftwerke (f_{xxW}) hinzuaddiert. Auf diese Weise resultiert ein Belegungsfaktor für Strom aus jedem einzelnen Energieträger, der mit der im Bezugsjahr erzeugten Strommenge des Energieträgers (E_y) gewichtet wird. Für den Strommix werden die einzelnen Anteile der Flächenbelegung (in km²) aggregiert und schließlich die Flächenbelegung für die Netzinfrastuktur hinzugefügt.

Tabelle 10: Berechnungsweg für den Indikator A für den Strombereich

	Flächenbelegungs-Faktoren ²⁴ [m ² ·1a/GJ]				Anteile am Strom-mix [PJ/a]	Elektr. Wirkungs-grad	Berechnungs-Formel
	Rohstoff	direkte EE-Strom-erzeugung	Konversion	Transport/Transform.			
Braunkohle	f _{BK}		f _{BKW}		E _{BK}	η _{elBKW}	(f _{BK} / η _{elBKW} + f _{BKW}) · E _{BK}
Steinkohle	f _{SK}		f _{SKW}		E _{SK}	η _{elSKW}	+ (f _{SK} / η _{elSKW} + f _{SKW}) · E _{SK}
Erdöl	f _{EÖ}		f _{EÖKW}		E _{EÖ}	η _{elEÖKW}	+ (f _{EÖ} / η _{elEÖKW} + f _{EÖKW}) · E _{EÖ}
Erdgas	f _{EG}		f _{GKW}		E _{EG}	η _{elGKW}	+ (f _{EG} / η _{elGKW} + f _{GKW}) · E _{EG}
Kernkraft	f _{KK}		f _{KKW}		E _{KK}	η _{elKKW}	+ (f _{KK} / η _{elKKW} + f _{KKW}) · E _{KK}
Windenergie (onshore)		f _{WE-}			E _{WE}		+ f _{WE} · E _{WE}
Photovoltaik (PVA-FF)		f _{FFPV}			E _{FFPV}		+ f _{FFPV} · E _{FFPV}
Biogas (Mais)	f _{BG}		f _{BHKW}		E _{BG}	η _{elBHKW}	+ (f _{BG} / η _{elBHKW} + f _{BHKW}) · E _{BG}
Feste Bio-brennstoffe	f _{FB}		f _{BMKW}		E _{FB}		+ (f _{FB} · η _{elBMKW} + f _{BMKW}) · E _{FG}
Müllverbren-nug			f _{MVA}		E _{MVA}		+ f _{MVA} · E _{MVA}
Netzinfrac-struktur				f _{TT}			+ f _{TT} · ΣE
Summe							Σ := Flächenbelegung des Strombereichs in [km²]

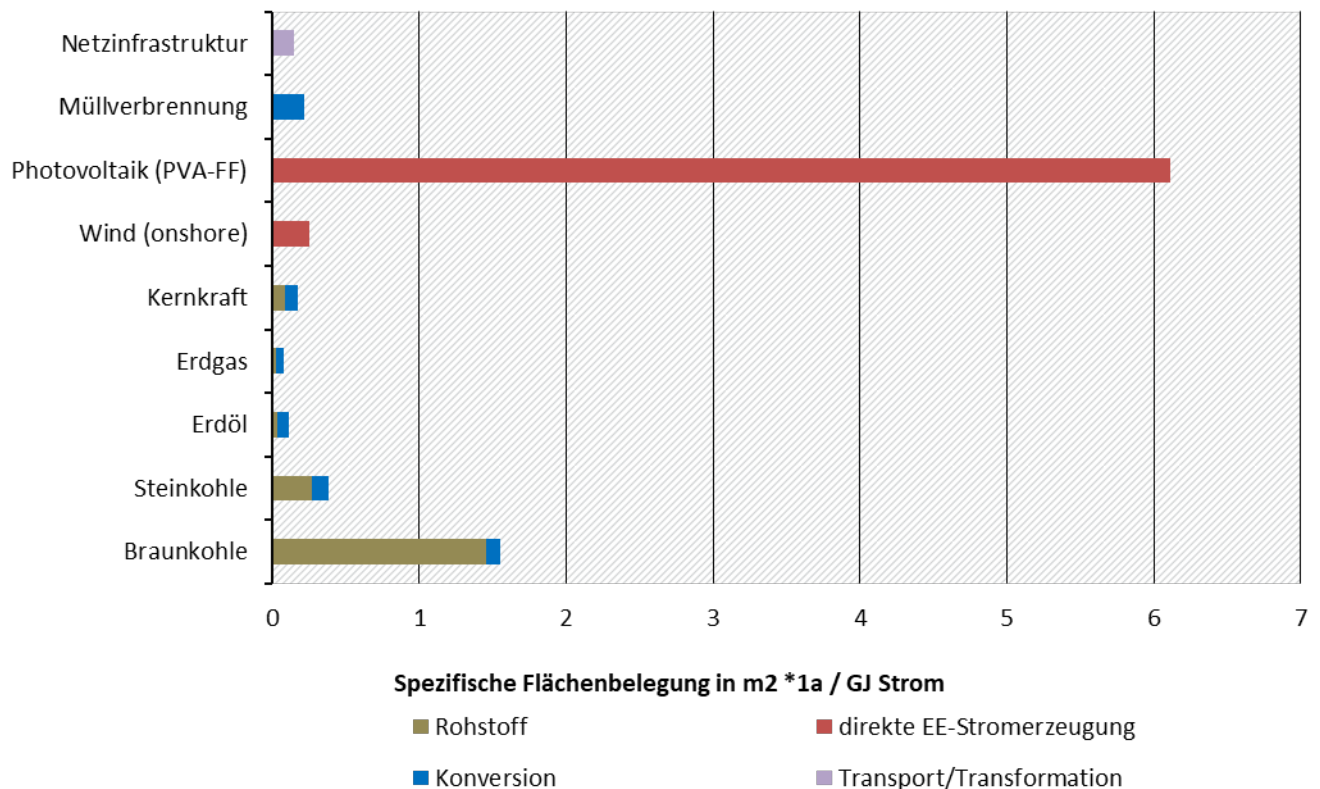
Quelle: Zusammenstellung durch ifeu 2020

Abbildung 15 gibt einen Überblick über die spezifischen Flächenbelegungs-faktoren für verschiedene Energieträger zur Stromerzeugung. Diese Daten liegen auch für den Wärme- und Verkehrsbereich vor. Die Biomasse wurde aus der Darstellung ausgenommen, da sie mit Belegungs-faktoren von 250 m²·1a/GJ für feste Biomasse und 150 m²·1a/GJ Biogas (Mix) außerhalb der Bandbreite der übrigen Belegungs-faktoren liegen. Eine gemeinsame Darstellung würde daher das Bild für die anderen Belegungs-faktoren verschließen. Die Belegungs-faktoren für Biogas und feste Biomasse werden zu über 99 % vom Rohstoff (Mais, andere nachwachsende Rohstoffe und

²⁴ Für Energieträger, denen keine Flächenbelegung durch Rohstoff oder Konversion angerechnet wird (Offshore-Windenergieanlagen, Dachflächen-PV, Wasserkraftwerke), sind keine auch keine Flächenbelegungs-Faktoren angeführt.

Waldholz) bestimmt. Die dokumentierten Werte enthalten keine Aussagen zu einer potenziellen Reversibilität der Flächenbelegungen. Diese ergibt sich durch die Betrachtung einer Zeitreihe und der darin ersichtlichen Zu- und auch Abnahmen. Zur Verdeutlichung der zeitlichen Komponente sind die Flächenbelegungsfaktoren in m^2 pro Jahr ausgedrückt.

Abbildung 15: Spezifische Flächenbelegungsfaktoren für verschiedene Energieträger zur Stromerzeugung für den Indikator A (ohne Biomasse)



Quelle: [ifeu / integrall o.J.]

Denkmodell für einen Indikator zur Abbildung der temporären Flächenbelegung durch das Energiesystem charakterisiert anhand der Hemerobie

Dieser Indikator liefert gegenüber dem primären Wert eine Zusatzinformation, indem sie die reinen Hektar-Werte qualitativ charakterisiert. Er basiert zunächst auf einem siebenstufigen Klassenmodell: Mit der höchsten Klasse für Flächen ohne Hemerobie (unbeeinflusstes Ökosystem, z.B. Primärwald) über alle vom Menschen genutzten Flächen (z.B. forstlich genutzter Wald, Agrarland, Abbauf Flächen, Deponie, Siedlungen) die je nach Maß an Hemerobie in die Klassen II bis VII einsortiert werden. Zur Aggregation zu einem einzigen Indikatorwert haben Fehrenbach et al. (2015) ein Charakterisierungsmodell entwickelt, das die Zusammenführung der nach Klassen unterschiedenen Flächenanteile zu einem aggregierten Indikatorwert, dem Naturfernenpotenzial (NFP), für die Wirkungskategorie Naturraumbeanspruchung ermöglicht.

Für versiegelte, überbaute wie auch für den überwiegenden Teil der Rohstoffabbau-Flächen (Klasse VII) beträgt der Charakterisierungsfaktor 1, sodass für diese Flächen der Indikator B identisch ausfällt wie Indikator A. Die weiteren Klassen erfolgt jeweils eine Halbierung des Cha-

Charakterisierungsfaktors (Klasse VI → Faktor 0,5; Klasse V → Faktor 0,25, usw.). Das Charakterisierungsmodell folgt damit einer einfachen exponentiellen Funktion.

Unterschiede zwischen Indikator A und B ergeben sich somit für alle anderen Fläche wie z.B. Ackerfläche (Mais für Biogas, Raps für Biokraftstoffe), Wald (Energieholz), oder auch Brachflächen o.Ä. (z.B. unversiegelte Plätze, der unversiegelte Anteil von Freiland-PV-Flächen). Da bei Letzteren die Unterschiede zwischen Indikator A und B z.T. erheblich ausfallen können und die Frage der Qualität der belegten Flächen auch eine relevante Information darstellt, sollte der Indikator mit Hemerobie vorrangig betrachtet werden.

Ermittelt wird der Indikator, indem die Flächenbelegungs-Faktoren für Primärenergieträger und Infrastruktur (Indikator A) jeweils mit korrespondierenden Charakterisierungsfaktoren multipliziert werden. Diese Faktoren werden ebenfalls im Projekt Flächenrucksack entwickelt und für alle (relevanten) Energieträger verfügbar gemacht. Eine Zusammenstellung findet sich in Tabelle 11.

Tabelle 11: Im Rahmen des Projekts Flächenrucksack bearbeitete Hemerobiefaktoren zur Charakterisierung der Flächenbelegung durch Energieträger in artifizielle-Fläche-Äquivalente (aF-Äq.) (Werte z.T. vorläufig, noch in Bearbeitung)

Energieträger	Spezifizierung	Charakterisierungsfaktor m ² aF-Äq./ m ²
Braunkohle	Abbaufläche, (Infrastruktur)	1
Steinkohle	Abbaufläche, (Infrastruktur)	1
Erdöl	Abbaufläche, (Infrastruktur, v.a. Raffinerie)	1
Erdgas	Abbaufläche, (Infrastruktur v.a. Pipeline)	1
Uranerz	Abbaufläche, (Infrastruktur v.a. Pipeline)	1
Windenergie (onshore)	Offenland:	0,65 ^{a)}
	Wald:	0,54 ^{b)}
Photovoltaik (PVA-FF)	Versiegelung: 3 % Anteil, Brachfläche: 97% Anteil	0,35 ^{a)}
Geothermie	Betriebsfläche	1
Biogas	Mais	0,5
Feste Biobrennstoffe	Waldholz	0,25
Stromnetzinfrastuktur	Versiegelung (Fläche/Strom-Gesamtproduktion)	1
	Brachfläche (Fläche/Strom-Gesamtproduktion)	0,5
	Beeinträchtigte Waldfläche ^{b)} (Fläche/Strom-Gesamtproduktion)	0,25

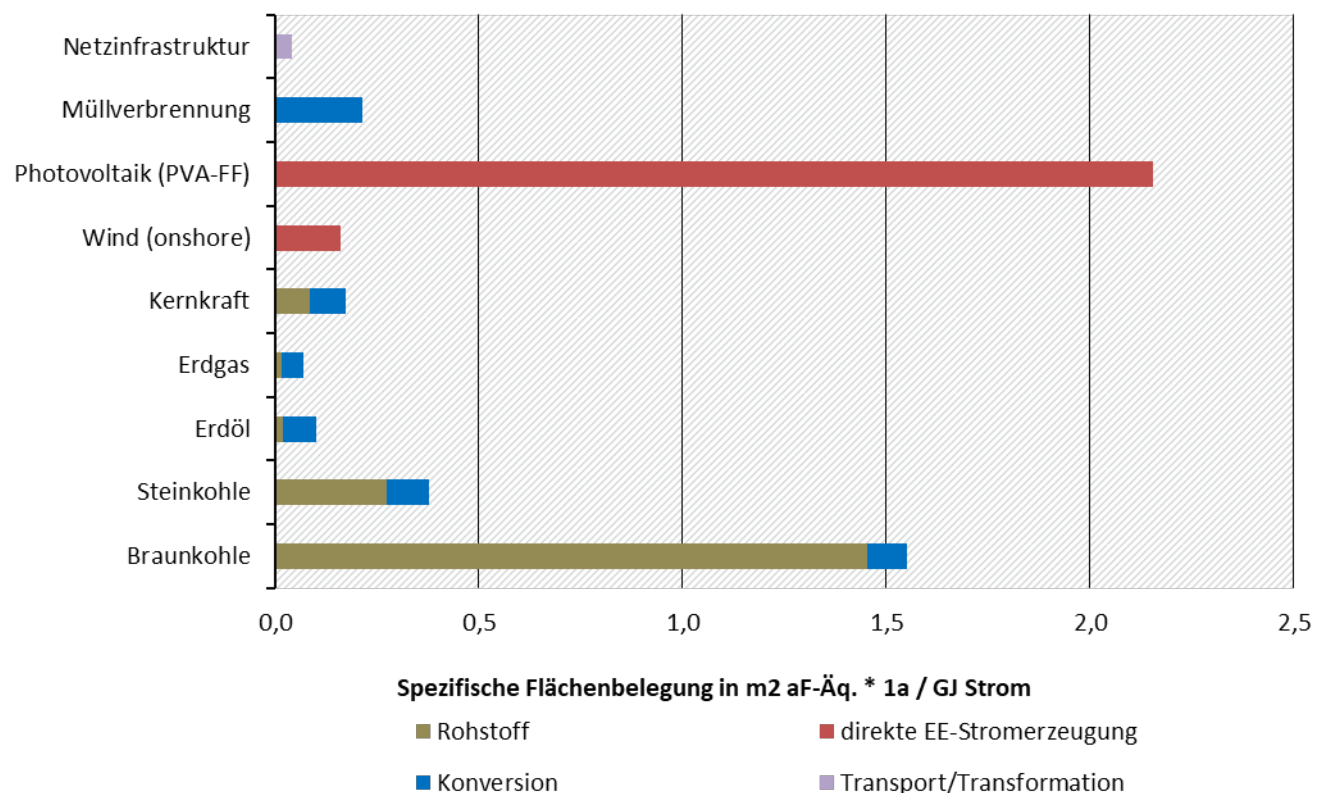
Quelle: Analysen des ifeu im Rahmen des Projekts „Flächenrucksack“ (ifeu/Integrahil o.J.)

Anmerkung: Diese Werte kommen durch die Kombination jeweiliger Anteile versiegelter Fläche und Brachflächen unterschiedlicher Hemerobie (geschotterte Flächen, grünlandartiger Aufwuchs, niedrig gehaltene Gehölze) zustande.

Unter „beeinträchtigter“ Waldfläche wird hier der Umgebungsbereich einer Anlage (z.B. WEA im Wald oder Stromtrasse) verstanden, deren Nutzung als Waldfläche aufgrund der Anlage stark eingeschränkt ist und somit gemäß der Definition von Flächenbelegung der Anlage zuzurechnen ist

Abbildung 16 gibt einen Überblick über die spezifischen Flächenbelegungsfaktoren für verschiedene Energieträger zur Stromerzeugung für den Indikator B. Auch diese Daten liegen für den Wärme- und Verkehrsbereich vor. Die Biomasse wurde auch hier aus der Darstellung ausgenommen. Sie liegt für feste Biomasse bei $36 \text{ m}^2 \text{ aF} \cdot 1 \text{ a} / \text{GJ}$ und bei $56 \text{ m}^2 \text{ aF} \cdot 1 \text{ a} / \text{GJ}$ für Biogas (Mix). Gerade an der Biomasse ist der Unterschied zwischen Indikator A und B somit deutlich zu sehen. Ebenso bei Freiland-PV: von etwa $6 \text{ m}^2 \text{ aF} \cdot 1 \text{ a} / \text{GJ}$ reduziert sich der Wert auf ca. $2 \text{ m}^2 \text{ aF} \cdot 1 \text{ a} / \text{GJ}$ und liegt damit nahe an der Braunkohle.

Abbildung 16: Spezifische Flächenbelegungsfaktoren für verschiedene Energieträger zur Stromerzeugung für den Indikator B



Quelle: [ifeu / integrall o.]

Denkmodell für einen Indikator zur Abbildung der indirekten Flächeninanspruchnahme mit Auswirkung auf das Landschaftsbild

Der Einfluss auf das Landschaftsbild z.B. von WEA wird im Rahmen der Erstellung von Flächennutzungsplänen und Genehmigungsverfahren bewertet. Am Beispiel einer Planung im Schwarzwald wurden von (Miethaner und Bauer 2018) folgende Aspekte analysiert:

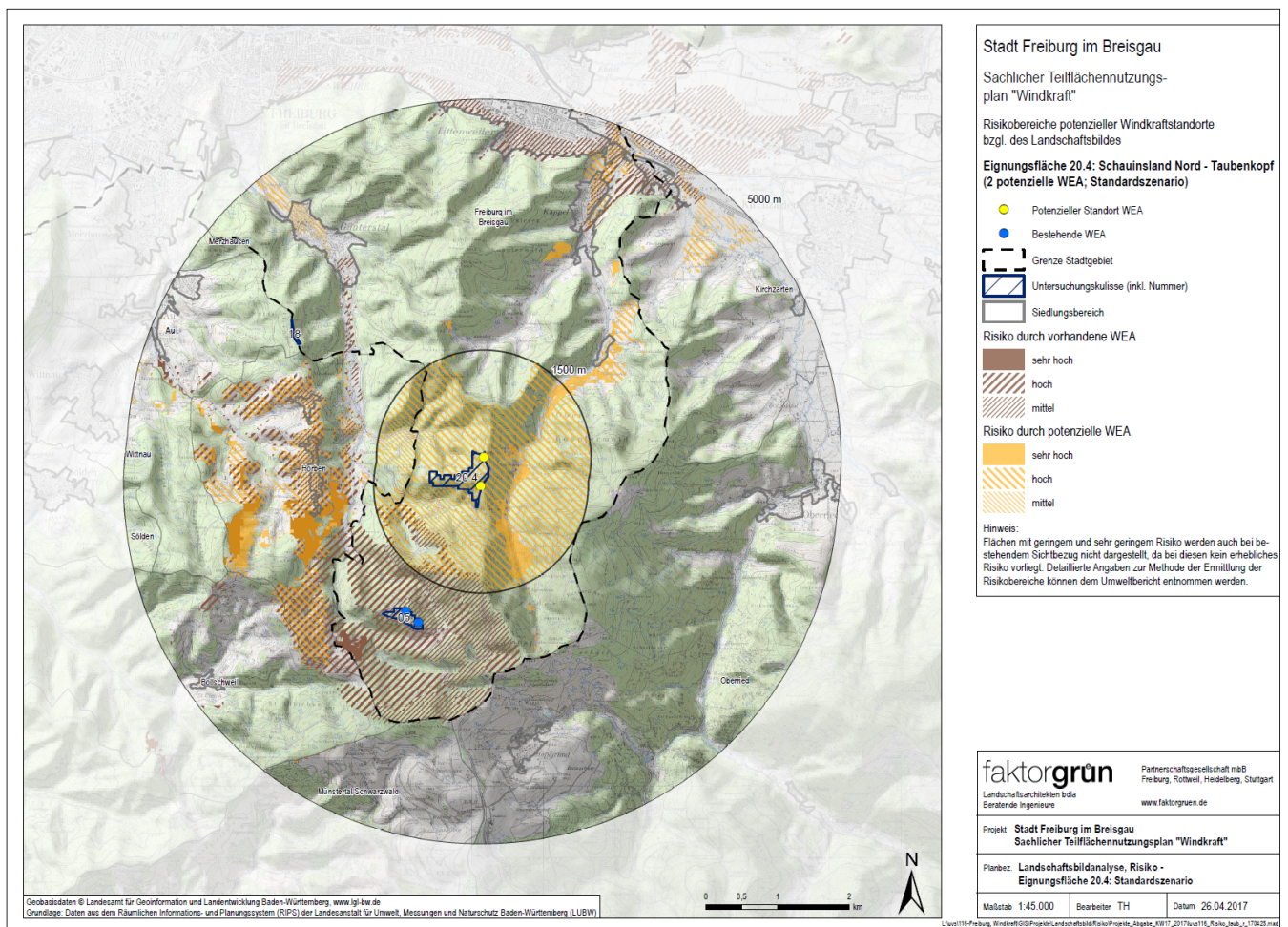
- Ausmaß der Sichtbarkeit (z.B. in einem 10 km Radius um einen Windpark)
- Proportionalität zu den natürlichen Höhengsprüngen im Gelände

- Anordnung in vorhandene Geländesprünge
- Blickfeldbelastung bzw. „Horizontverschmutzung“

Im Ergebnis kann durch derartige Analysen eine Kartierung der Risikogebiete erfolgen, wie sie am Beispiel der Planungen der Stadt Freiburg für den Bereich Schauinsland vorgenommen wurde (Abbildung 17).

Eine einheitliche Kartierung des Einflusses auf das Landschaftsbild der derzeit installierten 29.500 WEA liegt jedoch nicht vor. Zudem müssten in gleicher Weise andere Anlagen des Energiesystems, insbesondere des 100 GW Kraftwerkparks und ca. 24.000 Trassen-km des Übertragungsnetzes bewertet werden.

Abbildung 17: Landschaftsbildbewertung: Beispiel Stadt Freiburg



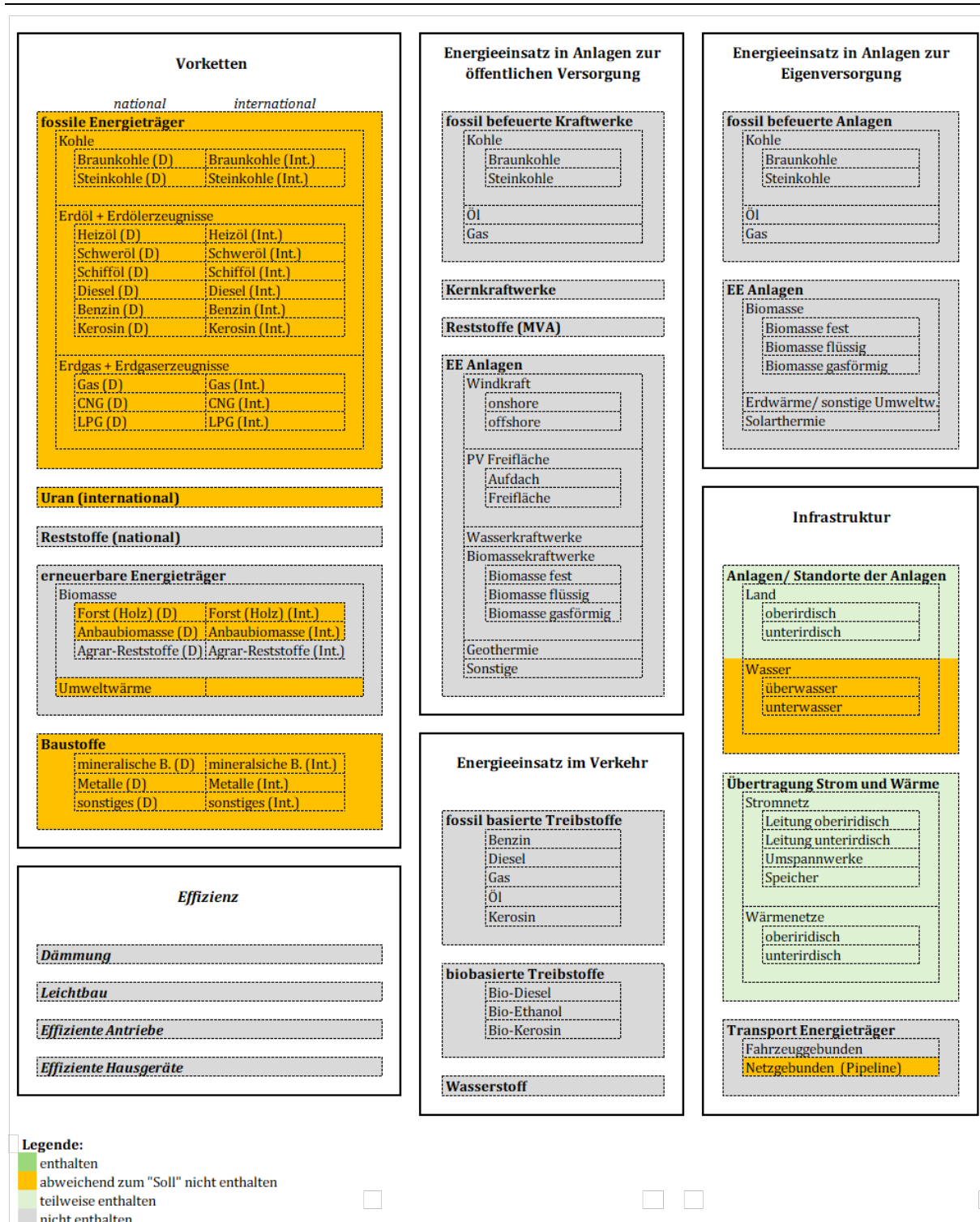
Quelle: Stadt Freiburg (2017)

Für eine quantitative Bewertung der Auswirkungen auf das Landschaftsbild fehlen einheitliche und zuverlässige Daten. Deshalb wird hier ein vereinfachtes Verfahren für ausgewählte Teile des Energiesystems gewählt. Hilfsweise werden Abstandsregelungen zur Ermittlung der beeinträchtigten Fläche für konventionelle Kraftwerke, Windenergieanlagen und das Übertragungsnetz herangezogen. BHKW, Geothermie und Laufwasserkraftwerke sowie Freiland-PV-Anlagen werden wegen der untergeordneten Bedeutung und fehlender Abstandsregelungen nicht berücksichtigt.

In den Indikatoren abbildbarer Systemraum und Repräsentativität der Indikatoren für die Bereiche der Energiewende

Die abgeleiteten Indikatoren für die temporäre Flächenbelegung mit und ohne Gewichtung anhand der Hemerobie bilden den in Kapitel 4.5.4.2 definierten Systemraum vollumfänglich ab. Die durch die Flächeninanspruchnahme des Energiesystems indizierten Umweltfolgen können somit dargestellt werden.

Abbildung 18: Betrachteter Systemraum für den Indikator zur Abbildung der indirekten Flächeninanspruchnahme mit Auswirkungen auf das Landschaftsbild



Quelle: eigene Darstellung ifeu 2020

Der erarbeitete Indikator für die indirekte Flächeninanspruchnahme mit Auswirkungen auf das Landschaftsbild nimmt jedoch nur eine Auswahl an Infrastruktureinrichtungen in den Fokus, Feuerungsanlagen der öffentlichen Versorgung, Windenergieanlagen und Überlandleitungen des Übertragungs- und Verteilnetzes. Damit sind zwar die Infrastrukturanlagen, deren Auswirkungen auf das Landschaftsbild in der Regel öffentlich diskutiert werden integriert, jedoch fehlen

die Flächeninanspruchnahmen der Vorketten für Energieträger und Baustoffe. Insbesondere die Flächeninanspruchnahme für den Braunkohletagebau führen zu Auswirkungen auf das Landschaftsbild. Außerdem lassen sich die Auswirkungen des Anbaus von Biomasse (Stichwort „Vermaisung“ der Landschaft) nicht mit einem vergleichbaren Ansatz einbeziehen. Die Absenz dieser Aspekte führt zu einer nur eingeschränkten Repräsentativität dieses Indikators für den Bereich der Energiewende.

Zusammenfassung

Die folgenden Indikatoren werden als geeignet bewertet wurden, um die Auswirkungen des Fortschreitens der Energiewende auf die Schutzgüter Tiere / Pflanzen / Biodiversität, Flächen, Landschaft sowie kulturelles Erbe und sonstige Sachgüter über den Wirkpfad Flächeninanspruchnahme hinreichend detailliert zu beschreiben:

- ▶ Temporäre Flächenbelegung durch das Energiesystem in km²
- ▶ Temporäre Flächenbelegung durch das Energiesystem charakterisiert anhand der Hemerobie in km² aF-Äq.
- ▶ Indirekte Flächeninanspruchnahme mit Auswirkungen auf das Landschaftsbild in ha

Die erforderliche Datenbasis für die Indikatoren ist vorhanden und fortschreibefähig.

4.6 Wirkpfad Rohstoffnutzung bzw. Ressourcennutzung

4.6.1 Definition

Im Folgenden wird von Rohstoffen gesprochen. (Natürliche) Ressourcen sind in der UBA-Terminologie sehr viel umfassender, und beinhalten beispielsweise auch Flächen oder strömende Ressourcen wie Wind oder Gezeiten (UBA, 2012). Unter Rohstoffen werden allgemein alle physisch dinglichen Stoffe verstanden, die der Mensch der Erde entnimmt, um sie wirtschaftlich zu nutzen.

Im Detail gibt es Unterschiede, was als Rohstoff gezählt wird. So wird beispielsweise unter Ökonomen vor allem der bepreiste Rohstoff gezählt, in der Materialflussrechnung sind auch nicht bepreiste Rohstoffe wie im Wald gesammeltes Brennholz oder Weidepflanzen enthalten. In der Materialflussrechnung gibt es Indikatoren, die zusätzlich ungenutzte Entnahmen (bspw. Abraum) enthalten, während andere Materialflussindikatoren vor allem die Rohstoffe zählen, die in die monetäre Ökonomie einfließen. Wasser, oder auch Schrotte sind als bepreiste Stoffe in ökonomischer Hinsicht ein Rohstoff, in gängigen Materialflussrechnungen sind jedoch Sekundärrohstoffe und Wasser nicht enthalten, sondern nur sogenannte Primärrohstoffe, die der Mensch erstmals der Erde entnimmt.

Im vorliegenden Bericht wird der Begriff Rohstoffe nach der Definition von Eurostat (2018) genutzt. Diese Definition liegt auch den offiziellen Materialflussrechnungen in Deutschland zu Grunde. Rohstoffe umfassen alle Materialien, die vom Menschen (einschl. Nutztieren) aus der Erde entnommen und ökonomisch verwertet werden. Für ökonomieweite Analysen und Übersichten werden im Allgemeinen biotische und abiotische Materialien differenziert ausgewiesen, und abiotische Materialien werden nach fossilen, metallischen und nicht-metallischen Mineralen weiter untergliedert. Die gängige Einheit ist Tonnen. Zusätzlich werden in diesem Bericht ausgewählte Sekundärrohstoffe und Abfälle berücksichtigt, sofern sie im Energiesystem relevant sind.

Der Kern der Energiewende besteht darin, die fossilen Rohstoffe durch erneuerbare Quellen zu ersetzen. Das bedeutet, mit der Transformation des Energiesystems ändert sich der Bedarf und die Nutzung von Rohstoffen signifikant. Der Rohstoffindikator bzw. die Rohstoffindikatoren sollen diese Veränderungen abbilden. Darüber hinaus soll er im Besonderen, die sich im Zuge der Energiewende verändernde Nachfrage nach ökonomisch oder ökologisch potenziell kritischen Rohstoffen aufzeigen und im Ergebnis Aussagen zur Umweltverträglichkeit bei der Rohstoffnutzung im Rahmen der Energiewende ermöglichen.

4.6.2 Rechtliche Regelungen

Je nach Rohstoff unterliegt die Entnahme, Nutzung und Entsorgung unterschiedlichen gesetzlichen Regelungen. Im Folgenden sind wesentliche Regelungen, die in diesem Zusammenhang zu nennen sind, ohne Anspruch auf Vollständigkeit aufgeführt:

- ▶ Sehr relevant sind in Deutschland die Regelungen, die im Rahmen der Raumordnung getroffen werden, da sie die Nutzung von Flächen und damit die potenzielle Entnahme und Einbringung von Rohstoffen eingrenzen.
- ▶ Das Bergrecht und Abgrabungsgesetze regeln die Entnahme von abiotischen Rohstoffen. Die Entnahme von biotischen Rohstoffen wird durch forstliche bzw. landwirtschaftliche Gesetze geregelt.
- ▶ Das Kreislaufwirtschaftsgesetz regelt die Bewirtschaftung von Abfällen.
- ▶ Produktrechte und -verordnungen regeln Design und Produkthanforderungen und haben daher große Auswirkungen auf rohstoffliche Inputs von Gütern.
- ▶ Da (in physischen Einheiten gemessen) Deutschland je nach Systemgrenze 40 bis 60% der in der Wirtschaft bzw. vom Endverbraucher genutzten Rohstoffe in unverarbeiteter Form oder als Halb- bzw. Fertigwaren importiert wird, sind auch die Regelungen im Handelsrecht einschließlich aller bi- und multilateralen Handelsabkommen der EU zu nennen, die Im- und Exporte von Rohstoffen, Halb- und Fertigwaren einschränken bzw. regeln.

Entnahmen von Rohstoffen, beispielsweise von Waldbesitzern oder Landwirten, ebenso wie der Erwerb von Rohstoffen in unverarbeiteter Form oder in Form von Halb- bzw. Fertigwaren über den nationalen bzw. internationalen Handel sind im Wesentlichen im Rahmen der Eigentumsrechte und Vertragsfreiheit geregelt.

Abgesehen von bestimmten giftigen oder gefährlichen Stoffen, wird Erwerb und Nutzung von Rohstoffen, Halb- und Fertigwaren in Deutschland im Allgemeinen nicht einschränkt. Allerdings wird der Erwerb ausgewählter Rohstoffe, darunter auch viele Energieträger, mittels Steuern und Abgaben gelenkt.

Die Bundesregierung spricht sich im Rahmen von ProgRess II für eine nachhaltige Nutzung von Rohstoffen, d.h. für eine Naturverträglichkeit der Stoffströme aus (BMU, 2016). Das Umweltbundesamt (2013) plädiert zusätzlich für eine Reduktion der Ressourcen- bzw. Rohstoffinanspruchnahme und für die Schaffung eines eigenständigen Ressourcenschutzrechtes, das viele der eingangs erwähnten Rechtsbereiche bündeln könnte. Für eine Reduktion der Rohstoffnutzung sprechen verschiedene Gründe:

- ▶ Der Erschöpfung abiotischer Rohstoffquellen entgegenwirken (intergenerationelle Gerechtigkeit);

- Potenzielle Verteilungskonflikte mindern (intragenerationelle Gerechtigkeit):
- Umweltwirkungen mindern, die mit Abbau, Verarbeitung, Nutzung und Entsorgung von Rohstoffen einhergehen.

Die Umweltwirkungen sind dabei insbesondere auch vor dem Hintergrund der ökologischen Tragfähigkeit der Erde zu sehen. Diese wird unter anderem im Rahmen des Konzepts der Planetaren Grenzen diskutiert, das auf die Resilienz und Widerstandskraft des Erdsystems fokussiert. Im Konzept werden neun Dimensionen genannt, für die Grenzen oder sichere Handlungsräume definiert sind (bzw. zukünftig werden sollen); die Grenzen zielen letztendlich darauf ab, die Bewohnbarkeit der Erde für die Menschen sicherzustellen (Rockström et al., 2009; Steffens et al., 2015).

4.6.3 Berichtspflichten und Daten zur Erfolgskontrolle

Die Rohstoffnutzung in Deutschland wird im Rahmen der Berichtspflichten für Eurostat sowie für die deutschen Nachhaltigkeitsindikatoren von Destatis im Rahmen der Umweltökonomischen Gesamtrechnungen (UGR) erhoben. Die Erhebungen umfassen:

- Die Quantifizierung der biotischen und abiotischen Extraktionen in Deutschland
- Die Quantifizierung der Im- und Exporte ohne Vorketten
- Die Quantifizierung der Im- und Exporte mit Vorketten in Rohstoffäquivalenten (RME)²⁵
- Die Berechnung daraus abgeleiteter Indikatoren, darunter die Ressourceneffizienzindikatoren.

Für die Erhebung der Rohstoffe im Energiesystem sind die Veröffentlichungen allerdings nur bedingt geeignet. So werden im Materialkonto zwar die in Deutschland entnommenen und importierten bzw. exportierten fossilen Rohstoffe im Materialkonto aufgeführt, aber es wird nicht ersichtlich, welcher Anteil energetisch und welcher Anteil stofflich genutzt wird. Gleiches gilt für Biomasse. Ferner werden zwar die Rohstoffe ausgewiesen, die in Investitionen fließen, es bleibt aber unklar, welcher Anteil davon für die Energieinfrastruktur gebraucht wird (Destatis, 2018 und 2020).

Die energetisch genutzten Rohstoffe können allerdings direkt den Berichten der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen entnommen werden, die im Kap. 2.3.3 vorgestellt wurden.

Eine größere Herausforderung sind die Rohstoffaufwendungen für die Energieinfrastruktur, für die keine amtlichen oder halbamtlichen Statistiken vorliegen. Diese Lücken wurden bzw. werden gegenwärtig durch Forschungsprojekte gefüllt. Einen Grundstein hat das Forschungsprojekt Materialeffizienz & Ressourcenschonung (MaRess) gelegt. In MaRess wurden die Rohstoffaufwendungen für die Energieverteilung (Elektrizitätsnetz, Erdgasnetz, Fernwärmenetz) und für die Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie (Braunkohle- und Steinkohlekraftwerke, Erdgaskraftwerke, Blockheizkraftwerke, Kernkraftwerke, Wasserkraftanlagen, Windenergieanlagen, Biogasinfrastuktur) für das Jahr 2008 erhoben. Demzufolge summieren sich die Rohstoffe im Bestand auf insgesamt 650 Mio. Tonnen zur Energieverteilung und 94 Mio. Tonnen zur Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie. Der jährliche Materialbedarf liegt bei 16,3 Mio. Tonnen für

²⁵ Viele Güter werden als Halb- oder Fertigwaren importiert. Die Umrechnung in Rohstoffäquivalente quantifiziert die Rohstoffmenge, die bei der Produktion dieser Halb- und Fertigwaren genutzt wurden.

die Energieverteilung und 3,8 Mio. Tonnen für die Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie (s. Tabelle 12).

Die Rohstoffe im Bestand und die jährlichen Aufwendungen wurden für alle oben genannten Verteilsysteme und Kraftwerkstypen differenziert. Die Rohstoffe im Stromnetzbestand (Kabel) sind im Verteilsystem mengenmäßig besonders relevant (40 %), gefolgt vom regionalen und örtlichen Erdgasnetz (32,6 %) sowie dem Erdgasfernleitungsnetz (20,5 %). Bei der Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie dominieren die Braunkohlenkraftwerke (23 %), gefolgt von Wasserkraftwerken (19,9 %), Steinkohlenkraftwerken (18,2 %) und Windenergieanlagen (15,5 %) (Steger et al. 2011). Die jährlichen Aufwendungen für Unterhaltungsaufwendungen zeigen eine vergleichbare Struktur.

Tabelle 12: Rohstoffe im Bestand (t) und jährlicher Materialbedarf für die Energieverteilung und Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie nach MaRes (t/a), Daten für 2008

Parameter	Energieverteilung	Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie
Bestand, insgesamt (t)	650.029.107	93.611.479
Mineralische Rohstoffe	612.154.198	73.794.315
Metallische Rohstoffe	32.240.435	13.327.728
Kunststoffe und sonstige Rohstoffe	5.634.475	6.489.436
Jährlicher Materialbedarf, gesamt (t/a)	16.281.681	3.776.347
Mineralische Rohstoffe	15.788.499	3.033.359
Metallische Rohstoffe	435.651	680.643
Kunststoffe und sonstige Rohstoffe	57.531	62.345

Quelle: Steger et al. (2011)

Ferner wurden die Rohstoffaufwendungen in bis zu 30 Rohstoffe bzw. Rohstoffgruppen entsprechend der Mengenrelevanz unterschieden²⁶. Im Verteilnetz dominiert mit weitem Abstand der Sand (90,0 %), gefolgt von Beton (3,9 %) und Stahl (3,8 %). Im Erzeugungssystem sind die rohstoffseitig größte Posten Beton (72,6 %), Stahl (11,2 %) und Sand/Schotter/Kies (5,3 %). Die jährlichen Rohstoffaufwendungen haben eine vergleichbare Struktur (Steger et al. 2011).

In späteren Forschungsprojekten wurden die Rohstoffaufwendungen für ausgewählte Technologien untersucht. Der Schwerpunkt liegt in den meisten Studien auf den Technologien und Verteilsystemen, die im Zuge der Energiewende relevanter werden. Zu nennen sind:

- Das Sachverständigengutachten Ressourcenrucksäcke im Energiebereich (Wiesen et al. 2016) im Auftrag des Umweltbundesamtes

²⁶ Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie: Metallische Rohstoffe: Stahl un- bzw. niedriglegiert, Stahl legiert oder rostfrei, Gusseisen, Kupfer, Aluminium, Messing Zinn, Titan, Palladium, Platin, Blei, Nickel, Zink, sonstige NE-Metalle; Mineralische Baustoffe: Beton, Mauerwerk, Sand/Kies/Schotter, Leichtbeton, Zement, Asbestzement, Asphalt/Bitumen, Keramik/Fliesen; Kunststoffe und sonstige Rohstoffe: Mineralwolle, GFK, Gummi, PE (HD), PP, PVC, Epoxidharz und sonstiges. Energieverteilung: mineralische Rohstoffe: Beton, Sand, Zement, Bitumen; metallische Rohstoffe: Stahl, Grauguss, Duktiler Guss, Kupfer, Aluminium, Blei; Kunststoffe/sonstige Rohstoffe: PVC, PE, PUR, Mineralwolle, Holz, Paraffinbasisches Öl/ Silikonöl, Isolieröl/Haftmasse, Sonstige.

- Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems (KRESSE) (Viebahn et al., 2016) im Auftrag des BMWi.
- Die Studie *Rohstoffe für die Energieversorgung der Zukunft* (Angerer et al. 2016) im Rahmen des Projekts Energiesysteme der Zukunft von der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und Union der deutschen Akademien der Wissenschaften
- Rohstoffe für Zukunftstechnologien (Marscheider-Weidemann et al., 2016), im Auftrag der Deutschen Rohstoffagentur (DERA)
- Das Projekt RESCUE (UBA, 2019, Dittrich et al, 2020a-e, noch unveröffentlicht)

Darüber hinaus liegen eine Vielzahl von Studien zu Rohstoffaufwendungen für Einzeltechnologien vor, darunter Bilanzierungen von konkret existierenden oder zukünftigen Technologien wie Windenergieanlagen, Windparks, PV-Anlagen, Batterien oder PtX-Anlagen (beispielsweise Wiesen et al., 2013, Liebich et al., noch unveröffentlicht).

Die Studien haben einen unterschiedlichen *Scope*. Manche fokussieren ausschließlich auf das Stromsystem (Wiesen et al. 2016), andere quantifizieren die Rohstoffbedarfe der gesamten Volkswirtschaft (UBA, 2019), wieder andere Studien analysieren vor allem die Rohstoffmärkte (Angerer et al. 2016). Bezüglich der zukünftigen Entwicklung unterstellen die Studien unterschiedliche Technologiemixe für das Energiesystem, auch die erforderlichen installierten (zukünftigen) Leistungen variieren. Die Ergebnisse sind daher nicht bzw. nur mit vielen Einschränkungen vergleichbar. Allen Ergebnissen gemeinsam ist, dass sich die Anzahl und Menge der benötigten Metalle und Minerale in der Energieinfrastruktur eines EE-basierten Energiesystems erhöhen wird, und dass die Rohstoffintensität des Energiesystems durch den Rückgang der „verbrauchten“ Rohstoffe insgesamt reduzieren wird, diese Entwicklungen sollten durch ein Monitoring aufgezeigt werden.

Im Projekt DeteRess (Dittrich et al. 2018) wurden die Rohstoffaufwendungen für die Energieinfrastruktur für die Gesamtökonomie einschließlich Vorketten und ohne laufende Aufwendungen in der Einheit Rohmaterialäquivalente²⁷ (RME) für das Jahr 2010 ausgewiesen. Die Aufwendungen für die Kabelleitung liegen demnach bei insgesamt 5 Mio. Tonnen RME. Die Aufwendungen für Windenergie summierten sich auf über 2 Mio. Tonnen RME und die für sonstige Stromerzeugungsanlagen (einschl. PV und Unterhaltungen bestehender Kraftwerke) auf 10 Mio. Tonnen RME. Diese Aufwendungen summieren sich damit auf 1,2% des Primärrohstoffkonsums Deutschlands, der alle inländischen Rohstoffaufwendungen (Konsum der Haushalte, des Staates und von nichtstaatlichen Organisationen sowie Investitionen) beinhaltet.

Die Unterteilungen der Energieinfrastruktur, die im Projekt DeteRess getroffen wurden und auch dem Projekt RESCUE hinterlegt sind, sind für die Ausweisung der Rohstoffindikatoren der Energiewende auch noch nicht ausreichend. Insbesondere die unvollständige Trennung von erneuerbaren und fossilen Kraftwerken und Anlagen ist unzweckmäßig. Im aktuell laufenden Projekt „Betrachtung von Rohstoffaufwendungen und Umweltwirkungen für die Energiewende in einem ressourcenschonenden und treibhausgasneutralen Deutschland“ (FKZ: 3719 31 103 0) werden die Kategorien, die die Energieinfrastruktur beinhalten, im Modell umstrukturiert. Im Modell wird dann eine Auswahl an voraussichtlich 15 Schlüsseltechnologien weitmöglich sepa-

²⁷ In der Einheit Rohmaterialäquivalente sind Rohstoffaufwendungen in den Vorketten erfasst, jedoch nicht der Abraum. In dieser Einheit werden die Indikatoren RMI und RMC sowie die Gesamtrohstoffproduktivität ausgewiesen.

rat ausgewiesen. Relevant ist an dieser Stelle, dass das methodische Vorgehen an jede beliebige Auswahl und Einteilung der Energieinfrastruktur angepasst werden kann, sofern ausreichend Hintergrunddaten der Schlüsseltechnologien zur Verfügung stehen.

Die Technologien für Erneuerbare Energien benötigen eine zunehmende Vielfalt und Anzahl von Metallen und Mineralen. Die benötigten Rohstoffe hängen im Wesentlichen von dem Technologiemark ab. Beispiele für Rohstoffe, die zukünftig für das Energiesystem stärker nachgefragt werden, sind (Viebahn et al., 2016, Marscheider-Weidemann et al., 2016, Dittrich et al., noch unveröffentlicht):

- ▶ Kupfer, z.B. für Stromkabel oder Generatoren
- ▶ Lithium, Graphit, Kobalt, Vanadium, z.B. für Batterien in Elektroautos
- ▶ Gallium, Selen, Indium, Silber, Siliziummetalle, z.B. für PV-Anlagen
- ▶ Neodym, Dysprosium, z.B. für Windenergieanlagen
- ▶ Nickel, Lanthan oder Yttrium, z.B. für Elektrolyseure.

Manche dieser Rohstoffe werden als (wirtschafts)kritische Rohstoffe bezeichnet. Wirtschaftskritische Rohstoffe sind solche, die für die Funktionsfähigkeit der Ökonomie relevant sind, für die jedoch die Versorgungssicherheit aus unterschiedlichen Gründen eingeschränkt sein kann. Die Europäische Kommission hat eine Liste mit wirtschaftskritischen Rohstoffen definiert, die regelmäßig aktualisiert wird (letztmalig 2017²⁸). Weiterhin sind die Extraktion, -verarbeitung und Entsorgung der Rohstoffe in unterschiedlichem Ausmaß mit Umweltschäden verbunden. Im Projekt ÖkoRess wurde das Umweltgefährdungspotenzial des Rohstoffabbaus und der ersten Verarbeitungsschritte von rund 50 Rohstoffen analysiert und hinsichtlich unterschiedlicher Kriterien bewertet (Dehoust et al. 2017). Die genannten Rohstofflisten können eine Auswahl von zu beobachtenden Rohstoffen unterstützen.

4.6.4 Der Wirkpfad Rohstoffnutzung im Bewertungsmodell

Rohstoffe sind kein Schutzgut gem. UVPG, werden aber aufgrund vielfältiger fachlicher Erwägungen im vorliegenden Forschungsvorhaben als Ergänzung zum Schutzgutansatz mit betrachtet (vgl. Leistungsbeschreibung zum Vorhaben), da die Frage nach dem Ressourcenverbrauch des Energiesystems bislang nicht zufriedenstellend beantwortet werden konnte.

Der hier betrachtete Wirkpfad Rohstoffnutzung wirkt nur auf das ergänzte Schutzgut Rohstoffe. Umweltauswirkungen, die mit der Förderung/ dem Anbau und der Aufbereitung sowie der Nutzung der Rohstoffe einhergehen werden durch die hier definierten Indikatoren nicht erfasst, sondern sind Gegenstand anderer Wirkpfade (bspw. Flächeninanspruchnahme, Emissionen von Luftschadstoffen, Emissionen in Wasser und Boden etc.).

Der Wirkpfad Rohstoffe kann darüber hinaus Informationen liefern, die dazu verwendet werden können, ergänzende Aspekte in die Diskussion um das Thema der unterirdischen Raum- bzw. Flächeninanspruchnahme einzubringen.

²⁸ Folgende Rohstoffe wurden als kritisch identifiziert: Antimony, Beryllium, Borates, Cobalt, *Coking Coal, Fluorspar, Gallium, Germanium, Indium, Magnesium, Natural Graphite, Niobium, Phosphate Rock, Silicon Metal, Tungsten, Platinum Group Metals, Light Rare Earths and Heavy Rare Earths, Baryte, Bismuth, Hafnium, Helium, Natural Rubber, Phosphorus, Scandium, Tantalum, and Vanadium

4.6.5 Systemraum und Ableitung der Indikatoren für den Wirkpfad Rohstoffnutzung

4.6.5.1 Auswahl der Indikatoren

Für den Wirkpfad Rohstoffnutzung werden die folgenden Indikatoren als geeignet für die Abbildung der Umweltauswirkungen der Energiewende bewertet:

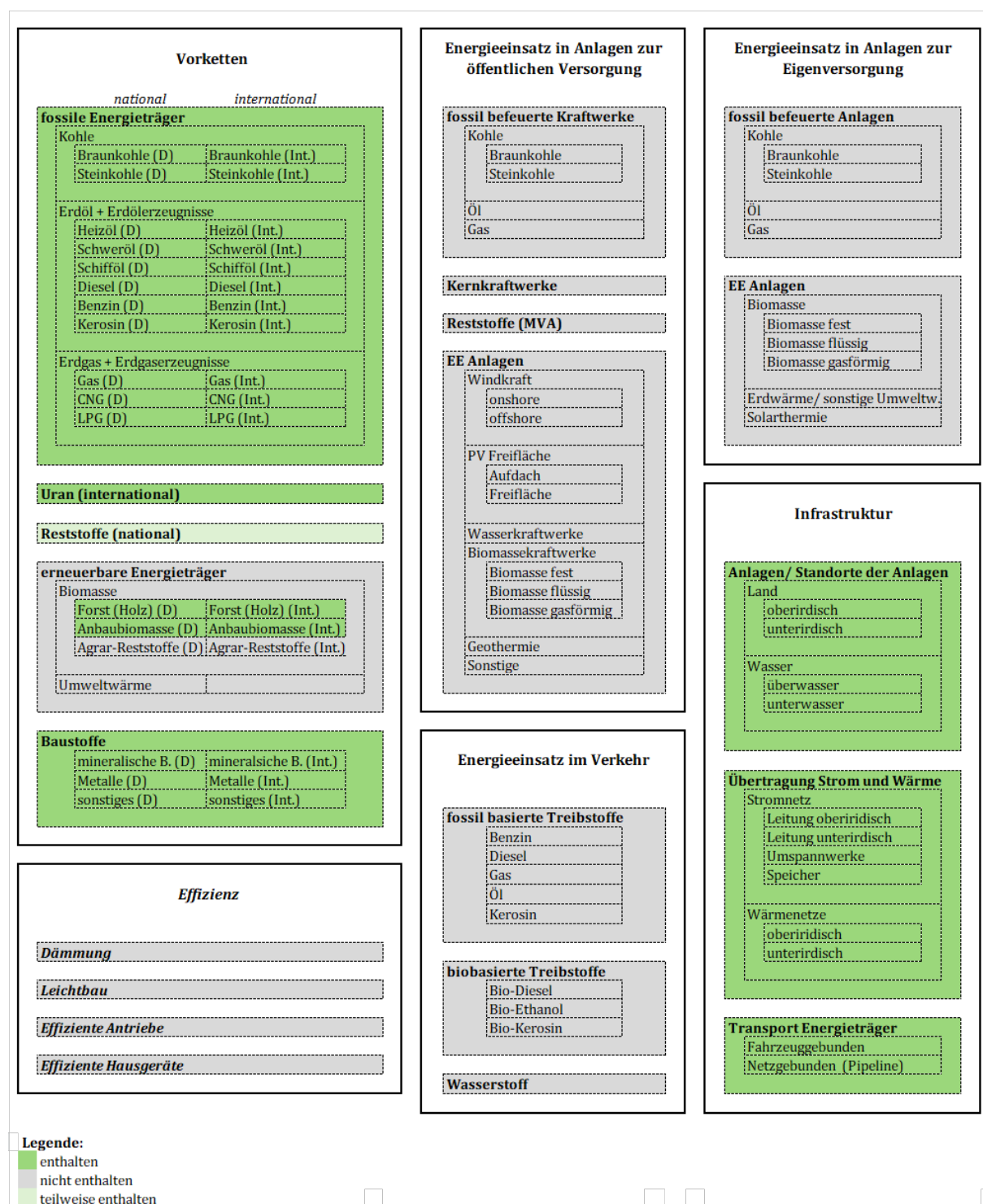
- ▶ Durch das Energiesystem verbrauchte Rohstoffe nach Rohstoffgruppen in natürlichen Einheiten (Mio. t) oder in Mio. t SKE sowie in der Einheit kumulierter Rohstoffaufwand (KRA)
- ▶ Materialkonsum im Bereich der Energieinfrastruktur in Deutschland in Mio. t RME

4.6.5.2 Systemraum

Der in Kapitel 3.3.2 definierte Systemraum wird auf die Bestandteile eingegrenzt, in den Rohstoffe verbaut sind (Infrastruktur, einschl. Vorketten) oder zum Zwecke der Energiegewinnung gefördert/ angebaut und aufbereitet werden (bei der Ausweisung in KRA mit Vorkette).

Im Indikator verbrauchte Rohstoffe sind die Bestandteile Energieeinsatz in der öffentlichen Versorgung, Energieeinsatz im Verkehr und Energieeinsatz in Anlagen zur Eigenversorgung enthalten. Im Indikator Materialkonsum in der Energieinfrastruktur sind die Rohstoffaufwendungen für den Bau der Infrastrukturen enthalten. Lediglich die Vorketten der Reststoffe, die teilweise im Indikator enthalten sind, bleiben ausgespart, da diese per Definition lastenfrei in das System übernommen werden.

Abbildung 19: Zu betrachtender Systemraum für den Wirkpfad Rohstoffnutzung



Quelle: eigene Darstellung ifeu 2020

4.6.5.3 Ableitung der Indikatoren

Denkmodell

Die Indikatoren sollen die wesentlichen Änderungen im Zuge der Energiewende sichtbar machen. Die Erzeugung von Nutzenergie in Deutschland beruht bis heute vor allem auf fossilen Rohstoffen wie Braun- und Steinkohle, Erdöl und Erdgas. Weiterhin werden Uran, Holz und die Ressource Wasser genutzt. Die fossilen Rohstoffe und das Holz werden nutzbar gemacht, indem

sie in Kraftwerken, Heizungen und Verbrennungsmotoren verbrannt werden. Die fossilen und biotischen Rohstoffe werden durch die Verbrennung in das Treibhausgas Kohlendioxid umgewandelt, es verbleiben Rückstände wie Flug- und Kesselaschen. Der Rohstoff Uran wird in angereicherter Form in Kernkraftwerken zur Erzeugung von Strom genutzt, nach der Nutzung verbleibt abgereichertes Uran. Wasserkraft wird in Deutschland in Laufwasserkraftwerken oder Speicherkraftwerken genutzt.

Der Kern der Energiewende besteht darin, die fossilen Rohstoffe durch erneuerbare Energieträger zu substituieren. Energiequellen sind die Sonne, die Erdwärme und die Anziehungskraft des Mondes sowie alle sich daraus ableitenden Quellen wie Wind, Geothermie, Umgebungswärme oder der Tidenhub. In der Konsequenz ändern sich die Anlagen, die zur Erzeugung bzw. Umwandlung von Nutzenergie nötig sind: so werden weniger Öl-, Kohle- und Gaskraftwerke benötigt. Gleichzeitig müssen EE-Anlagen zur Stromproduktion gebaut, Heizungsanlagen in Gebäuden und Verbrennungsmotoren in Kraftfahrzeugen durch neue Technologien ersetzt werden. In Folge ändern sich die Rohstoffbedarfe, die für den Bau und den Unterhalt aller EE-Anlagen erforderlich sind.

Die zwei wesentlichen Veränderungen aufgrund der Umstellung des Energiesystems sind folglich:

- ▶ Rückgang der Nutzung von Rohstoffen, die zur Erzeugung bzw. Umwandlung von Nutzenergie verbraucht werden, und danach nicht weiter genutzt werden können
- ▶ Zunahme der Rohstoffaufwendungen für die Modernisierung des bestehenden Kraftwerksparks und für neue Technologien zur Erschließung erneuerbarer Energien.

Während fossile Rohstoffe nach der energetischen Nutzung nicht mehr zur Weiternutzung zur Verfügung stehen, sind Rohstoffe, die im Kraftwerkspark gebunden sind, abzüglich dissipativer Verluste nach der Nutzungsdauer weiterhin physisch existent und stehen für ein Recycling zur Verfügung. Die Veränderungen können nicht mit nur einem Indikator beschrieben werden. Daher werden zwei Indikatoren vorgeschlagen, die komplementär genutzt werden.

Der erste vorgeschlagene Rohstoffindikator heißt: „**Verbrauchte Rohstoffe**“ und wird für folgende Rohstoffe bzw. Rohstoffgruppen ausgewiesen:

- ▶ Menge verbrauchter fossiler Rohstoffe (jeweils für Kohle, Mineralöle und Gase) in Tonnen Rohstoff bzw. Tonnen Steinkohlenäquivalente
- ▶ Menge verbrauchter Metalle (Uran/Thorium) zu Vergleichszwecken in Tonnen Steinkohlenäquivalenten (da von AGEB in dieser Einheit ausgewiesen und um Vergleichbarkeit mit anderen Rohstoffen herzustellen)
- ▶ Menge verbrauchter Biomasse in Tonnen Trockenmasse und zu Vergleichszwecken in Tonnen Steinkohlenäquivalenten
- ▶ Menge verbrauchter Abfälle und Sekundärrohstoffe zu Vergleichszwecken in Tonnen Steinkohlenäquivalenten.
- ▶ Eine zusätzliche Ausweisung der verbrauchten Rohstoffe in der Einheit kumulierte Rohstoffaufwendungen schließt die Vorketten ein.

Um den zweiten Trend abzubilden, wird der Indikator „**in der Energieinfrastruktur gebundene Rohstoffe**“ vorgeschlagen. Der Indikator setzt sich aus verschiedenen Teilindikatoren zusammen, die folgendermaßen definiert werden und im Folgenden ausgeführt werden:

- **Teilindikator 1:** Gesamtmenge [Tonnen Rohmaterialäquivalente] gebundener Rohstoffe, bestehend aus der Menge gebundener Primärrohstoffe [Tonnen Rohmaterialäquivalente] und der Menge der gebundenen Sekundärrohstoffe [Tonnen Rohmaterialäquivalente der substituierten Primärrohstoffe]

Für analytische Zwecke ist es hilfreich, wenn der Teilindikator 1 auch für alle relevanten Energietechnologien einzeln ausgewiesen wird, einschließlich der konventionellen Kraftwerke. Der Indikator sollte ferner nach Rohstoffgruppen (Metalle, nicht-metallische Mineralien, fossile Rohstoffe, Biomasse) ausgewiesen werden. Um die Summe aller Technologien in Bezug zum gesamtwirtschaftlichen Rohstoffinput und -konsum (RMI und RMC) und damit zu rohstofflichen Nachhaltigkeitsindikatoren setzen zu können (siehe Kap. Berichtspflichten), sollte der Indikator der Systemgrenze der genutzten Rohstoffe (Rohmaterialäquivalente bzw. kumulierter Rohstoffaufwand) folgen, das bedeutet, dass Vorketten (im In- und Ausland) enthalten sind.

Bei Rohstoffen können Versorgungsengpässe auftreten, ihre Extraktion und Verarbeitung geht oftmals mit erheblichen Umweltbelastungen einher. Um mögliche Versorgungsengpässe und Umweltschäden frühzeitig zu erkennen, ist die Identifizierung der genutzten Mengen (in Tonnen bzw. Tonnen Erzgehalt) ausgewählter Rohstoffe in den relevanten Technologien (pro Technologie und über alle Technologien) sinnvoll. Die Auswahl der Rohstoffe kann entlang wirtschaftlicher Kriterien oder entlang des ökologischen Gefährdungspotentials erfolgen. Da der Fokus im Projekt auf Umweltindikatoren liegt, wurde im Rahmen des Projekts entschieden, eine Auswahl anhand von Umweltaspekten zu treffen. Eine erste Auswahl kann auf Basis der im Projekt ÖkoRess identifizierten Rohstoffe mit einem hohen Umweltgefährdungspotenzial bei der Rohstoffgewinnung erfolgen. Diese sind nach dem aktuellen Projektstand²⁹: Antimon, Kobalt, Platin, Vanadium, Rhodium, Kupfer, Gold, Phosphatgestein, Zink, Palladium, Indium, Blei, leichte seltenen Erden, Molybdän, Silber, Bismut, Selen, Tellur, Nickel, Germanium, Rhenium. Im Projekt ÖkoRess wurden jedoch nur 50 überwiegend metallische Rohstoffe und auch nur die Umweltwirkungen der Extraktionsstufe und die ersten Verarbeitungsschritte untersucht. Für eine endgültige Auswahl wäre die Einbeziehung weiterer (biotischer, fossiler und weiterer mineralischer) Rohstoffe und Materialien erforderlich. Im Rahmen des Projekts wurde keine endgültige Auswahl getroffen, aber die Ergebnisse im Projekt ÖkoRess als Startpunkt bestätigt.

- Der Teilindikator 1 wird ergänzt durch den **Teilindikator 2 „rückgebaute Energie-Infrastrukturrohstoffe“**. Dieser Teilindikator beschreibt die Menge der freiwerdenden, wieder nutzbaren Rohstoffe [z.B. Tonnen Rohmaterialäquivalente der substituierten Primärrohstoffe] sowie der Anzahl und jeweilige Menge nicht nutzbarer Abfälle und umweltgefähr-

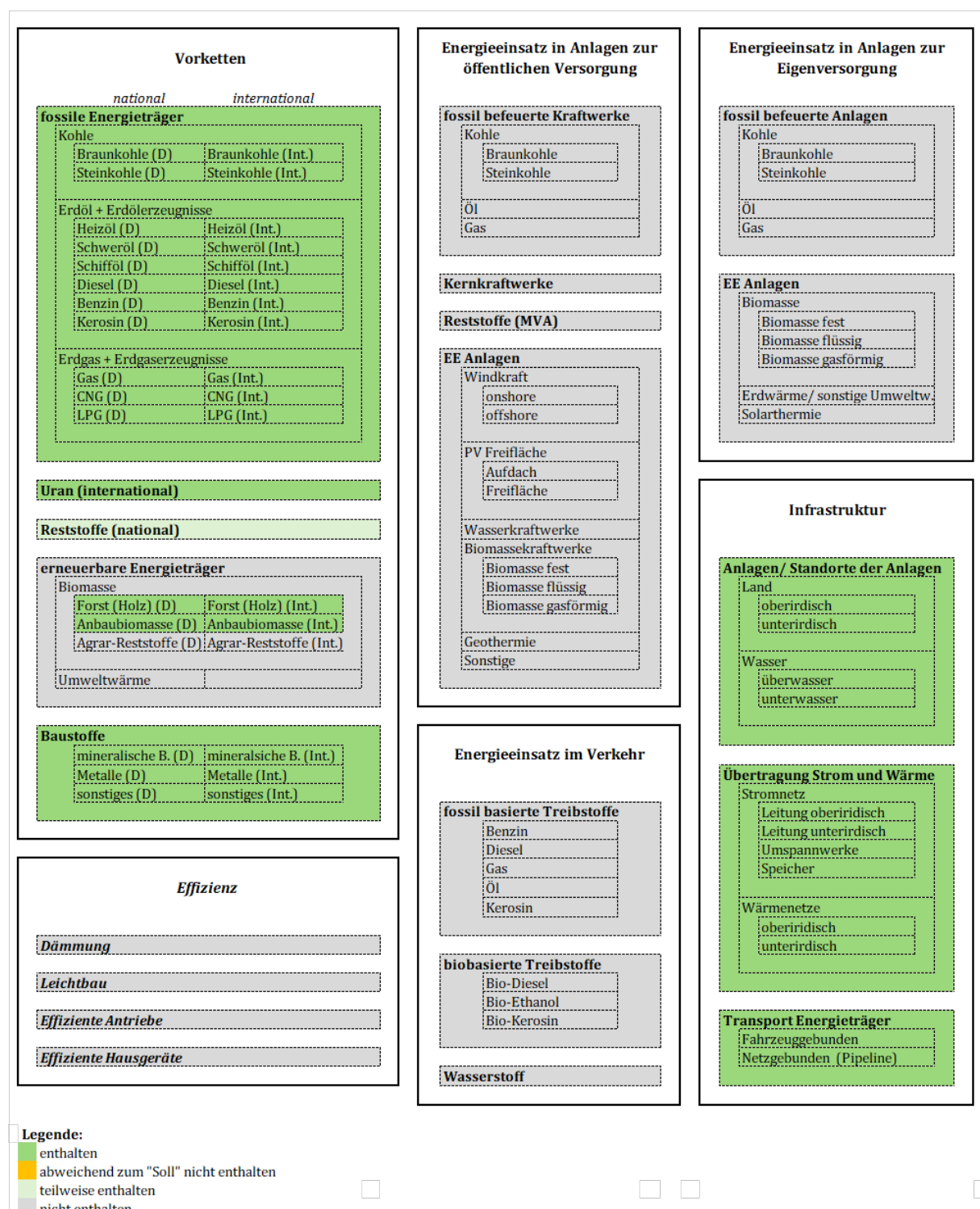
²⁹ Persönliche Mitteilung R. Vogt, Dezember 2019

denden Stoffe. Auch dieser zweite Indikator sollte für alle relevanten Technologien und nach gängigen Rohstoffgruppen differenziert ausgewiesen werden.

Der Indikator „in der Energieinfrastruktur gebundene Rohstoffe“ kann kumuliert den Bestand (kumulierte Investitionen) aufzeigen, wenn Zugang (Teilindikator 1) und Abgang (Teilindikator 2) mit dem bereits bestehenden Bestand verrechnet wird. Neue Investitionen und bestehende Investitionen werden dann gleichermaßen berücksichtigt.

In den Indikatoren abbildbarer Systemraum und Repräsentativität der Indikatoren für die Bereiche der Energiewende

Abbildung 20: Betrachteter Systemraum für den Wirkpfad Rohstoffnutzungen



Legende:
 enthalten
 abweichend zum "Soll" nicht enthalten
 teilweise enthalten
 nicht enthalten

Quelle: eigene Darstellung ifeu 2020

Der Indikator „verbrauchte Rohstoffe“ bildet der Indikator alle relevanten Systemraumbestandteile ab (in einer Ausweisung in KRA auch einschließlich Vorketten).

Der Indikator in der Energieinfrastruktur gebundene Rohstoffe beinhaltet die Anlagen (Anlagen zur öffentlichen Versorgung und Eigenversorgung) und die in Stromnetzen gebundenen Rohstoffen. Die Wärmenetze sind aufgrund der gegenwärtig noch nicht ausreichend getrennten Erfassung der Rohinfrastruktur noch nicht vollständig inkludiert. Auch der Transport der Energieträger kann gegenwärtig noch nicht abgebildet werden, somit fehlen die in den Pipelines und Fahrzeugen für den Transport der Energieträger gebundenen Rohstoffe.

Die Indikatoren bilden somit die Rohstoffnutzungen des Energiesystems zwar nicht vollumfänglich aber hinreichend ab.

Das den Indikatoren zugrundeliegende Denkmodell ist vielschichtig, die Ableitung der Indikatoren umfangreich und war in der Vergangenheit Gegenstand verschiedener Forschungsprojekte.

Der Anteil der verbrauchten Rohstoffe für die Nutzenergiegewinnung an der gesamten Rohstoffnutzung kann ohne die Umrechnung in KRA bzw. RME nicht exakt ausgewiesen werden. Die Größenordnungen (aus den Hintergrunddaten im Projekt RTD) liegt bei rund 25% in 2010. Der Anteil der Rohstoffe, die in der Energieinfrastruktur gebundenen werden, lag im selben Jahr bei (mindestens) 1%.

Zusammenfassung

Die folgenden Indikatoren werden als geeignet bewertet wurden, um die Auswirkungen des Fortschreitens der Energiewende auf das Schutzgut Rohstoffe über den Wirkpfad Rohstoffnutzung hinreichend detailliert zu beschreiben:

- ▶ Durch das Energiesystem verbrauchte Rohstoffe nach Rohstoffgruppen in Mio. t bzw. Mio. t SKE
- ▶ Materialkonsum im Bereich der Energieinfrastruktur in Deutschland in Mio. t RME

Für die beiden Indikatoren liegt eine ausreichend valide, fortschreibefähige Datenbasis vor.

4.7 Wirkpfad Direkte Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen

4.7.1 Definition

Das Schutzgut Tiere und Pflanzen ist durch nahezu alle bislang beschriebenen Wirkpfade in unterschiedlicher Art und Weise beeinträchtigt. Darüber hinaus entsteht durch die Prozesse innerhalb des Systemraums der Energiewende für einzelne Tiere und Pflanzen ein Unfallrisiko, das hier im Sinne von direkten Auswirkungen (im Sinne von Unfällen) beschrieben wird. Zu den direkten Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen zählen Verluste durch Kühlwasserentnahme bei Wärmekraftwerken (z. B. Fische, Muscheln), sowie die Organismen-tötung durch Windenergieanlagen und Freileitungen (z.B. Vögel, Fledermäuse) oder durch Turbinen in Wasserkraftwerke (z.B. Fische).

Im vorliegenden Kapitel sollen diese direkten Auswirkungen auf die Tiere und Pflanzen benannt werden und soweit möglich, Indikatoren zur Quantifizierung der Auswirkungen erarbeitet werden.

4.7.2 Rechtliche Regelungen

Die rechtlichen Grundlagen für den Schutz der Tiere und Pflanzen finden sich hauptsächlich im Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz - BNatSchG), das auch die Ziele und Grundsätze der europäischen Richtlinien (insbesondere der Natura 2000 RL) in deutsches Recht überführt. Wesentliche Rechtsparagrafen sind sicherlich § 1 Abs. 2

BNatschG (allg. Ziele des Naturschutzes und der Landschaftspflege) die §§ 14 und 15 (Eingriff in Natur und Landschaft) und § 44 BNatschG (Tötungsverbot besonders geschützter Arten).

Darüber hinaus erfahren wildlebende Vögel, Reptilien und Fische sofern sie in Europa heimisch sind, einen besonderen Schutz auf Maßgabe der Richtlinie 2009/147/EG vom 30. November 2009 über die Erhaltung der wildlebenden Vogelarten und der Richtlinie 92/43/EWG vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen.

4.7.3 Berichtspflichten und Daten zur Erfolgskontrolle

Umfassende Berichtspflichten über die Anzahl getöteter Individuen gibt es neben der Auswertung der Wildunfälle im Straßenverkehr - die durch den Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. erhoben und berichtet wird – kaum. Im Jahr 2018/19 wurden mehr als 260.000 Tiere getötet, zumeist Rehe [GDV 2019]. Vorhandenes Zahlenmaterial ist eher als Stichprobe zu werten (bspw. Vogelschlagzählung) bzw. Ergebnis einer Hochrechnung von spezifischen Zahlen auf Gesamtdeutschland.

4.7.4 Der Wirkpfad direkte Auswirkungen auf Pflanzen und Tiere im Bewertungsmodell

Die direkten Auswirkungen betreffen das Schutzgut Tiere, Pflanzen und Biodiversität. Im Vordergrund stehen dabei Verluste an Organismen, die zu Änderungen in betroffenen Ökosystemen führen können. Systemraum und Ableitung der Indikatoren für den Wirkpfad direkte Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen

4.7.4.1 Auswahl der Indikatoren

Für den Wirkpfad direkte Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen werden die folgenden Indikatoren für die Abbildung der Umweltauswirkungen der Energiewende vorgeschlagen:

- ▶ Veränderung der Flächeninanspruchnahme zum Vorjahr durch das Energiesystem [ha]
- ▶ Turbinendurchfluss von Wasserkraftwerken und Kühlwassereinsatz in Wärmekraftwerken, in Mio.m³/a
- ▶ Installierte Leistung von Windenergieanlagen in Deutschland nach Standort, in GW
- ▶ Länge der Übertragungsnetz-Trassen in Deutschland, in km

4.7.4.2 Systemraum

Der in Kapitel 3.3.2 definierte Systemraum kann für den Wirkpfad direkte Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen auf die Prozesse eingegrenzt werden, die ursächlich für die abzubildenden Auswirkungen sind. Diese sind in der nachfolgenden Abbildung grün markiert.

Dabei handelt es sich vor allem um Infrastruktureinrichtungen, die ein Kollisionsrisiko für Tiere und ggf. auch Pflanzen haben. Ergänzend seien hier auch noch die Risiken für Tiere und Pflanzen bei der Ernte von Anbaubiomasse und beim Holzeinschlag aufgelistet.

Das Risiko für die Schutzgüter Menschen sowie Tiere / Pflanzen / Biodiversität aufgrund von Unglücken beim Energieeinsatz in Anlagen zur öffentlichen Versorgung, im Verkehr und in Anlagen zur Eigenversorgung kann aufgrund fehlender Daten nicht dezidiert berücksichtigt werden. Lediglich das Thema Risiken der zivilen Nutzung der Kernenergie wird im Rahmen eines Exkurses in Kapitel 4.8 vertieft.

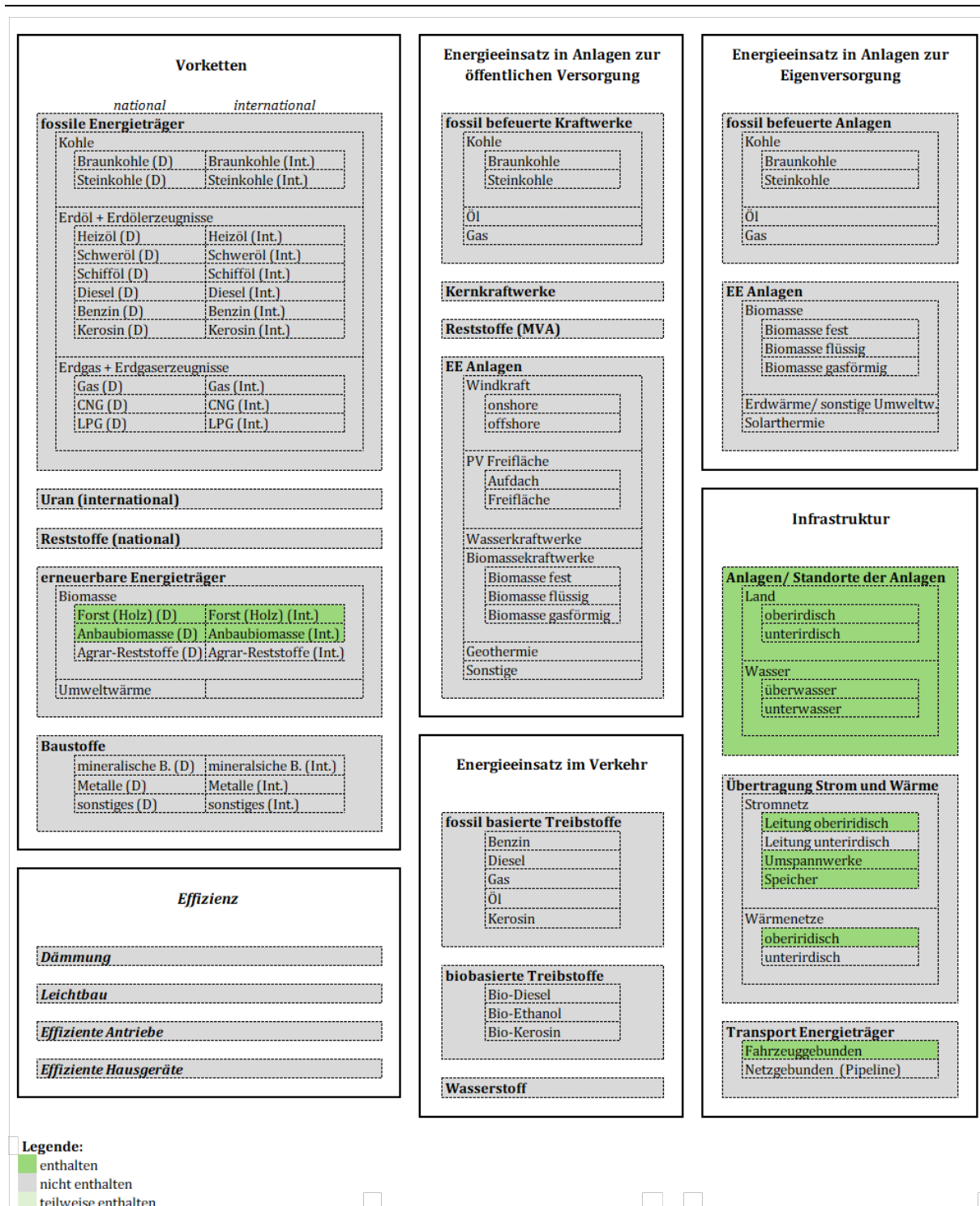
4.7.4.3 Ableitung der Indikatoren

Denkmodell für einen Indikator direkte Auswirkungen auf Pflanzen und Tiere

Der Mangel an geeigneten Grundlagendaten macht es schwierig passgenaue Indikatoren zu finden. Daher soll an dieser Stelle in einem Schritt aufgelistet werden, welche direkten Auswirkungen durch die Prozesse der Energiewende im zu betrachtenden Systemraum zu erwägen sind:

- ▶ Tötung oder Vertreibung von Tieren/ Zerstörung von Pflanzen durch Maßnahmen im Zuge der Änderung der Flächeninanspruchnahme für die Errichtung von Anlagen für die Erzeugung oder Verteilung von Energie sowie Flächeninanspruchnahmen für die Förderung bzw. den Anbau von Energieträgern.
- ▶ Verletzung oder Tötung von Wasserlebewesen durch die Entnahme und Nutzung von Kühlwasser sowie durch den Turbinendurchfluss bei Wasserkraftwerken. Hier stehen klar die mechanischen Belastungen der Lebewesen im Vordergrund.
- ▶ Verletzung oder Tötung von Individuen der Avifauna durch Kollisionen mit beweglichen Teilen von Windenergieanlagen (die Kollisionen finden in der Regel mit den Rotorflügeln statt, da die Tiere die Geschwindigkeit nicht oder nur falsch einschätzen können). Der Fokus liegt hier auf den Windenergieanlagen, da es keine anderen Prozesse mit beweglichen Teilen im Lauftraum gibt.
- ▶ Verletzung oder Tötung von Individuen der Avifauna durch Kollisionen mit Freileitungen. Die Leitungen sind nicht für alle Tiere erkennbar, so dass es zu Kollisionen kommen kann. Dies trifft alle Arten von Freileitungen, es gibt entsprechende Vorsorgemaßnahmen (Markierungen an der obersten Leitung). Es legen keine Zahlen über den Umsetzungsgrad dieser Maßnahmen vor.

Abbildung 21: Zu betrachtender Systemraum für den Wirkpfad direkte Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen



Quelle: eigene Darstellung ifeu 2020

Darüber hinaus gibt es noch weitere Risikopotenziale wie bspw. Tötung von Tieren bei der Ernte und der Weiterverarbeitung von Anbaubiomasse. Es ist jedoch nicht möglich den erkennbaren Wirkungen eine Ursache aus dem Systemraum der Energiewende zuzuordnen.

Trotz der Begrenzungen werden für ausgewählte Risikopotenziale Indikatoren abgeleitet.

Ziel der Arbeiten in diesem Kapitel ist somit, statt einer umfassenden Betrachtung, Indikatoren im Sinne eines Schlaglichtes für die Gesamtheit der direkten Auswirkungen auf die naturschutzfachlichen Aspekte zu identifizieren. Die Indikatoren sind im Folgenden detailliert beschrieben.

Verluste von Tieren und Pflanzen durch direkte Änderung der Flächeninanspruchnahme

Es wird angenommen, dass die Verluste von Tieren und Pflanzen proportional zur Änderung der Flächeninanspruchnahme sind. Eine qualitative Differenzierung ist durch Angabe von Flächentypen (z.B. Wald, Ackerflächen) möglich.

Verluste von Tieren und Pflanzen durch Wasserkraftwerke und Kühlwasserentnahme

Der Ausbau der Wasserkraftnutzung ist in Deutschland weitgehend abgeschlossen. Die Fischmortalität kann 20% pro Turbinenpassage betragen und ist abhängig von Art der Stauanlage, Turbinentechnik und Standort [Keuneke und Dumont, 2010]. Laufwasserkraftwerke wirken sich daher nachteilig auf die Biodiversität von Flussökosystemen aus. Ein kontinuierliches Monitoring der Verluste von Tieren und Pflanzen findet nicht statt und repräsentative Zahlen zur Fischmortalität durch die der Wasserkraftnutzung in Deutschland liegen nicht vor. Deshalb wird als Proxy-Indikator errechnet unter der Annahme, da das Potenzial zur Organismenschädigung proportional zur Wassermenge ist. Aus den Daten zur Bruttostromerzeugung in [AGEB 2020a] wird die Wassermenge errechnet, die Turbinen von Wasserkraftwerken passieren.

Die Kühlwassernutzung in thermischen Kraftwerken führt u.a. zu Verlusten an Fischen, Fischlarven, Krebse, Muscheln, Schnecken. Hierfür findet ein kontinuierliches Monitoring der Verluste von Tieren und Pflanzen ebenfalls nicht statt. Andere belastbare Daten liegen auch nicht vor. Unter der Annahme, dass das Risiko der Organismenschädigung in erster Näherung proportional zur entnommenen Kühlwassermenge ist, wird diese als Proxy-Indikator den Angaben in der Fachserie 19, Reihe 2.2 des Statistischen Bundesamts entnommen.

Als Indikatoren für die direkten Auswirkungen auf Tier und Pflanzen durch Wasserkraftwerke und Kühlwasserentnahme vorgeschlagen:

- Flusswasser in Deutschland, das Turbinen von Wasserkraftwerken passiert [Mrd. m³]
- Entnahme von Kühlwasser durch die Energiewirtschaft Deutschlands [Mrd. m³/a]

Verluste von Tieren durch Windenergieanlagen

Es gibt je nach Standort ein Kollisions- und damit auch ein potenzielles Mortalitätsrisiko bei Vögeln und Fledermäusen durch Windenergieanlagen. Beim Bau kann durch Standortwahl oder im Betrieb durch Auflagen von Vermeidungsmaßnahmen (z.B. Abschaltung bei Vogelzug) das Risiko minimiert werden. Für eine Gesamtbetrachtung fehlen hinreichend valide Daten zur Quantifizierung der Organismenschädigung. Eine potenzielle Schadwirkung lässt sich nicht pauschal anhand der Anzahl der Anlagen oder der Größe der Anlagen im Sinne der Rotorflächen ableiten. Der Grund ist eine große Standortabhängigkeit: es gibt Standorte, von welchen nur ein sehr geringes Gefährdungspotential ausgeht und Standorte, an welchen das Tötungsrisiko durch geeignete Maßnahmen minimiert wird [Hötter 2006]³⁰. Zur Ableitung eines geeigneten Indikators müsste man untersuchen, ob in Gebieten mit einer hohen Dichte an WEA tatsächlich langfristig ein Populationsrückgang für bestimmte Arten zu verzeichnen ist. Hierzu liegen keine Daten vor, insbesondere keine, die fortlaufend aktualisiert werden. In Forschungsvorhaben liegt der Fokus

³⁰ An Standorten, an denen ein Tötungsrisiko erhöht ist und auch nicht durch entsprechende Maßnahmen signifikant gesenkt werden kann, sind Windenergieanlagen in der Regel nicht genehmigungsfähig

auf Vermeidungsmaßnahmen, mit denen das Kollisionsrisiko minimiert werden kann [Blew et al. 2018].

Bei der vorliegenden Datenlage wird daher im Rahmen des hier vorgelegten Forschungsvorhabens als Proxy-Indikator die installierte Leistung der Windenergieanlagen in Deutschland in GW vorgeschlagen, wobei die Differenzierung nach Offenland/Wald/Offshore einen Hinweis auf die betroffenen Arten (z.B. Seevögel, Waldvögel) erlauben. Die Bezugsgröße installierte Leistung in GW nimmt in gewisser Weise die Anzahl und die Größe der Anlagen auf (mehr Anlagen = mehr installierte Leistung aber auch größere Anlagen = mehr installierte Leistung)³¹. Für eine Bewertung des Indikators wird dabei unterstellt, dass das Potenzial der Organismenschädigung mit der installierten Leistung der Windenergieanlagen zunimmt. Damit ist zwar die Kausalität (Windenergieanlage und potenzielles Risiko für die Avifauna) beschrieben, substantielle Aussagen zum tatsächlichen Gefährdungspotenzial sind jedoch nicht ableitbar.

Als Indikator wird somit in Ermangelung eines valideren Denkmodells empfohlen:

- Installierte Leistung der Windenergieanlagen in Deutschland in GW differenziert nach Offenland/Wald/Offshore³²

Verluste von Tieren durch Freileitungen (Vögel und Fledermäuse)

Das schleswig-holsteinische Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume geht davon aus, dass an Hochspannungsleitungen pro Trassenkilometer und Jahr zwischen 400 und 700 Vögel sterben [LLUR 2013]. Zu folgenden Aussagen vgl. dazu auch [Franke, B. et al., 2018]. Die Ursache für Kollisionen liegt demnach darin, dass die Leitungen nicht oder zu spät gesehen werden. Besonders gebietsunkundige Zugvögel seien in Gefahr. So ist etwa für Schleswig-Holstein als Drehscheibe des nord- und mitteleuropäischen Vogelzuges eine Kollisionsgefährdung mit höheren Verlustraten im Vergleich zum Mittel über Deutschland zu erwarten. Verlässliche Quantifizierungen fehlen jedoch. Ein geeigneter Indikator, der z.B. die Umweltauswirkungen der fortschreitenden Energiewende auf die Flugrouten der seltenen und geschützten Vogelarten berücksichtigt, wäre aufwändig und nur mit großen Unsicherheiten zu quantifizieren. Für die Bewertung des Indikators wird angenommen, dass das Risiko der Organismenschädigung proportional zur Länge der Freileitungstrassen ist.

Der Indikatorvorschlag lautet somit:

- Länge der Freileitungstrassen im Übertragungsnetz in km

In den Indikatoren abbildbarer Systemraum und Repräsentativität der Indikatoren für die Bereiche der Energiewende

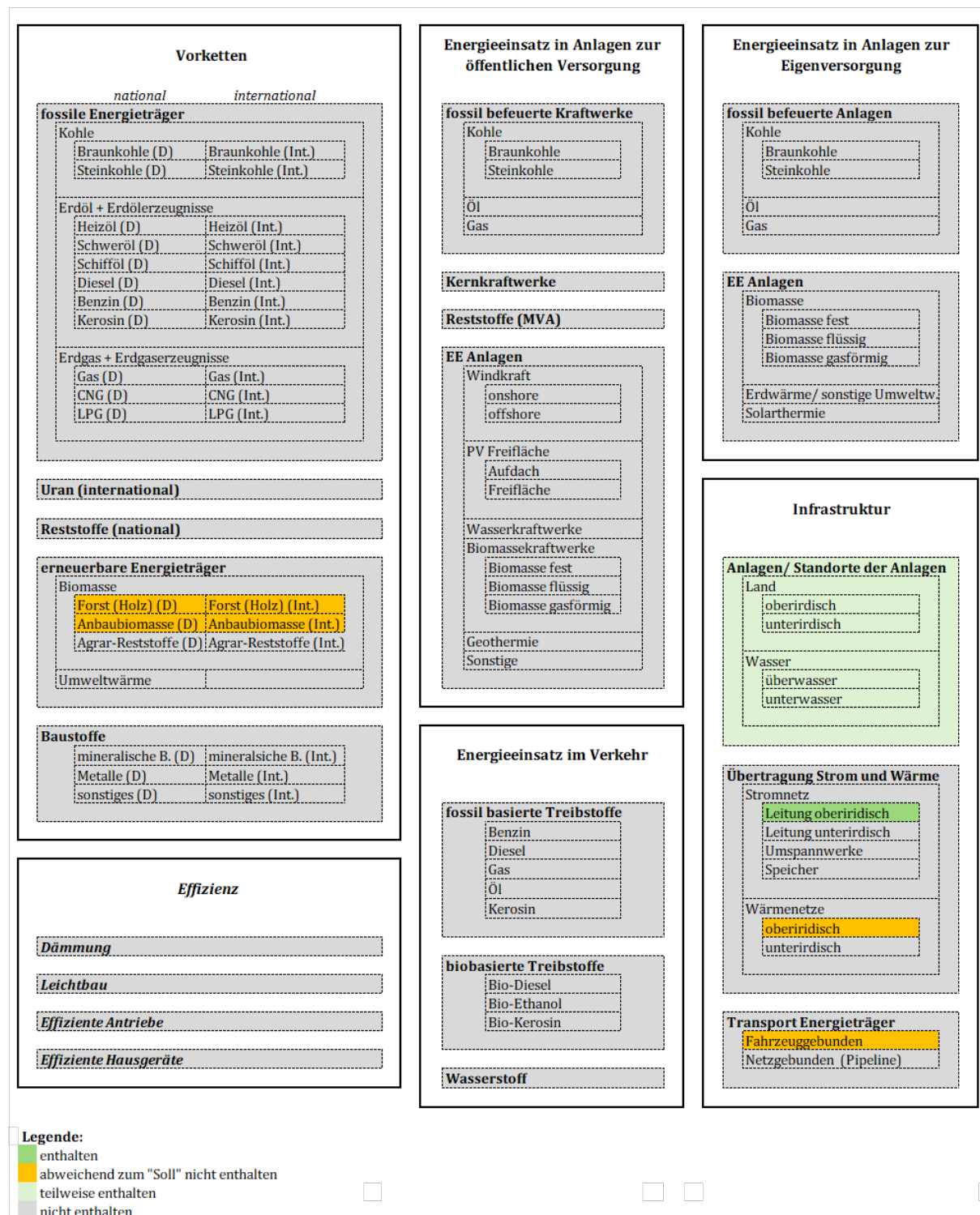
Abweichend zum in Kapitel 4.7.5.2 beschriebenen Systemraum bilden die Indikatoren nur einen Teil der Anlagen ab, die ein potenzielles Risiko für Tiere und Pflanzen darstellen können. Die Indikatoren fokussieren auf das Gefährdungspotenzial für die Avifauna an Windrädern und Überlandleitungen sowie auf das Gefährdungspotenzial aquatischer Lebewesen durch Kühlwasserentnahme und Turbinendurchfluss. Ob diese Auswahl bereits repräsentativ für den Bereich der Energiewende ist, kann aufgrund einer mangelhaften Datenlage nicht abschließend beurteilt werden. Bislang sind die direkten Wirkungen des Energiesystems auf Tiere und Pflanzen nur für

³¹ Für die im Rahmen des Monitorings betrachtete Zeitreihe von 2000 bis 2018 ist die Frage nach der Bezugsgröße (also ob Anzahl oder Größe oder installierte Leistung) letztlich unerheblich, da immer eine Zunahme dargestellt würde. Langfristig ist vermutlich zu erwarten, dass bei nahezu gleichbleibender Anzahl an Standorten durch größere Anlagen und effizientere Generatoren mehr installierte Leistung vorliegt.

³² Wobei keine Wertung zwischen den verschiedenen Standortkategorien abgeleitet wird

eine Auswahl an Anlagen und dies in der Regel auch nur für einen lokal begrenzten Untersuchungsraum wissenschaftlich aufbereitet worden (vgl. Kapitel 2). Ein Gesamtbild der Schädigungen an Tieren und Pflanzen durch direkte Auswirkungen liegt somit nicht vor.

Abbildung 22: Betrachteter Systemraum für den Wirkpfad direkte Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen



Quelle: eigene Darstellung ifeu 2020

Zusammenfassung

Die folgenden Indikatoren werden bei der aktuellen Datenlage ausgewählt, um Hinweise auf die Auswirkungen des Fortschreitens der Energiewende auf das Schutzgut Tiere / Pflanzen / Biodiversität über den Wirkpfad direkte Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen zu beschreiben:

- Änderung der Flächeninanspruchnahme durch das Energiesystem im Vergleich zum Vorjahr [ha a^{-1}]
- Turbinendurchfluss von Wasserkraftwerken und Kühlwassereinsatz in Wärmekraftwerken, in Mio. m^3/a
- Installierte Leistung von Windenergieanlagen in Deutschland nach Standort, in GW
- Länge der Trassen des Freileitungs-Übertragungsnetzes in Deutschland, in km

Für alle Indikatoren liegt eine bedingt zuverlässige Datenbasis vor.

4.8 Exkurs zum Risiko schwerer Unfälle in Kernkraftwerken und zum Risiko durch den Umgang mit hochradioaktiven Abfällen

Im Gegensatz zu den indirekten Wirkungen z.B. durch Erkrankungen, die durch Luftschadstoffe verursacht werden, umfassen die direkten Auswirkungen auf den Menschen Verletzungen und Todesfälle durch Unfälle. Hierzu liegen Untersuchungen im Rahmen des EU-Projekts NEWEXT vor [Friedrich et al, 2004], wobei hierbei die Häufigkeit von Todesfällen durch Unfälle bei der Stromerzeugung aus fossilen Kraftwerken, Kernkraftwerken und Wasserkraftwerken in OECD-Ländern inkl. der Brennstoffvorkette (z.B. Kohlebergbau) bestimmt wurden. Für WEA, PV-Anlagen und Energie aus Biomasse liegen keine statistisch verwertbaren Daten für Arbeitsunfälle vor. Unfälle mit Fahrzeugen und anderen Verkehrsmitteln werden dabei nicht berücksichtigt, auch wenn der Sektor Verkehr Teil des Systemraums der Energiewende ist. Ein belastbar bewertbarer und fortschreibbarer Indikator für die Summe der direkten Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit steht somit derzeit nicht zur Verfügung.

Im Vergleich der Energieträger sind Unfälle mit einer sehr großen Zahl von Todesfällen bei der Nutzung der Atomenergie eher wahrscheinlich. Für Kernkraftwerke in Deutschland wurden Eintrittswahrscheinlichkeit und Folgen zuletzt in der Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke aus dem Jahr 1981 [GRS 1981] ermittelt. Dabei wurde in Unfallfolgenszenarien für schwere Kernschmelzunfälle maximal 108.000 Todesfälle und 3,2 Mio. umgesiedelte Personen berechnet. Seit 1981 erfolgte keine Neuberechnung der Unfallfolgen; aktuelle Daten liegen auch für Phase B der Risikostudie [GRS 1986] und danach nicht vor. Ein Vergleich der Zahlen umgesiedelter Personen in Tschernobyl und Fukushima [Wikipedia 2020; FPG 2020] mit dem Rechenfall in [GRSista 1981] in Tabelle 13 zeigt, dass in Deutschland aufgrund der hohen Bevölkerungsdichte im ungünstigsten Fall 35 mal mehr Personen umgesiedelt werden müssten als dies in Tschernobyl der Fall war.

Durch den Atomausstieg im Rahmen der Energiewende wird das Risiko von Unfällen mit einer großen Zahl von Todesfällen aus Kernkraftwerken in Deutschland reduziert; das Risiko durch schwere Kernkraftwerksunfälle in Nachbarländern verbleibt jedoch. Eine Klassifizierung nach Typ und Alter der Reaktoren wäre aufwändig und verspricht wenig Erkenntnisgewinn, da diesen Angaben kein spezifischer Risikowert zugeordnet werden kann. Als Indikator wird die Stromerzeugung aus Kernenergie aus Kernkraftwerken in Deutschland und Nachbarländern verwendet; hierfür liegen in den World Energy Statistics der International Energy Agency [IEA 2020] fortlaufend aktualisierte Daten vor.

Tabelle 13: Umgesiedelte Personen und als nicht bewohnbar deklarierte Flächen bei schweren Unfällen in Kernkraftwerken

Ort	Umgesiedelte Personen	Als nicht bewohnbar deklarierte Flächen [ha]
Tschernobyl	91.200	260.000
Fukushima	200.000	ab 01.04.2017: 37.000
Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke, maximaler Rechenfall [GRS 1981]	3.200.000	380.000

Quelle: eigene Darstellung ifeu 2020

Auch nach dem Abschalten des letzten Kernkraftwerks werden die abgebrannten Brennelemente zunächst oberirdisch gelagert und stellen ein Risiko dar. Als Indikator für das Risiko von Unfällen bei der Lagerung von hochradioaktiven Abfällen wird die Menge an endzulagernden Kernbrennstoffen (Uran und Plutonium), die noch oberirdisch gelagert sind, gewählt. Hierfür liegen Daten in periodischen Veröffentlichungen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Daten vor [BMUB 2014, 2015, 2018].

Aufgrund der Bedeutung des Risikos durch Kernkraftwerke in der Energiewende werden als Indikatoren vorgeschlagen:

- ▶ Stromerzeugung aus Kernenergie in Deutschland [TWh/a]
- ▶ Stromerzeugung aus Kernenergie Nachbarländern (Niederlande, Belgien, Frankreich, Schweiz, Tschechien) [TWh/a]
- ▶ Menge an Kernbrennstoff aus deutschen Leistungsreaktoren, oberirdisch gelagert [t]

4.9 Gesamtschau der Liste der vorgeschlagenen Indikatoren

Im Rahmen der Ableitung der Indikatoren wird die folgende Liste zur Betrachtung und Bewertung der Umweltauswirkungen der Energiewende vorgeschlagen:

- ▶ Wirkpfad luftgetragene Schadstoffe
wirkt auf die Schutzgüter menschliche Gesundheit, Tiere und Pflanzen, Biologische Vielfalt, Boden, Wasser, Luft, Klima, Kultur und sonstige Sachgüter
 - Emissionen von Stickstoffdioxid (NO_x als NO₂) in kt/Jahr
 - Emissionen von Schwefeldioxid (als SO₂) in kt/Jahr
 - Emissionen von Feinstaub PM_{2,5} in kt/Jahr
 - Emissionen von Black Carbon in kt/Jahr
 - Emissionen von Kohlenmonoxid (CO) in kt/Jahr
 - Emissionen von Quecksilber (HG) in t/Jahr
 - Emissionen von Ammoniak (NH₃) in kt/Jahr
 - Attributable Todesfälle durch Luftschadstoffe in Deutschland (Fälle/Jahr)
- ▶ Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden
wirkt auf die Schutzgüter Menschen, Tiere und Pflanzen, Biologische Vielfalt, Boden, Wasser, Kultur und sonstige Sachgüter
 - Abwasser aus der Energiewirtschaft in Tsd. m³/Jahr
 - Stickstoffüberschuss in Böden aus dem Anbau von Energiepflanzen [kt N/a]

- Eutrophierung von terrestrischen Ökosystemen durch die Deposition von eutrophierenden Luftschadstoffen aus dem Energiesystem (ohne Biogasanlagen) in kg N(gesamt) ha⁻¹ a⁻¹
- Versauerung von terrestrischen Ökosystemen durch die Deposition von versauernden Luftschadstoffen aus dem Energiesystem in eq ha⁻¹ a⁻¹.
- ▶ Wirkungspfad Geräusch-, Licht-, und Wärmeemissionen
wirkt auf die Schutzgüter Menschen, Tiere und Pflanzen, Biologische Vielfalt,
 - Geräuschemissionen als Lärmbelastungspotenzialflächen in denen 40 dB(A) in der Nacht überschritten wird [km²], differenziert nach Anlagentypen
 - Menge am Kühlwasser aus der Energiewirtschaft in Deutschland [Mrd. m³/a]
- ▶ Wirkungspfad Flächeninanspruchnahme
wirkt auf die Schutzgüter Tiere und Pflanzen, Biologische Vielfalt, Fläche, Landschaft, Kultur und sonstige Sachgüter
 - Temporäre Flächenbelegung durch das Energiesystem in [km²]
 - Temporäre Flächenbelegung durch das Energiesystem charakterisiert anhand der Hemerobie in [km² aF-Äq.]
 - Indirekte Flächeninanspruchnahme mit Auswirkungen auf das Landschaftsbild [ha]
- ▶ Wirkungspfad Rohstoffnutzung
wirkt auf das Schutzgut Rohstoffe
 - Durch das Energiesystem verbrauchte Rohstoffe nach Rohstoffgruppen in natürlichen Einheiten (Mio. t) oder in Mio. t SKE sowie in der Einheit kumulierter Rohstoffaufwand (KRA)
 - Materialkonsum im Bereich der Energieinfrastruktur in Deutschland in Mio. t RME
- ▶ Wirkungspfad direkte Auswirkungen auf Tier und Pflanzen
wirkt auf die Schutzgüter Tiere und Pflanzen, Biologische Vielfalt
 - Veränderung der Flächeninanspruchnahme zum Vorjahr durch das Energiesystem [ha a⁻¹]
 - Turbinendurchfluss von Wasserkraftwerken und Kühlwassereinsatz in Wärmekraftwerken [Mio. m³ a⁻¹]
 - Installierte Leistung der Windenergieanlagen in Deutschland in GW differenziert nach Offenland/Wald/Offshore
 - Länge der Freileitungstrassen im Übertragungsnetz [km]
- ▶ Risiko durch schwere Unfälle in Kernkraftwerken und Risiko durch hochradioaktive Abfälle
wirkt auf das Schutzgut Menschen
 - Stromerzeugung aus Kernenergie in Deutschland und Nachbarländern (Niederlande, Belgien, Frankreich, Schweiz, Tschechien) [TWh/a]
 - Menge an Brennelementen aus deutschen Leistungsreaktoren für die Endlagerung, die noch oberirdisch gelagert sind [t]

Anhand dieser Liste wurde in Kapitel 5 in Form eines Praxistests eine erste Einordnung der Umwelteffekte der Energiewende vorgenommen.

5 Praxistest

Für die in den Kapitel 4 definierten Indikatoren werden in der Zusammenschau die ab dem Jahr 2000 verfügbaren Daten zusammengestellt und die dafür verwendeten Quellen genannt. Dabei wird nach Wirkpfaden vorgegangen, die Relevanz anhand der Ergebnisse beurteilt und die Schutzgutbetroffenheit geprüft.

Im Rahmen des Praxistests sollen die einzelnen, erarbeiteten Indikatoren auch einer zusammenfassenden Beurteilung unterzogen werden. Dabei stehen die folgenden Fragen im Vordergrund:

- ▶ Wie bildet der Indikator die zu beschreibende Umweltauswirkung ab?
 - „Direkt“ im Sinne von: Der Indikator beschreibt genau die adressierte Umweltwirkung (Bsp.: Der Wirkpfad Luftschadstoffe wird beschrieben durch Indikatoren, die die Emissionen des Energiesystems in einer metrischen Einheit angeben).
 - „Indirekt“ im Sinne von: Der Indikator adressiert das Wirkpotenzial, das zur Umweltwirkung führt (Bsp.: Der Wirkpfad Emissionen in Boden und Wasser wird beschrieben durch Indikatoren zum Depositionspotenzial der Luftschadstoffe. Hier wird ein Potenzial errechnet, nicht aber quantifizierbare Aussagen zur Entwicklung der Bodenqualität).
 - „Proxy“ im Sinne von: Der Indikator beschreibt eine Ursache für die eigentlich adressierte Umweltwirkung ohne aber quantifizierbare Aussagen zur Umweltwirkung darstellen zu können (Bsp.: Der Wirkpfad direkte Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen wird beschrieben durch den Indikator „Installierte Leistung von Windenergieanlagen in Deutschland nach Standort“. Hier wird unterstellt, dass jede Windenergieanlage potenziell ein Risiko für die Avifauna darstellt)³³.
- ▶ Wie umfasst der Indikator die für den Wirkpfad definierten Systemgrenzen?
 - „Nahezu vollständig“ im Sinne von: Nur wenige Systemraumbestandteile von tendenziell untergeordneter Bedeutung fehlen.
 - „Teilweise“ im Sinne von: Es fehlen relevante Systemraumbestandteile, der grundlegende und umfassende Ansatz bleibt aber gewahrt, die ableitbaren Aussagen sind mit geringen Einschränkungen verwertbar.
 - „Nur Auswahl“ im Sinne von: Es wurden nur einzelnen Systemraumbestandteile berücksichtigt, die ableitbaren Aussagen sind ggf. nur eingeschränkt verwertbar.

³³ Proxy Indikatoren sind im Bewertungsmodell grundsätzlich kritisch zu sehen. Sie werden nur genutzt, wenn eine weitere Verrechnung zu Schadpotenzialen nicht mit der ausreichenden Datenqualität erfolgen kann. Das Beispiel der Windenergieanlagen zeigt aber: Eine Hochrechnung getöteter Individuen anhand lokaler Stichproben bringt keine zusätzliche Information, da die errechneten Individuenverluste in der Zeitreihe allein über den Faktor zur Abbildung der Windenergieanlagen (Leistung, Standorte, Rotorfläche o.ä.) skaliert werden. Ein so errechneter Indikator irritiert durch große Zahlen an getöteten Tieren, die in der Praxis nicht validiert werden können.

- Wie ist die Qualität der für die Berechnung/ Ableitung notwendigen Daten zu bewerten?
 - „Hoch“ im Sinne von: Öffentlich verfügbare, nachvollziehbare Datenquellen mit regelmäßigen Aktualisierungszyklen.
 - „Akzeptabel“ im Sinne von: Nicht nur öffentlich verfügbare, nachvollziehbare Datenquellen die ggf. einer vertieften Aufbereitung bedürfen, die Berechnung ist ggf. aufwendig.
 - „Mäßig“ im Sinne von: Nicht alle Daten sind öffentlich verfügbar, die Daten bedürfen einer umfangreichen Aufbereitung und Verrechnung, die Berechnung ist mit methodischen Unsicherheiten behaftet, die Zeitreihenverfügbarkeit ist nur eingeschränkt sichergestellt.

5.1 Wirkpfad luftgetragene Schadstoffe

5.1.1 Indikator: Emissionen von Stickoxiden aus dem Energiesystem

5.1.1.1 Datengrundlage

Datengrundlage sind die detaillierten Inventartabellen im NFR Format (Nomenclature for Reporting), Annex 1: National sector emissions: Main pollutants, particulate matter, heavy metals and persistent organic pollutants [UBA 2020]. Die amtlichen Daten sind öffentlich zugänglich, werden jährlich aktualisiert und stehen nach ca. 2 Jahren zur Verfügung.

5.1.1.2 Quantifizierung

Die Quantifizierung erfolgte anhand der in Kapitel 4.2 beschriebenen Zuordnung der Sektoren der 127 NFR Codes in den Inventartabellen auf der Grundlage der ZSE-Datenbank des UBA. Durch den Rückgriff auf die Daten der Emissionsberichterstattung sind die möglichen Indikatoren für den Wirkpfad Luftschadstoffe alle grundsätzlich quantifizierbar und als Zeitreihe abbildbar.

Dabei wurde wie folgt unterschieden: (a) NFR Codes, die vollständig dem Energiesystem zuzuordnen sind; (b) NFR Codes, die nur teilweise dem Energiesystem zuzuordnen sind und (c) NFR Codes außerhalb der Systemgrenze des Energiesystems. Die Summierung der NFR Codes, die vollständig und teilweise dem Energiesystem zuzuordnen sind, stellt ein konservatives Vorgehen dar. Es gibt somit eine klare Rechenvorschrift für die Indikatoren für diesen Wirkpfad.

Die in den Tabellen der Emissionsberichterstattung dokumentierten Emissionsdaten sind Berechnungen auf Basis von entsprechenden Aktivitätsraten und einen für den jeweiligen Luftschadstoff spezifischen Emissionsfaktor. Die im Inventar für einzelne NFR Codes angegebenen Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren sind vollständig, auch wenn aus fachlichen Gründen einige der Quellgruppen-Schadstoff-Kombinationen nicht vorkommen.

Es wurden Unsicherheiten für die Ableitung der Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren bestimmt, die veröffentlicht sind [IIR 2020]. Die Datenqualität ist somit im Allgemeinen als hoch zu bewerten.

5.1.1.3 Ergebnisse

Die zeitliche Entwicklung der Emissionen von Stickoxiden (NO_x , angegeben als NO_2) aus dem Energiesystem ist Abbildung 23 zu entnehmen, die Zahlenwerte finden sich in Tabelle 14. Seit 2000 ist ein kontinuierlicher Rückgang der Emissionen zu verzeichnen. Die Emissionen aus den Energiewende-Sektoren sind seit dem Jahr 2000 um 40% gesunken. Der Anteil der Emissionen aus den Energiewende-Sektoren an den Gesamtemissionen ging von 81% auf 77% zurück. Die

Sektoren, die nur teilweise dem Energiesystem zuzuordnen sind, waren im Jahr 2018 für ca. 10% der Emissionen des Energiesystems verantwortlich.

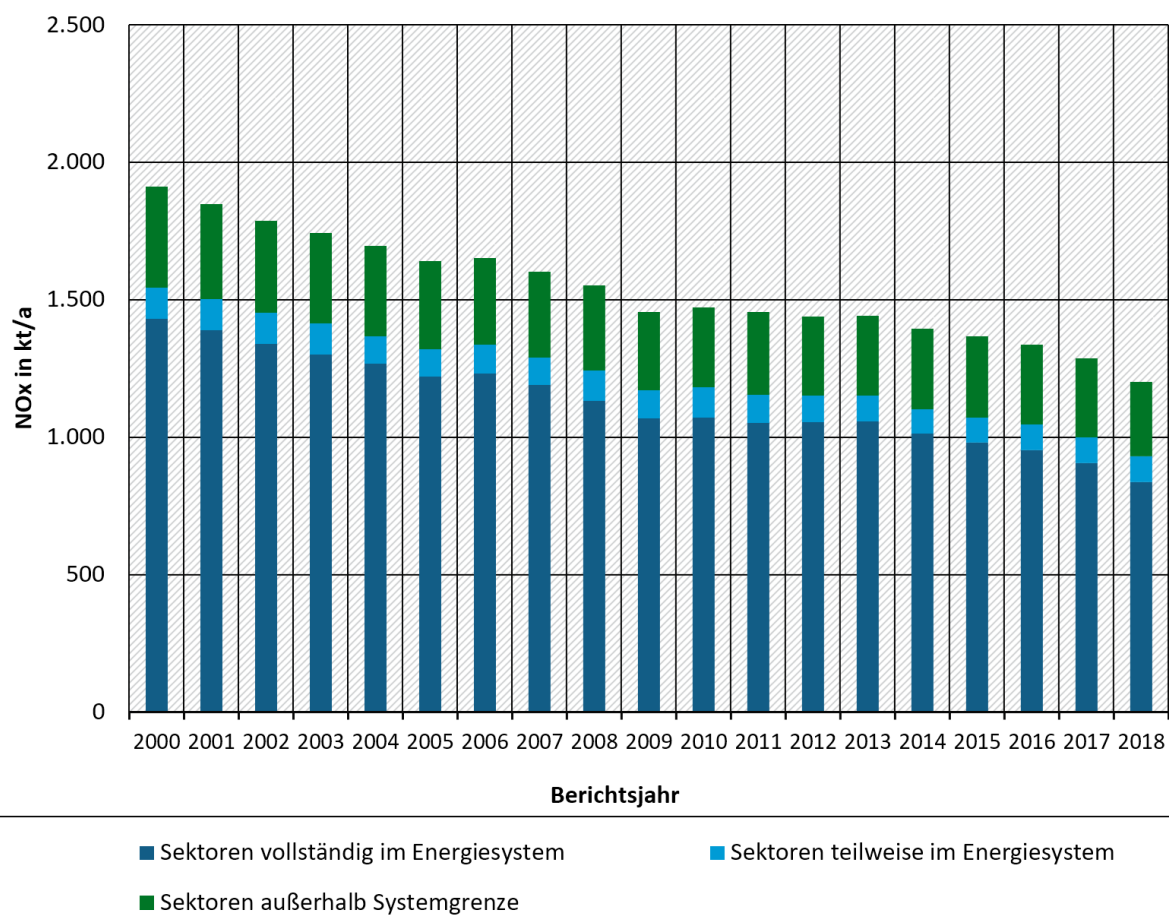
5.1.1.4 Beurteilung

Die Bundesrepublik Deutschland ist verpflichtet, die jährlichen durch menschliche Tätigkeiten verursachten Emissionen von NO_x gegenüber dem Jahr 2005 ab dem Jahr 2020 um 39 % und ab dem Jahr 2030 um 65 % zu reduzieren.³⁴ Bis 2018 wurde nur eine Reduktion von 27% erreicht. Der Rückgang der Emissionen aus fossilen Kraftwerken, die dem Systemraum der Energiewende zuzurechnen sind, hatte dabei einen großen Anteil. Da weiterhin zusätzliche Maßnahmen zur Minderung der Stickstoffoxid-Emissionen angezeigt sind, kann die Umsetzung der Maßnahmen mit dem Indikator für das Energiesystem bewertet werden.

Die Auswirkungen der NO_x -Emissionen betreffen das Schutzgut Menschen aufgrund der Immissionsbelastung von NO_2 sowie durch den Beitrag von NO_x zur Feinstaubbelastung (über die Bildung von Sekundärpartikeln) sowie von Ozon. Emissionen von NO_x tragen neben NH_3 zur Deposition eutrophierender Stoffe und zusammen mit SO_2 und NH_3 zur Deposition versauernder Stoffe bei. Sie haben damit Auswirkungen auf die Schutzgüter Pflanzen, Tiere und biologische Vielfalt (z.B. Beeinträchtigung stickstoffempfindlicher Lebensraumtypen), Boden (z.B. durch Versauerung), Wasser (z.B. durch Eintrag von Nitrat ins Grundwasser, und Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit bei Nutzung als Trinkwasser) sowie Kultur- und Sachgüter (durch saure Niederschläge).

³⁴ 43. BImSchV (Verordnung über nationale Verpflichtungen zur Reduktion der Emissionen bestimmter Luftschadstoffe), 18.07.2018

Abbildung 23: Emissionen von Stickoxiden (als NO₂)



Quelle: NFR Tabellen DE_2020_Annex_I_2000 bis 2018

Tabelle 14: Emissionen von Stickoxiden (als NO₂), in kt/a

	Summe	Sektoren vollständig im Energiesystem	Sektoren teilweise im Energiesystem	Sektoren außerhalb Systemgrenze
2000	1.911	1.430	114	366
2001	1.848	1.388	115	344
2002	1.787	1.339	114	335
2003	1.742	1.302	112	329
2004	1.695	1.267	101	327
2005	1.641	1.221	100	320
2006	1.653	1.231	105	317
2007	1.602	1.189	100	312
2008	1.553	1.134	109	310
2009	1.456	1.070	102	285
2010	1.474	1.073	110	291
2011	1.455	1.053	102	300
2012	1.440	1.056	95	288
2013	1.441	1.059	93	289
2014	1.395	1.014	89	292
2015	1.366	981	90	295
2016	1.336	954	93	289
2017	1.288	907	94	287
2018	1.202	837	93	272

Quelle: NFR Tabellen DE_2020_Annex_I_2000 bis 2018 [UBA 2020]

Bewertung der Ergebnisse der Zeitreihe:

Die Summe der Emissionen geht seit dem Jahr 2000 stetig **zurück**.

Der absolute und relative Beitrag aus den Sektoren, die vollständig und teilweise der Energiewende zuzuschreiben sind, bleibt stabil.

Im Sinne des Indikators ist somit von einer abnehmenden Umweltbelastung auf die betroffenen Schutzgüter auszugehen.

Beurteilung des Indikators:

Der Indikator bildet die zu beschreibende Umweltauswirkung **in direkte Weise** ab.

Der Indikator umfasst **nahezu vollständig** die für den Wirkpfad definierten Systemgrenzen.

die Qualität der für die Berechnung/ Ableitung herangezogenen Daten ist als **hoch** zu bewerten.

5.1.2 Indikator: Emissionen von Schwefeloxiden aus dem Energiesystem

5.1.2.1 Datengrundlage

Datengrundlage sind die detaillierten Inventartabellen im NFR-Format (Nomenclature for Reporting), Annex 1: National sector emissions: Main pollutants, particulate matter, heavy metals and persistent organic pollutants [UBA 2020]. Die amtlichen Daten sind öffentlich zugänglich, werden jährlich aktualisiert und stehen nach ca. 2 Jahren zur Verfügung.

5.1.2.2 Quantifizierung

Die Quantifizierung erfolgte anhand der in Kapitel 4.2 beschriebenen Zuordnung der Sektoren der 127 NFR Codes in den Inventartabellen auf der Grundlage der ZSE-Datenbank des UBA. Durch den Rückgriff auf die Daten der Emissionsberichterstattung sind die möglichen Indikatoren für den Wirkpfad Luftschadstoffe alle grundsätzlich quantifizierbar und als Zeitreihe abbildbar.

Dabei wurde wie folgt unterschieden: (a) NFR Codes, die vollständig dem Energiesystem zuzuordnen sind; (b) NFR Codes, die nur teilweise dem Energiesystem zuzuordnen sind und (c) NFR Codes außerhalb der Systemgrenze des Energiesystems. Die Summierung der NFR Codes, die vollständig und teilweise dem Energiesystem zuzuordnen sind, stellt ein konservatives Vorgehen dar. Es gibt somit eine klare Rechenvorschrift für die Indikatoren für diesen Wirkpfad.

Die in den Tabellen der Emissionsberichterstattung dokumentierten Emissionsdaten sind Berechnungen auf Basis von entsprechenden Aktivitätsraten und einen für den jeweiligen Luftschadstoff spezifischen Emissionsfaktor. Die im Inventar für einzelne NFR Codes angegebenen Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren sind vollständig, auch wenn aus fachlichen Gründen einige der Quellgruppen-Schadstoff-Kombinationen nicht vorkommen.

Es wurden Unsicherheiten für die Ableitung der Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren bestimmt, die veröffentlicht sind [IIR 2020]. Die Datenqualität ist somit im Allgemeinen als hoch zu bewerten.

5.1.2.3 Ergebnisse

Die zeitliche Entwicklung der Emissionen von Schwefeloxiden (SO_x , angegeben als SO_2) aus dem Energiesystem ist Abbildung 24 zu entnehmen, die Zahlenwerte finden sich in Tabelle 15. Seit 2000 ist ein kontinuierlicher Rückgang der Emissionen zu verzeichnen. Die Emissionen aus den Energiewenderelevanten Sektoren sind seit dem Jahr 2000 um 60% zurückgegangen. Der Anteil der Energiewende-Sektoren an den Gesamtemissionen ging von 82% auf 73% zurück. Die Sektoren, die nur teilweise dem Energiesystem zuzuordnen sind, waren im Jahr 2018 für ca. 14% der Emissionen des Energiesystems verantwortlich.

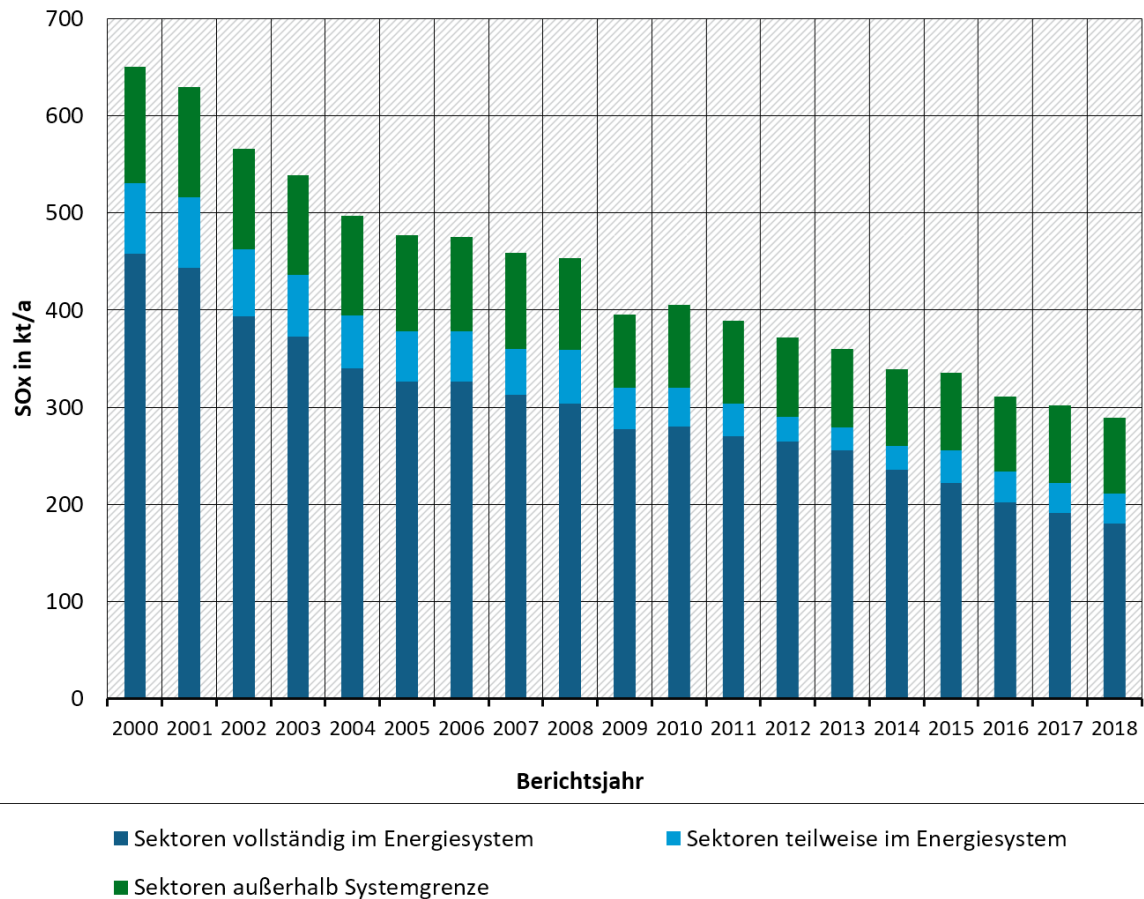
5.1.2.4 Beurteilung

Die Bundesrepublik Deutschland ist verpflichtet, die jährlichen durch menschliche Tätigkeiten verursachten Emissionen von SO_x gegenüber dem Jahr 2005 ab dem Jahr 2020 um 21 % und ab dem Jahr 2030 um 58 % zu reduzieren.³⁵ Bis 2018 wurde bereits eine Reduktion von 39 % erreicht. Der Rückgang an Emissionen fossiler Kraftwerke aus den energiewenderelevanten Sektoren hatte dabei einen großen Anteil. Da weiterhin zusätzliche Maßnahmen zur Minderung der Schwefeloxid-Emissionen angezeigt sind, kann die Umsetzung der Maßnahmen mit dem Indikator für das Energiesystem bewertet werden.

³⁵ 43. BImSchV (Verordnung über nationale Verpflichtungen zur Reduktion der Emissionen bestimmter Luftschadstoffe), 18.07.2018

Die Auswirkungen der SO_x-Emissionen betreffen das Schutzgut Menschen aufgrund der Immissionsbelastung von SO₂ sowie durch den Beitrag von SO_x zur Feinstaubbelastung (über die Bildung von Sekundärpartikeln). Emissionen von SO_x tragen neben NO_x und NH₃ zur Deposition versauernder Stoffe bei. Sie haben damit Auswirkungen auf die Schutzgüter Pflanzen, Tiere und biologische Vielfalt (z.B. Beeinträchtigung saure Niederschläge), Boden (z.B. durch Versauerung), Wasser (z.B. durch Freisetzung von Aluminium aus dem Boden ins Grundwasser, und Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit bei Nutzung als Trinkwasser) sowie Kultur- und Sachgüter (durch saure Niederschläge).

Abbildung 24: Emissionen von Schwefeloxiden (als SO₂)



Quelle: NFR Tabellen DE_2020_Annex_I_2000 bis 2018

Tabelle 15: Emissionen von Schwefeloxiden (als SO₂), in kt/a

	Summe	Sektoren vollständig im Energiesystem	Sektoren teilweise im Energiesystem	Sektoren außerhalb Systemgrenze
2000	650	458	72	120
2001	629	444	73	113
2002	566	393	69	104
2003	539	373	64	102
2004	497	340	55	103
2005	477	327	51	99
2006	476	326	52	98
2007	459	313	48	99
2008	454	304	55	95
2009	395	278	42	75
2010	405	280	40	85
2011	389	270	34	86
2012	372	264	26	81
2013	360	256	23	81
2014	339	236	24	79
2015	336	222	34	80
2016	311	202	32	78
2017	302	192	30	80
2018	289	180	30	78

Quelle: NFR Tabellen DE_2020_Annex_I_2000 bis 2018 [UBA 2020]

Bewertung der Ergebnisse der Zeitreihe:

Die Summe der Emissionen geht seit dem Jahr 2000 stetig **zurück**.

Der absolute und relative Beitrag aus den Sektoren, die vollständig und teilweise der Energiewende zuzuschreiben sind, nimmt ab.

Im Sinne des Indikators ist somit von einer abnehmenden Umweltbelastung auf die betroffenen Schutzgüter auszugehen.

Beurteilung des Indikators:

Der Indikator bildet die zu beschreibende Umweltauswirkung **in direkte Weise** ab.

Der Indikator umfasst **nahezu vollständig** die für den Wirkpfad definierten Systemgrenzen.

Die Qualität der für die Berechnung/ Ableitung herangezogenen Daten ist als **hoch** zu bewerten.

5.1.3 Indikator: Emissionen von Feinstaub aus dem Energiesystem

5.1.3.1 Datengrundlage

Datengrundlage sind die detaillierten Inventartabellen im NFR-Format (Nomenclature for Reporting), Annex 1: National sector emissions: Main pollutants, particulate matter, heavy metals and persistent organic pollutants [UBA 2020]. Die amtlichen Daten sind öffentlich zugänglich, werden jährlich aktualisiert und stehen nach ca. 2 Jahren zur Verfügung.

5.1.3.2 Quantifizierung

Die Quantifizierung erfolgte anhand der in Kapitel 4.2 beschriebenen Zuordnung der Sektoren der 127 NFR Codes in den Inventartabellen auf der Grundlage der ZSE-Datenbank des UBA. Durch den Rückgriff auf die Daten der Emissionsberichterstattung sind die möglichen Indikatoren für den Wirkpfad Luftschadstoffe alle grundsätzlich quantifizierbar und als Zeitreihe abbildbar.

Dabei wurde wie folgt unterschieden: (a) NFR Codes, die vollständig dem Energiesystem zuzuordnen sind; (b) NFR Codes, die nur teilweise dem Energiesystem zuzuordnen sind und (c) NFR Codes außerhalb der Systemgrenze des Energiesystems. Die Summierung der NFR Codes, die vollständig und teilweise dem Energiesystem zuzuordnen sind, stellt ein konservatives Vorgehen dar. Es gibt somit eine klare Rechenvorschrift für die Indikatoren für diesen Wirkpfad.

Die in den Tabellen der Emissionsberichterstattung dokumentierten Emissionsdaten sind Berechnungen auf Basis von entsprechenden Aktivitätsraten und einen für den jeweiligen Luftschadstoff spezifischen Emissionsfaktor. Die im Inventar für einzelne NFR Codes angegebenen Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren sind vollständig, auch wenn aus fachlichen Gründen einige der Quellgruppen-Schadstoff-Kombinationen nicht vorkommen.

Es wurden Unsicherheiten für die Ableitung der Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren bestimmt, die veröffentlicht sind [IIR 2020]. Die Datenqualität ist somit im Allgemeinen als hoch zu bewerten.

5.1.3.3 Ergebnisse

Die zeitliche Entwicklung der Emissionen von Feinstaub (PM_{2,5}) aus dem Energiesystem ist Abbildung 25 zu entnehmen, die Zahlenwerte finden sich in Tabelle 16. Seit 2000 ist ein kontinuierlicher Rückgang der Emissionen zu verzeichnen. Die Emissionen aus den energiewenderelevanten Sektoren sind seit dem Jahr 2000 um 57% zurückgegangen. Der Anteil der Energiewende-Sektoren an den Gesamtemissionen ging von 53% auf 41% zurück. Die Sektoren, die nur teilweise dem Energiesystem zuzuordnen sind, waren im Jahr 2018 für ca. 11% der Emissionen des Energiesystems verantwortlich.

5.1.3.4 Beurteilung

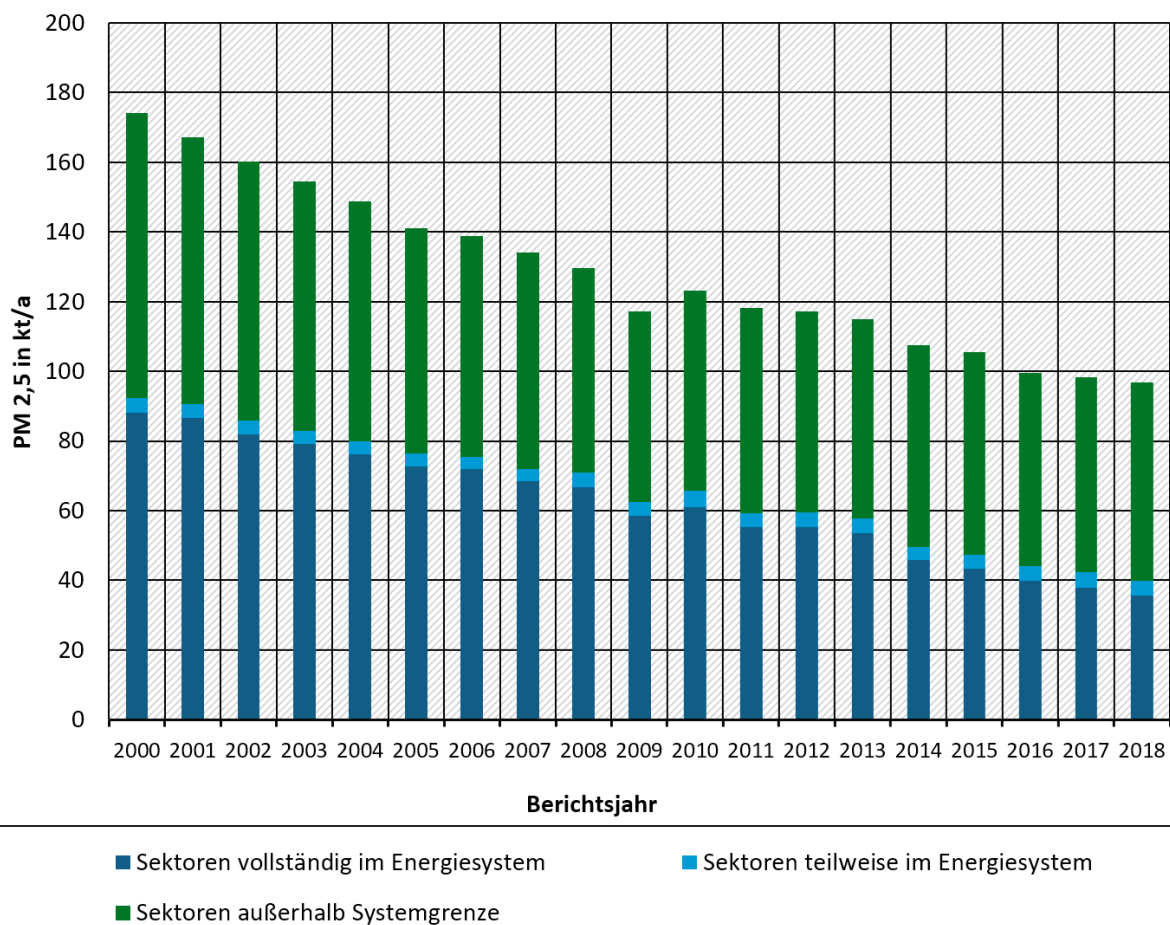
Die Bundesrepublik Deutschland ist verpflichtet, die jährlichen durch menschliche Tätigkeiten verursachten Emissionen von Feinstaub (PM_{2,5}) gegenüber dem Jahr 2005 ab dem Jahr 2020 um 26 % und ab dem Jahr 2030 um 43 % zu reduzieren.³⁶ Bis 2018 wurde bereits eine Reduktion um 31 % erreicht. Der Rückgang an Emissionen fossiler Kraftwerke aus den energiewenderelevanten Sektoren sowie die Abnahme der Emissionen aus dem Straßenverkehr, durch sukzessive Einführung von Partikelfiltern und anderen Feinstaubminimierenden Maßnahmen hatte da-

³⁶ 43. BImSchV (Verordnung über nationale Verpflichtungen zur Reduktion der Emissionen bestimmter Luftschadstoffe), 18.07.2018

bei einem großen Anteil. Da weiterhin zusätzliche Maßnahmen zur Minderung der Feinstaub-Emissionen angezeigt sind, kann die Umsetzung der Maßnahmen mit dem Indikator für das Energiesystem bewertet werden.

Die Auswirkungen der Emissionen von Feinstaub (PM 2,5) betreffen primär das Schutzgut Menschen aufgrund der Immissionsbelastung der Umgebungsluft. Die gesundheitliche Wirkung wird mit dem Indikator *Attributable Todesfälle durch Luftschadstoffe* (Abschnitt 5.1.8) quantifiziert. Diese werden durch die primären Emissionen von PM 2.5 und durch Sekundärpartikel aus gasförmigen Schadstoffen wie NO_x und NH₃ verursacht.

Abbildung 25: Emissionen von Feinstaub (PM 2,5)



Quelle: NFR Tabellen DE_2020_Annex_I_2000 bis 2018

Tabelle 16: Emissionen von Feinstaub (PM 2,5), in kt/a

	Summe	Sektoren vollständig im Energiesystem	Sektoren teilweise im Energiesystem	Sektoren außerhalb Systemgrenze
2000	174,1	88,1	4,3	81,7
2001	167,2	86,7	3,9	76,6
2002	160,3	82,0	3,9	74,4
2003	154,4	79,3	3,5	71,6
2004	148,8	76,2	3,6	69,0
2005	141,1	72,7	3,7	64,8
2006	138,9	71,9	3,5	63,6
2007	134,2	68,4	3,6	62,3
2008	129,6	66,8	4,2	58,6
2009	117,3	58,5	4,0	54,8
2010	123,1	61,1	4,7	57,3
2011	118,2	55,2	4,1	58,8
2012	117,1	55,3	4,2	57,7
2013	115,0	53,5	4,2	57,3
2014	107,4	45,8	3,8	57,9
2015	105,5	43,3	4,1	58,1
2016	99,5	39,9	4,3	55,4
2017	98,3	38,0	4,3	56,1
2018	96,7	35,6	4,3	56,9

Quelle: NFR Tabellen DE_2020_Annex_I_2000 bis 2018 [UBA 2020]

Bewertung der Ergebnisse der Zeitreihe:

Die Summe der Emissionen geht seit dem Jahr 2000 stetig **zurück**.

Der relative Beitrag aus den Sektoren, die vollständig oder teilweise der Energiewendezuzuschreiben sind, nimmt ab.

Im Sinne des Indikators ist somit von einer abnehmenden Umweltbelastung auf die betroffenen Schutzgüter auszugehen.

Beurteilung des Indikators:

Der Indikator bildet die zu beschreibende Umweltauswirkung **in direkte Weise** ab.

Der Indikator umfasst **nahezu vollständig** die für den Wirkpfad definierten Systemgrenzen.

Die Qualität der für die Berechnung/ Ableitung herangezogenen Daten ist als **hoch** zu bewerten.

5.1.4 Indikator: Emissionen von Black Carbon (BC) aus dem Energiesystem

5.1.4.1 Datengrundlage

Datengrundlage sind die detaillierten Inventartabellen im NFR-Format (Nomenclature for Reporting), Annex 1: National sector emissions: Main pollutants, particulate matter, heavy metals and persistent organic pollutants [UBA 2020]. Die amtlichen Daten sind öffentlich zugänglich, werden jährlich aktualisiert und stehen nach ca. 2 Jahren zur Verfügung.

5.1.4.2 Quantifizierung

Die Quantifizierung erfolgte anhand der in Kapitel 4.2 beschriebenen Zuordnung der Sektoren der 127 NFR Codes in den Inventartabellen auf der Grundlage der ZSE-Datenbank des UBA. Durch den Rückgriff auf die Daten der Emissionsberichterstattung sind die möglichen Indikatoren für den Wirkpfad Luftschadstoffe alle grundsätzlich quantifizierbar und als Zeitreihe abbildbar.

Dabei wurde wie folgt unterschieden: (a) NFR Codes, die vollständig dem Energiesystem zuzuordnen sind; (b) NFR Codes, die nur teilweise dem Energiesystem zuzuordnen sind und (c) NFR Codes außerhalb der Systemgrenze des Energiesystems. Die Summierung der NFR Codes, die vollständig und teilweise dem Energiesystem zuzuordnen sind, stellt ein konservatives Vorgehen dar. Es gibt somit eine klare Rechenvorschrift für die Indikatoren für diesen Wirkpfad.

Die in den Tabellen der Emissionsberichterstattung dokumentierten Emissionsdaten sind Berechnungen auf Basis von entsprechenden Aktivitätsraten und einen für den jeweiligen Luftschadstoff spezifischen Emissionsfaktor. Die im Inventar für einzelne NFR Codes angegebenen Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren sind vollständig, auch wenn aus fachlichen Gründen einige der Quellgruppen-Schadstoff-Kombinationen nicht vorkommen.

Es wurden Unsicherheiten für die Ableitung der Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren bestimmt, die veröffentlicht sind [IIR 2020]. Die Datenqualität ist somit im Allgemeinen als hoch zu bewerten.

5.1.4.3 Ergebnisse

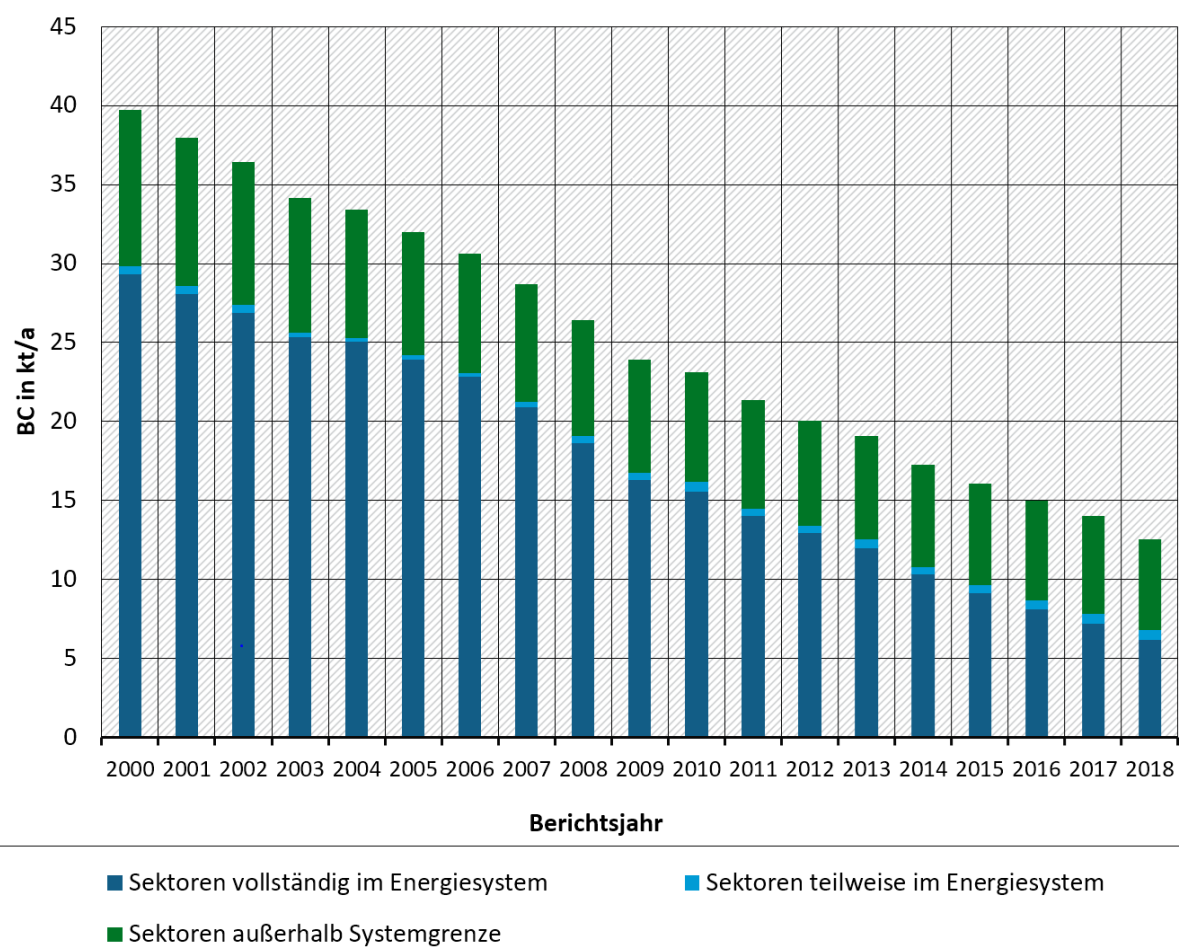
Die zeitliche Entwicklung der Emissionen von Black Carbon (BC) aus dem Energiesystem ist Abbildung 26 zu entnehmen, die Zahlenwerte finden sich in Tabelle 17. Seit 2000 ist ein kontinuierlicher Rückgang der Emissionen zu verzeichnen. Die Emissionen aus den energiewenderelevanten Sektoren sind seit dem Jahr 2000 um 77% gesunken. Der Anteil der Energiewendesektoren an den Gesamtemissionen ging von 75% auf 54% zurück. Die Sektoren, die nur teilweise dem Energiesystem zuzuordnen sind, waren im Jahr 2018 für ca. 9% der Emissionen des Energiesystems verantwortlich.

5.1.4.4 Beurteilung

Black Carbon (BC) ist ein Bestandteil von Feinstaub (PM_{2,5}). Der Rückgang an Emissionen fossiler Kraftwerke aus energiewenderelevanten Sektoren hatte dabei einen großen Anteil. Da weiterhin zusätzliche Maßnahmen zur Minderung der Feinstaub-Emissionen angezeigt sind, kann die Umsetzung der Maßnahmen mit dem Indikator für das Energiesystem bewertet werden.

Die Auswirkungen der Emissionen von Black Carbon (BC) betreffen primär das Schutzgut Menschen aufgrund der Immissionsbelastung der Umgebungsluft. Die gesundheitliche Wirkung wird mit dem Indikator *attributable Todesfälle durch Luftschadstoffe* (Abschnitt 5.1.8) quantifiziert. Darüber hinaus zählt BC zu den kurzlebigen klimawirksamen Schadstoffen (Short-Lived Climate-forcing Pollutants, SLCPs) und trägt damit zum Klimawandel bei [IASS 2017].

Abbildung 26: Emissionen von Black Carbon (BC)



Quelle: NFR Tabellen DE_2020_Annex_I_2000 bis 2018

Tabelle 17: Emissionen von Black Carbon (BC), in kt/a

	Summe	Sektoren vollständig im Energiesystem	Sektoren teilweise im Energiesystem	Sektoren außerhalb Systemgrenze
2000	39,8	29,3	0,5	9,9
2001	38,0	28,1	0,5	9,4
2002	36,4	26,9	0,5	9,0
2003	34,2	25,4	0,3	8,6
2004	33,4	25,0	0,3	8,1
2005	32,0	23,9	0,3	7,8
2006	30,6	22,8	0,3	7,5
2007	28,7	20,9	0,3	7,5
2008	26,4	18,7	0,4	7,4
2009	23,9	16,3	0,5	7,2
2010	23,1	15,5	0,6	7,0
2011	21,4	14,0	0,4	6,9
2012	20,0	12,9	0,5	6,6
2013	19,1	12,0	0,6	6,5
2014	17,2	10,3	0,4	6,5
2015	16,1	9,1	0,5	6,4
2016	15,0	8,1	0,6	6,4
2017	14,0	7,2	0,6	6,2
2018	12,6	6,2	0,6	5,8

Quelle: NFR Tabellen DE_2020_Annex_I_2000 bis 2018 [UBA 2020]

Bewertung der Ergebnisse der Zeitreihe:

Die Summe der Emissionen geht seit dem Jahr 2000 stetig **zurück**.

Der relative Beitrag aus den Sektoren, die vollständig oder teilweise der Energiewende zuzuschreiben sind, nimmt ab.

Im Sinne des Indikators ist somit von einer abnehmenden Umweltbelastung auf die betroffenen Schutzgüter auszugehen.

Beurteilung des Indikators:

Der Indikator bildet die zu beschreibende Umweltauswirkung **in direkte Weise** ab.

Der Indikator umfasst **nahezu vollständig** die für den Wirkpfad definierten Systemgrenzen.

Die Qualität der für die Berechnung/ Ableitung herangezogenen Daten ist als **hoch** zu bewerten.

5.1.5 Indikator: Emissionen von Kohlenmonoxid aus dem Energiesystem

5.1.5.1 Datengrundlage

Datengrundlage sind die detaillierten Inventartabellen im NFR-Format (Nomenclature for Reporting), Annex 1: National sector emissions: Main pollutants, particulate matter, heavy metals and persistent organic pollutants [UBA 2020]. Die amtlichen Daten sind öffentlich zugänglich, werden jährlich aktualisiert und stehen nach ca. 2 Jahren zur Verfügung.

5.1.5.2 Quantifizierung

Die Quantifizierung erfolgte anhand der in Kapitel 4.2 beschriebenen Zuordnung der Sektoren der 127 NFR Codes in den Inventartabellen auf der Grundlage der ZSE-Datenbank des UBA. Durch den Rückgriff auf die Daten der Emissionsberichterstattung sind die möglichen Indikatoren für den Wirkpfad Luftschadstoffe alle grundsätzlich quantifizierbar und als Zeitreihe abbildbar.

Dabei wurde wie folgt unterschieden: (a) NFR Codes, die vollständig dem Energiesystem zuzuordnen sind; (b) NFR Codes, die nur teilweise dem Energiesystem zuzuordnen sind und (c) NFR Codes außerhalb der Systemgrenze des Energiesystems. Die Summierung der NFR Codes, die vollständig und teilweise dem Energiesystem zuzuordnen sind, stellt ein konservatives Vorgehen dar. Es gibt somit eine klare Rechenvorschrift für die Indikatoren für diesen Wirkpfad.

Die in den Tabellen der Emissionsberichterstattung dokumentierten Emissionsdaten sind Berechnungen auf Basis von entsprechenden Aktivitätsraten und einen für den jeweiligen Luftschadstoff spezifischen Emissionsfaktor. Die im Inventar für einzelne NFR Codes angegebenen Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren sind vollständig, auch wenn aus fachlichen Gründen einige der Quellgruppen-Schadstoff-Kombinationen nicht vorkommen.

Es wurden Unsicherheiten für die Ableitung der Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren bestimmt, die veröffentlicht sind [IIR 2020]. Die Datenqualität ist somit im Allgemeinen als hoch zu bewerten.

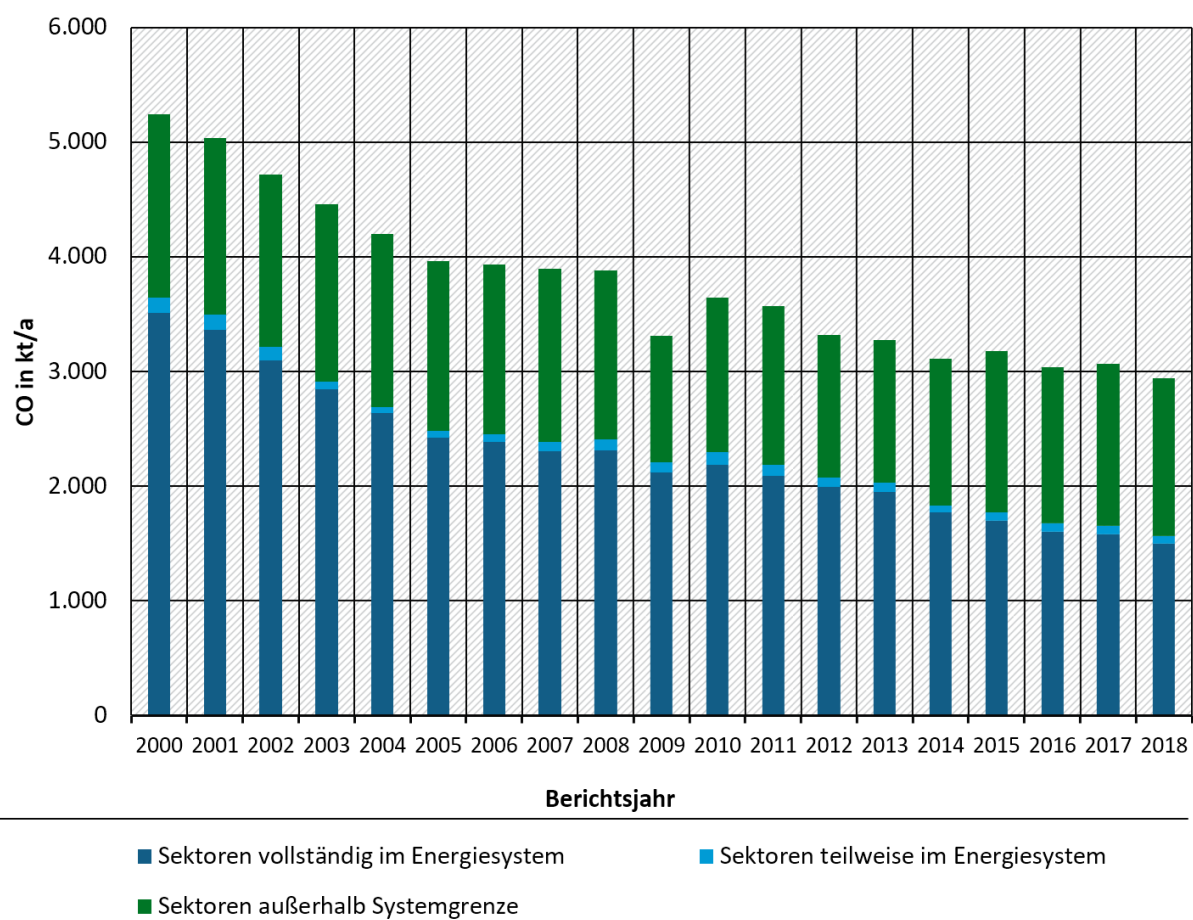
5.1.5.3 Ergebnisse

Die zeitliche Entwicklung der Emissionen von Kohlenmonoxid (CO) aus dem Energiesystem ist Abbildung 27 zu entnehmen, die Zahlenwerte finden sich in Tabelle 18. Seit 2000 ist ein kontinuierlicher Rückgang der Emissionen zu verzeichnen. Die Emissionen aus den energiewenderelevanten Sektoren sind seit dem Jahr 2000 um 57% gesunken. Der Anteil der Energiewendesektoren an den Gesamtemissionen ging von 70% auf 53% zurück. Die Sektoren, die nur teilweise dem Energiesystem zuzuordnen sind, waren im Jahr 2018 für ca. 4% der Emissionen des Energiesystems verantwortlich.

5.1.5.4 Beurteilung

Die Auswirkungen der Emissionen von Kohlenmonoxid (CO) betreffen das Schutzgut Menschen bei Immissionen in die Umgebungsluft. Messwerte zur Luftqualität in Deutschland zeigen derzeit keine Überschreitungen der Immissionswerte. Insofern kann der Indikator kein signifikantes Optimierungspotenzial aufzeigen, sondern dient als weitere Bestätigung des Rückgangs von Verbrennungsprozessen.

Abbildung 27: Emissionen von Kohlenmonoxid (CO)



Quelle: NFR Tabellen DE_2020_Annex_1_2000 bis 2018

Tabelle 18: Emissionen von Kohlenmonoxid (CO), in kt/a

	Summe	Sektoren vollständig im Energiesystem	Sektoren teilweise im Energiesystem	Sektoren außerhalb Systemgrenze
2000	5.241	3.511	133	1.597
2001	5.033	3.366	126	1.540
2002	4.714	3.095	120	1.499
2003	4.457	2.846	67	1.544
2004	4.199	2.634	59	1.506
2005	3.959	2.420	65	1.474
2006	3.933	2.385	71	1.477
2007	3.896	2.307	80	1.509
2008	3.882	2.312	96	1.474
2009	3.313	2.117	88	1.108
2010	3.642	2.184	115	1.343
2011	3.568	2.092	96	1.380
2012	3.315	1.995	78	1.242
2013	3.272	1.953	75	1.244
2014	3.111	1.772	63	1.276
2015	3.176	1.699	69	1.408
2016	3.039	1.605	67	1.367
2017	3.068	1.581	70	1.417
2018	2.938	1.495	68	1.375

Quelle: NFR Tabellen DE_2020_Annex_I_2000 bis 2018 [UBA 2020]

Bewertung der Ergebnisse der Zeitreihe:

Die Summe der Emissionen geht seit dem Jahr 2000 langsam **zurück** und verbleibt seit dem Jahr 2014 auf einem Niveau.

Der relative Beitrag aus den Sektoren, die vollständig oder teilweise der Energiewende zuzuschreiben sind, nimmt ab.

Im Sinne des Indikators ist somit von einer abnehmenden Umweltbelastung auf die betroffenen Schutzgüter auszugehen.

Beurteilung des Indikators:

Der Indikator bildet die zu beschreibende Umweltauswirkung **in direkte Weise** ab.

Der Indikator umfasst **nahezu vollständig** die für den Wirkpfad definierten Systemgrenzen.

Die Qualität der für die Berechnung/ Ableitung herangezogenen Daten ist als **hoch** zu bewerten.

5.1.6 Indikator: Emissionen von Quecksilber (Hg) aus dem Energiesystem

5.1.6.1 Datengrundlage

Datengrundlage sind die detaillierten Inventartabellen im NFR-Format (Nomenclature for Reporting), Annex 1: National sector emissions: Main pollutants, particulate matter, heavy metals and persistent organic pollutants [UBA 2020]. Die amtlichen Daten sind öffentlich zugänglich, werden jährlich aktualisiert und stehen nach ca. 2 Jahren zur Verfügung.

5.1.6.2 Quantifizierung

Die Quantifizierung erfolgte anhand der in Kapitel 4.2 beschriebenen Zuordnung der Sektoren der 127 NFR Codes in den Inventartabellen auf der Grundlage der ZSE-Datenbank des UBA. Durch den Rückgriff auf die Daten der Emissionsberichterstattung sind die möglichen Indikatoren für den Wirkpfad Luftschadstoffe alle grundsätzlich quantifizierbar und als Zeitreihe abbildbar.

Dabei wurde wie folgt unterschieden: (a) NFR Codes, die vollständig dem Energiesystem zuzuordnen sind; (b) NFR Codes, die nur teilweise dem Energiesystem zuzuordnen sind und (c) NFR Codes außerhalb der Systemgrenze des Energiesystems. Die Summierung der NFR Codes, die vollständig und teilweise dem Energiesystem zuzuordnen sind, stellt ein konservatives Vorgehen dar. Es gibt somit eine klare Rechenvorschrift für die Indikatoren für diesen Wirkpfad.

Die in den Tabellen der Emissionsberichterstattung dokumentierten Emissionsdaten sind Berechnungen auf Basis von entsprechenden Aktivitätsraten und einen für den jeweiligen Luftschadstoff spezifischen Emissionsfaktor. Die im Inventar für einzelne NFR Codes angegebenen Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren sind vollständig, auch wenn aus fachlichen Gründen einige der Quellgruppen-Schadstoff-Kombinationen nicht vorkommen.

Es wurden Unsicherheiten für die Ableitung der Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren bestimmt, die veröffentlicht sind [IIR 2020]. Die Datenqualität ist somit im Allgemeinen als hoch zu bewerten.

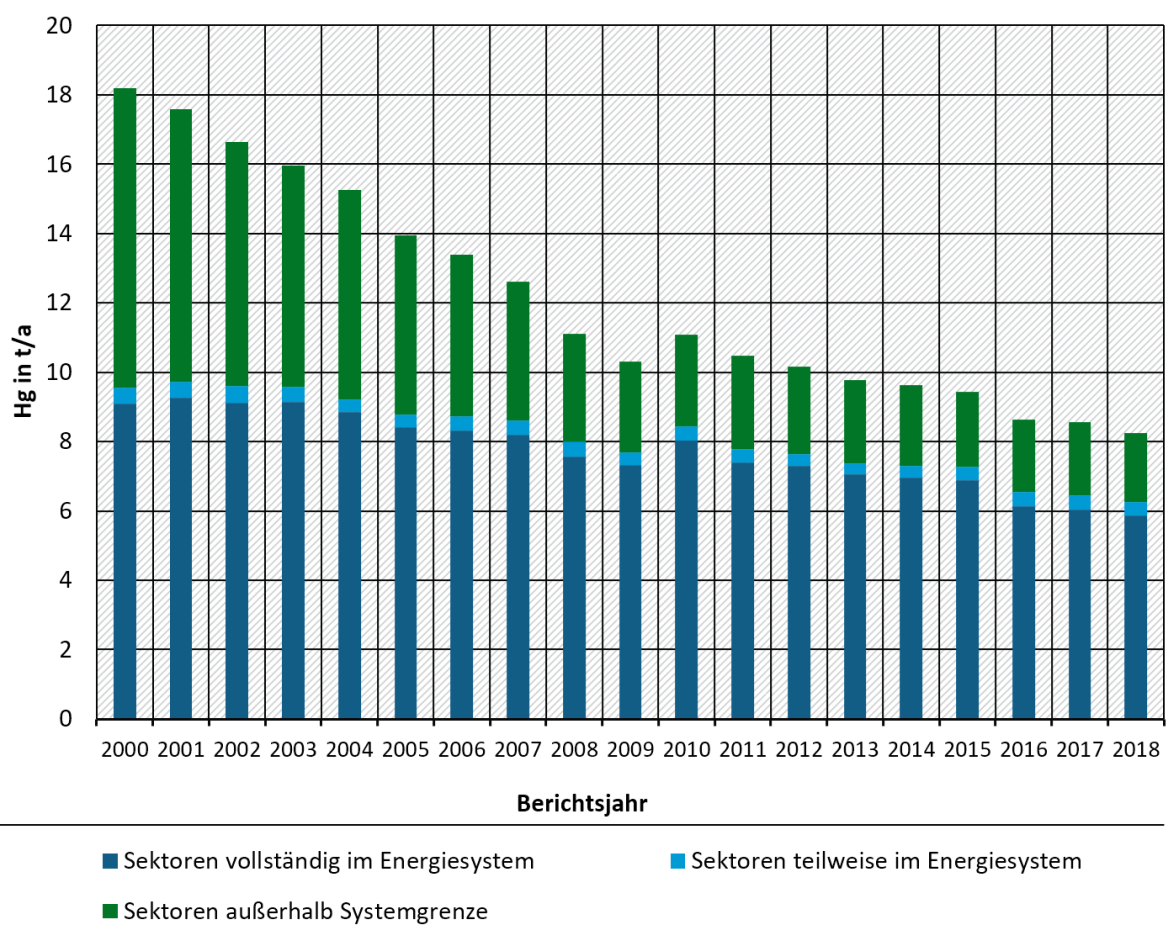
5.1.6.3 Ergebnisse

Die zeitliche Entwicklung der Emissionen von Quecksilber (Hg) aus dem Energiesystem ist Abbildung 28 zu entnehmen, die Zahlenwerte finden sich in Tabelle 19. Seit 2000 ist ein kontinuierlicher Rückgang der gesamten Emissionen zu verzeichnen. Die Emissionen aus den energiewenderelevanten Sektoren sind seit dem Jahr 2000 um 34% gesunken. Der Anteil der Energiewende-Sektoren an den Gesamtemissionen ist daher von 53% auf 76% gestiegen. Die Sektoren, die nur teilweise dem Energiesystem zuzuordnen sind, waren im Jahr 2018 für ca. 6% der Emissionen des Energiesystems verantwortlich. Kohlekraftwerke haben dabei den größten Beitrag.

5.1.6.4 Beurteilung

Die Auswirkungen der Emissionen von Quecksilber (Hg) betreffen das Schutzgut Menschen aufgrund der Immissionsbelastung der Umgebungsluft. Als Vertragsstaat der Minamata-Konvention hat sich Deutschland verpflichtet, den Ausstoß von Quecksilber weltweit einzudämmen. Der Indikator ist gut geeignet, die Auswirkung weiterer Minimierungsmaßnahmen zu dokumentieren, insbesondere die Abschaltung von Kohlekraftwerken.

Abbildung 28: Emissionen von Quecksilber (Hg)



Quelle: NFR Tabellen DE_2020_Annex_I_2000 bis 2018

Tabelle 19: Emissionen von Quecksilber (Hg), in t/a

	Summe	Sektoren vollständig im Energiesystem	Sektoren teilweise im Energiesystem	Sektoren außerhalb Systemgrenze
2000	18,2	9,1	0,5	8,6
2001	17,6	9,3	0,5	7,9
2002	16,6	9,1	0,5	7,0
2003	15,9	9,1	0,4	6,4
2004	15,2	8,9	0,4	6,0
2005	14,0	8,4	0,4	5,2
2006	13,4	8,3	0,4	4,7
2007	12,6	8,2	0,4	4,0
2008	11,1	7,6	0,4	3,1
2009	10,3	7,3	0,4	2,6
2010	11,1	8,0	0,4	2,7
2011	10,5	7,4	0,4	2,7
2012	10,2	7,3	0,3	2,5
2013	9,8	7,1	0,3	2,4
2014	9,6	7,0	0,3	2,3
2015	9,4	6,9	0,4	2,2
2016	8,6	6,1	0,4	2,1
2017	8,5	6,0	0,4	2,1
2018	8,2	5,9	0,4	2,0

Quelle: NFR Tabellen DE_2020_Annex_I_2000 bis 2018 [UBA 2020]

Bewertung der Ergebnisse der Zeitreihe:

Die Summe der Emissionen geht seit dem Jahr 2000 stetig **zurück**, seit ca. 10 Jahren jedoch in geringerem Umfang.

Der relative Beitrag aus den Sektoren, die vollständig oder teilweise der Energiewende zuzuordnen sind, nimmt zu.

Im Sinne des Indikators ist somit von einer gleichbleibenden Umweltbelastung auf die betroffenen Schutzgüter auszugehen.

Beurteilung des Indikators:

Der Indikator bildet die zu beschreibende Umweltauswirkung **in direkte Weise** ab.

Der Indikator umfasst **nahezu vollständig** die für den Wirkpfad definierten Systemgrenzen.

Die Qualität der für die Berechnung/ Ableitung herangezogenen Daten ist als **hoch** zu bewerten.

5.1.7 Indikator: Emissionen von Ammoniak aus dem Energiesystem

5.1.7.1 Datengrundlage

Datengrundlage sind die detaillierten Inventartabellen im NFR-Format (Nomenclature for Reporting), Annex 1: National sector emissions: Main pollutants, particulate matter, heavy metals and persistent organic pollutants [UBA 2020]. Die amtlichen Daten sind öffentlich zugänglich, werden jährlich aktualisiert und stehen nach ca. 2 Jahren zur Verfügung.

5.1.7.2 Quantifizierung

Die Quantifizierung erfolgte anhand der in Kapitel 4.2 beschriebenen Zuordnung der Sektoren der 127 NFR Codes in den Inventartabellen auf der Grundlage der ZSE-Datenbank des UBA. Durch den Rückgriff auf die Daten der Emissionsberichterstattung sind die möglichen Indikatoren für den Wirkpfad Luftschadstoffe alle grundsätzlich quantifizierbar und als Zeitreihe abbildbar.

Dabei wurde wie folgt unterschieden: (a) NFR Codes, die vollständig dem Energiesystem zuzuordnen sind; (b) NFR Codes, die nur teilweise dem Energiesystem zuzuordnen sind und (c) NFR Codes außerhalb der Systemgrenze des Energiesystems. Für den Indikator Emissionen von Ammoniak werden zusätzlich zwei weitere NFR Codes mit 100% bewertet und in die Auswertung integriert, in denen die Emissionen aus der Lagerung und Ausbringung von Gärresten aus dem Energiepflanzenanbau enthalten sind. Die Summierung der NFR Codes, die vollständig und teilweise dem Energiesystem zuzuordnen sind, stellt ein konservatives Vorgehen dar. Es gibt somit eine klare Rechenvorschrift für die Indikatoren für diesen Wirkpfad.

Die in den Tabellen der Emissionsberichterstattung dokumentierten Emissionsdaten sind Berechnungen auf Basis von entsprechenden Aktivitätsraten und einen für den jeweiligen Luftschadstoff spezifischen Emissionsfaktor. Die im Inventar für einzelne NFR Codes angegebenen Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren sind vollständig, auch wenn aus fachlichen Gründen einige der Quellgruppen-Schadstoff-Kombinationen nicht vorkommen.

Es wurden Unsicherheiten für die Ableitung der Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren bestimmt, die veröffentlicht sind [IIR 2020]. Die Datenqualität ist somit im Allgemeinen als hoch zu bewerten.

5.1.7.3 Ergebnisse

Die zeitliche Entwicklung der Emissionen von Ammoniak (NH_3) aus dem Energiesystem ist Abbildung 29 zu entnehmen, die Zahlenwerte finden sich in Tabelle 20. Seit 2000 sind die gesamten Ammoniak-Emissionen in etwa konstant geblieben. Die Ammoniak-Emissionen aus den energiewenderelevanten Sektoren sind seit dem Jahr 2000 von 40 kt auf 72.4 kt angestiegen. Der Anteil der Energiewende-Sektoren an den Gesamtemissionen steigt von 6% auf 11%. Die Sektoren, die nur teilweise dem Energiesystem zuzuordnen sind, waren im Jahr 2018 für ca. 1% der Emissionen des Energiesystems verantwortlich.

5.1.7.4 Beurteilung

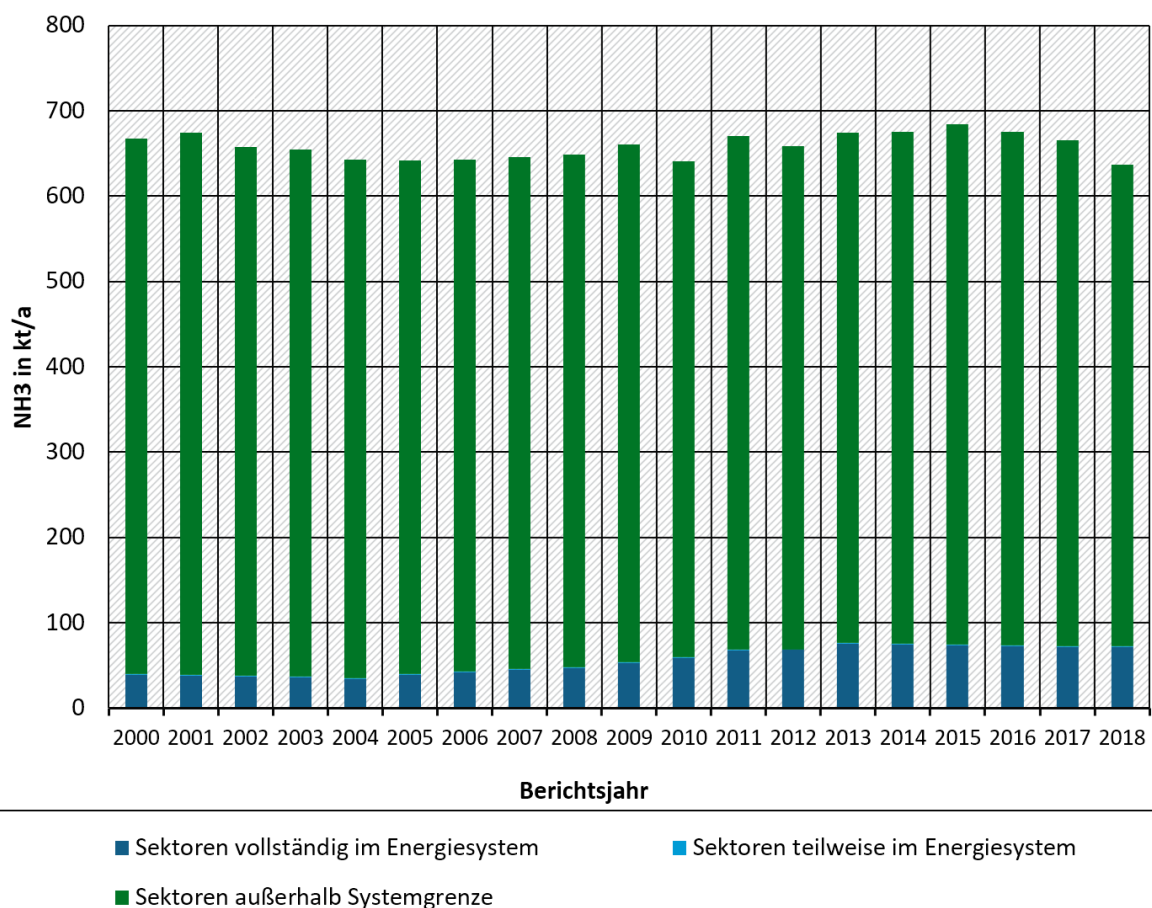
Die Bundesrepublik Deutschland ist verpflichtet, die jährlichen durch menschliche Tätigkeiten verursachten Emissionen von NH_3 gegenüber dem Jahr 2005 ab dem Jahr 2020 um 5 % und ab dem Jahr 2030 um 29 % zu reduzieren.³⁷ Bis 2018 wurde nur eine Reduktion von 0,8% erreicht.

³⁷ 43. BImSchV (Verordnung über nationale Verpflichtungen zur Reduktion der Emissionen bestimmter Luftschadstoffe), 18.07.2018

Im Zuge der Energiewende erfolgte eine Zunahme der Ammoniakemissionen aus der Vergärung von Biomasse. Der Anteil der Ammoniak-Emissionen aus dem Energiesystem ist jedoch im Vergleich zu den Gesamtemissionen klein. Da weiterhin zusätzliche Maßnahmen zur Minderung der Ammoniak-Emissionen angezeigt sind, kann die Umsetzung der Maßnahmen mit dem Indikator für das Energiesystem bewertet werden.

Die Auswirkungen der NH_3 -Emissionen betreffen das Schutzgut Menschen durch den Beitrag von NH_3 zur Feinstaubbelastung (über die Bildung von Sekundärpartikeln). Besonders hohe Ammoniakkonzentrationen können zu direkten Schäden an der Vegetation führen. Emissionen von NH_3 tragen neben NO_x zur Deposition eutrophierender Stoffe und zusammen mit SO_2 und NO_x zur Deposition versauernder Stoffe bei. Sie haben damit Auswirkungen auf die Schutzgüter Pflanzen, Tiere und biologische Vielfalt (z.B. Beeinträchtigung stickstoffempfindlicher Lebensraumtypen), Boden (z.B. durch Versauerung), Wasser (z.B. durch Eintrag von Ammoniak ins Grundwasser), Menschen (bei Nutzung von kontaminiertem Trinkwasser) sowie Kultur- und Sachgüter (durch saure Niederschläge).

Abbildung 29: Emissionen von Ammoniak (NH_3)



*inkl. NFR Code 3Da2c und 3I als 100% Sektoren

Quelle: NFR Tabellen DE_2020_Annex_I_2000 bis 2018

Tabelle 20: Emissionen von Ammoniak (NH₃), in kt/a

	Summe	Sektoren vollständig im Energiesystem	Sektoren teilweise im Energiesystem	Sektoren außerhalb Systemgrenze
2000	667,1	39,0	1,0	627,1
2001	674,0	37,8	1,1	635,1
2002	657,9	37,0	1,0	619,9
2003	654,1	35,5	1,0	617,6
2004	642,4	34,5	0,9	607,0
2005	641,4	39,1	1,0	601,4
2006	642,8	42,0	1,0	599,8
2007	645,9	45,2	0,8	599,9
2008	648,7	47,2	1,1	600,5
2009	660,2	52,4	1,0	606,8
2010	640,8	59,1	1,0	580,7
2011	670,3	67,9	1,0	601,4
2012	658,1	68,0	0,9	589,1
2013	674,0	75,2	0,9	597,9
2014	675,5	74,5	0,9	600,1
2015	684,2	73,5	0,9	609,8
2016	675,5	72,9	0,9	601,7
2017	665,7	71,9	0,9	592,9
2018	636,4	71,5	0,9	564,0

Quelle: NFR Tabellen DE_2020_Annex_I_2000 bis 2018 [UBA 2020]

Bewertung der Ergebnisse der Zeitreihe:

Die Summe der Emissionen seit dem Jahr 2000 ist leicht gesunken.

Der relative Beitrag aus den Sektoren, die vollständig oder teilweise der Energiewende zuzuschreiben sind nimmt zu.

Im Sinne des Indikators ist somit von einer zunehmenden Umweltbelastung auf die betroffenen Schutzgüter auszugehen.

Beurteilung des Indikators:

Der Indikator bildet die zu beschreibende Umweltauswirkung **in direkte Weise** ab.

Der Indikator umfasst **nahezu vollständig** die für den Wirkpfad definierten Systemgrenzen.

Die Qualität der für die Berechnung/ Ableitung herangezogenen Daten ist als **hoch** zu bewerten.

5.1.8 Indikator: Attributable Todesfälle durch Luftschadstoffe in Deutschland

5.1.8.1 Datengrundlage

Die Europäische Umweltagentur (European Environment Agency, EEA) ermittelt seit 2013 auf Grundlage von Messdaten zur Konzentration von NO₂, PM_{2,5} und Ozon Schätzwerte zu attributablen Todesfällen für 41 Ländern Europas [EEA, 2016, 2017, 2018 2019]. Diese werden aufgrund der bevölkerungsgewichteten Jahresmittelwerte der Schadstoffe mit Hilfe von Expositions-Reaktions-Funktionen errechnet.

5.1.8.2 Quantifizierung

Die Daten für den Indikator können direkt aus der Quelle entnommen werden. Eine weitere Berechnung ist nicht notwendig.

Die Schätzungen der EEA zur Zahl der attributablen Todesfälle durch Luftverschmutzung in den Mitgliedsländern der EU werden seit 2013 jährlich veröffentlicht. Sie stellen somit eine auf längere Sicht verfügbare, qualitätsgesicherte Quelle für den Indikator dar. Es fehlt allerdings der Bezug zu den Quellen, d.h. die attributablen Todesfälle durch Luftverschmutzung in Deutschland, die mit Emissionen von Luftschadstoffen aus dem Energiesystem in Deutschland in Verbindung stehen, lassen sich nicht ermitteln.

5.1.8.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Abbildung 30 und Tabelle 21 zusammengestellt. Die Kenngröße attributable Todesfälle durch PM_{2,5} beschreibt die Wirkung der primären Emissionen von PM_{2,5} sowie von Sekundärpartikeln, die durch Emissionen von SO₂, NO_x und NH₃ als Vorläufersubstanzen gebildet werden. Die Kenngröße attributable Todesfälle durch NO₂ beschreibt die Wirkung der Emissionen von NO_x; die Kenngröße attributable Todesfälle durch Ozon beschreibt ebenfalls überwiegend die Wirkung der Emissionen von NO_x. Immissionen in Deutschland resultieren auch aus Emissionen in anderen Ländern, ebenso wie die Emissionen aus Deutschland auch gesundheitliche Wirkungen in anderen Ländern zur Folge haben. Für eine Export/Import-Bilanz fehlen jedoch zuverlässige und regelmäßig aktualisierte Daten.

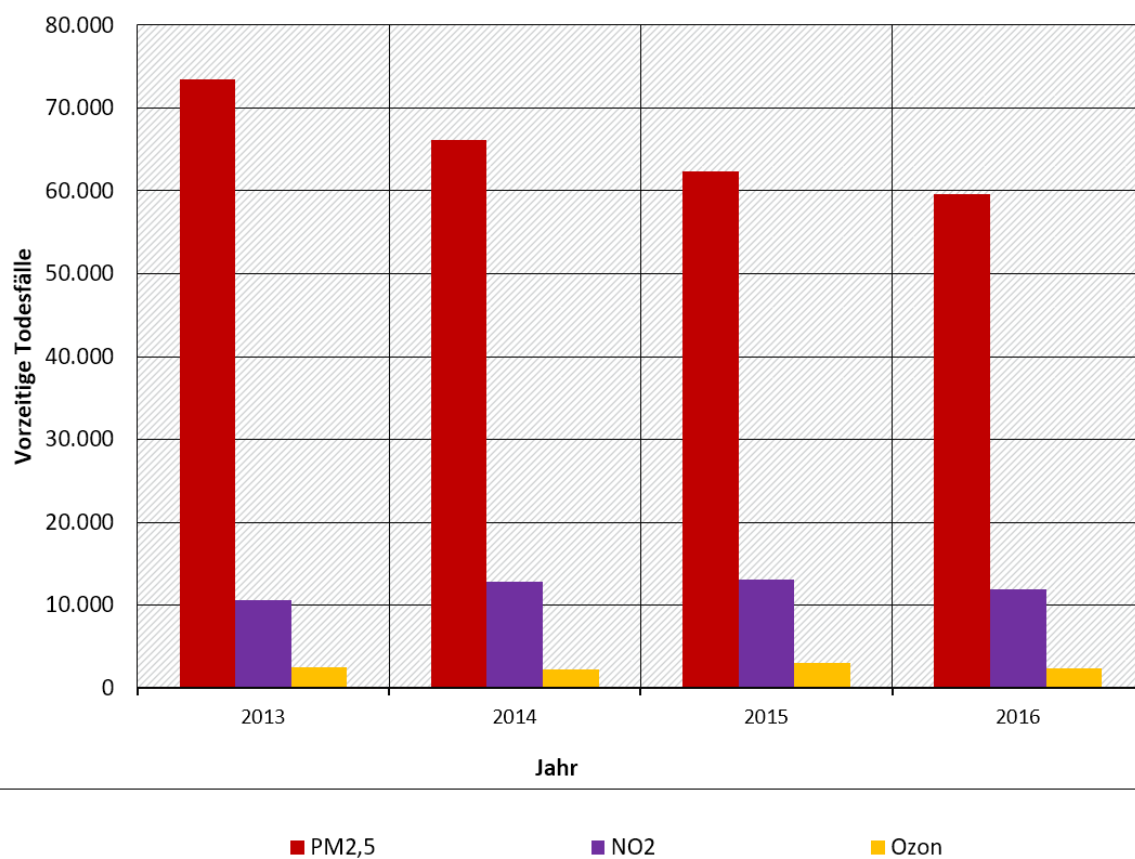
5.1.8.4 Beurteilung

Der Indikator ist zur Beurteilung der Wirkung der Emissionen der Luftschadstoffe auf das Schutzgut Menschen sehr relevant. Im Jahr 2016 starben in Deutschland 911.000 Menschen [Destatis 2017]. Nach Tabelle 21 stehen in diesem Jahr 59.600 Todesfälle mit PM_{2,5}, 11.900 Todesfälle mit NO₂ und 2.400 Todesfälle mit Ozon in Verbindung. Eine Addition der quantifizierten Gesundheitseffekte ist unzulässig, da z.B. bei NO₂ und PM_{2,5} eine Doppelzählung resultieren würde [EEA 2019].

Der Indikator ist geeignet zur Beurteilung der Wirkung der Emissionen der Luftschadstoffe auf das Schutzgut menschliche Gesundheit. Zwischen 2013 und 2016 gingen die Emissionen von NO_x um 9,2%, von SO_x um 14% und von PM_{2,5} um 7,7 % zurück (vgl. Tabelle 14, Tabelle 15 und Tabelle 16). Im gleichen Zeitraum reduzierte sich die Zahl der attributablen Todesfälle durch PM_{2,5} um 19%, wobei die ausgewiesene Reduktion nicht vollständig dem Systemraum der Energiewende zugerechnet werden darf.

Statt der Kenngröße *attributable Todesfälle* könnte alternativ hierfür auch die Kenngröße *verlorene Lebensjahre (YLL)* verwendet werden, die ebenfalls von der EEA errechnet wird. Die Werte für das Jahr 2016 betragen dafür 591.400 YLL (PM_{2,5}), 118.100 YLL (NO₂) und 24.400 YLL (O₃) [EEA, 2019].

Abbildung 30: Attributable Todesfälle durch Luftschadstoffe in Deutschland



Quelle: European Environment Agency, Air Quality in Europe [2016, 2017, 2018, 2019]

Tabelle 21: Attributable Todesfälle durch Luftschadstoffe in Deutschland

	PM2,5	NO ₂	Ozon
2013	73.400	10.610	2.500
2014	66.080	12.860	2.220
2015	62.300	13.100	3.000
2016	59.600	11.900	2.400

Quelle: European Environment Agency, Air Quality in Europe [2016, 2017, 2018, 2019]

Bewertung der Ergebnisse der Zeitreihe:

Die ausgewiesenen attributablen Todesfälle sinken.

Im Sinne des Indikators ist somit von einer abnehmenden Umweltbelastung auf die betroffenen Schutzgüter auszugehen.

Beurteilung des Indikators:

Der Indikator bildet die zu beschreibende Umweltauswirkung **in direkter Weise** ab.

Der Indikator beschreibt auch Wirkungen außerhalb der definierten Systemgrenzen.

Die Qualität der für die Berechnung/ Ableitung herangezogenen Daten kann nicht abschließend beurteilt werden.

5.2 Wirkungspfad Emissionen in Wasser und Boden

5.2.1 Indikator: Abwasser aus dem Energiesystem

5.2.1.1 Datengrundlage

Im betrachteten Systemraum sind amtliche und öffentlich zugängliche Daten zur Einleitung von Abwasser im Kohlenbergbau, Torfgewinnung, Gewinnung von Erdöl & Erdgas sowie aus dem Betrieb von Wärmekraftwerken für die Energieversorgung verfügbar. Die Einleitung von Abwasser aus dem Energiesystem kann auf Grundlage der Fachserie 19 Reihe 2.2 des Statistischen Bundesamtes (Destatis) quantifiziert werden [Statistisches Bundesamt, 2003, 2007, 2009, 2013, 2016, 2018]. Die Fachserie wurde bislang dreijährlich aktualisiert; die Berichtslegung erfolgt ca. 2 Jahre nach Ende des Berichtsjahres. Nach Mitteilung von Destatis³⁸ ist ab 2022 eine jährliche Publikation geplant. Die Daten sind zuverlässig verfügbar, damit ist der Indikator fortschreibefähig.

5.2.1.2 Quantifizierung

Der Indikator zur Abbildung direkter Emissionen durch Abwasser aus dem Energiesystem wurde direkt aus der Literatur übernommen (Fachserie 19 Reihe 2.2 des Statistischen Bundesamtes (Destatis)) und bedarf keiner weiteren Umrechnung. Der Indikator ist jedoch als Proxy-Indikator zu verstehen, da nur die Abwassermenge aber nicht die Abwasserbeschaffenheit bewertet werden kann. Er ist damit nur bedingt repräsentativ für die Umweltwirkungen.

Der Indikator zur Abbildung direkter Emissionen durch Abwasser aus dem Energiesystem nutzt eine öffentliche Quelle ohne weitere Anpassungen. Die Datenqualität ist daher für den Indikator als gut zu bewerten. Es ist jedoch anzumerken, dass der Indikator das eigentliche Umweltproblemfeld der Emissionen ins Wasser nicht adressiert, sondern die Abwassermengen als Proxy für die Emissionsfrachten verwendet (dem hier definierten Indikator liegt somit der Bewertungsansatz zu Grunde, dass ein höheres Abwasseraufkommen größere Umweltauswirkungen hervorruft als ein reduziertes Abwasseraufkommen). Alternativ wäre eine Ermittlung der Abwasserbeschaffenheit in der Theorie durch die Auswertung der länderspezifischen Einleiterkataster möglich, das scheitert aber in der Praxis an den Kriterien der Datenverfügbarkeit, Datenaktualität und Datenvergleichbarkeit.

5.2.1.3 Ergebnisse

Wie Abbildung 31 zeigt, hat die Abwassermenge aus dem Energiesystem seit dem Jahr 2001 um 53% abgenommen. Zum einen ist dies durch den Rückgang der Gewinnung fossiler Energieträger in Deutschland bedingt, zum anderen ist die Wasserentnahme zu Kühlzwecken durch Wärmekraftwerke rückläufig (vgl. Abbildung 36). Wie der Vergleich der Daten in Tabelle 22 und Tabelle 27 zeigt, wird eingeleitetes Kühlwasser von Destatis als Abwasser gewertet. Diese Einstufung ist sachgerecht, denn Kühlwasser enthält abgetötetes biogenes Material; bei Kreislaufkühlung zusätzlich Inhibitoren und Biozide, wie z.B. Chlor.

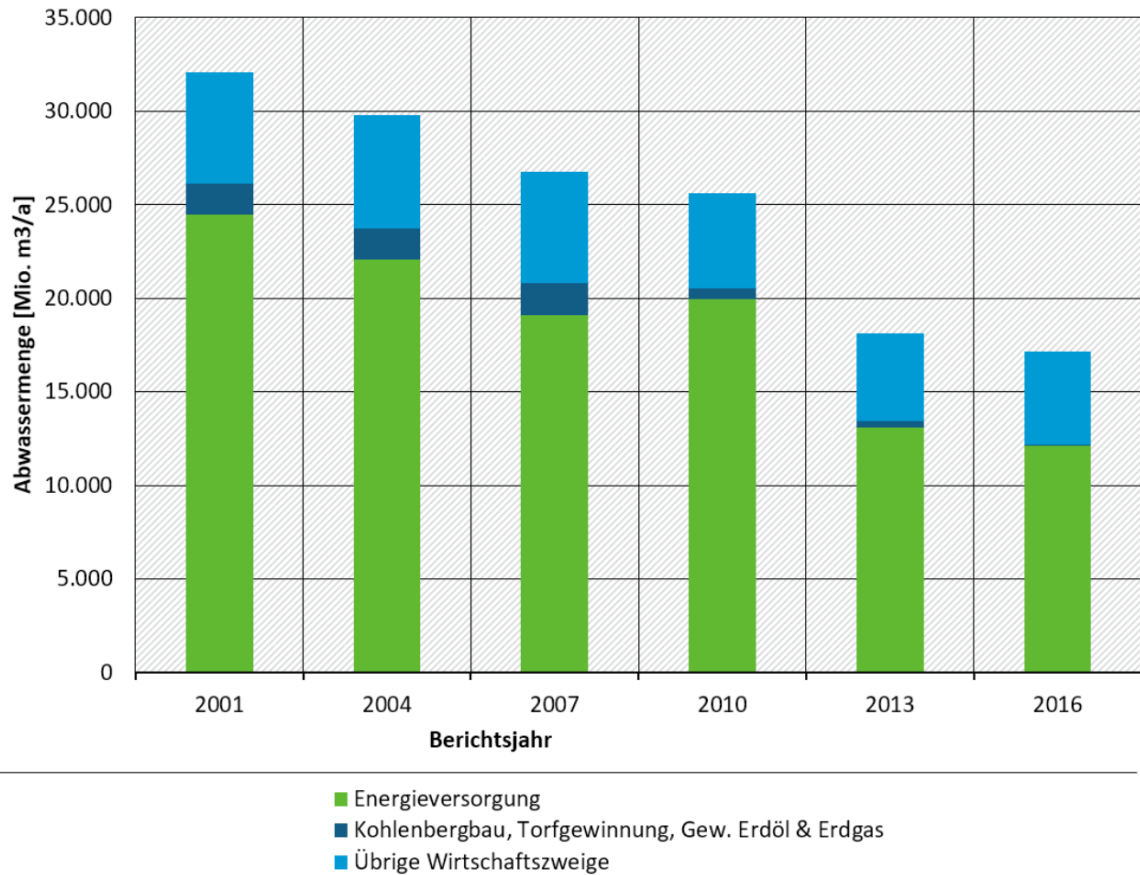
5.2.1.4 Beurteilung

Der Indikator bildet die Auswirkungen der Abwassereinleitung aus dem Energiesystem gut ab. Die ausgewertete Datengrundlage umfasst explizit alle Einleiter der Energiewirtschaft. Weitere potenzielle Einleiter sind im Systemraum nicht vorhanden.

³⁸ Telefonische Mitteilung (Kolvenbach/Destatis an Franke/ifeu), 13.03.2020

Die Veränderung auf das Schutzgut Wasser wird unmittelbar, auf das Schutzgut Pflanzen, Tiere und biologische Vielfalt mittelbar abgebildet. Der Rückgang ist positiv zu bewerten, weil dadurch die Belastung der aquatischen Lebensräume reduziert wird. Es ist zu erwarten, dass die Abwassereinleitung mit Fortschreiten der Energiewende weiter sinken wird, da der Betrieb von Wärmekraftwerken mit zunehmender Energiewende stark zurückgehen wird.

Abbildung 31: Emissionen von Abwasser aus dem Energiesystem Deutschlands



Quelle: Statistisches Bundesamt, 2003, 2007, 2009, 2013, 2016, 2018. Fachserie 19, Reihe 2.2

Tabelle 22: Emissionen von Abwasser aus der Energiewirtschaft Deutschlands, in Mio. m³/a

	Energieversorgung	Kohlenbergbau, Torfgewinnung, Gew. Erdöl & Erdgas	Übrige Wirtschaftszweige
2001	24.479	1.685	5.892
2004	22.048	1.682	6.045
2007	19.098	1.694	5.994
2010	19.953	601	5.068
2013	13.079	361	4.676
2016	12.133	37	4.998

Quelle: Statistisches Bundesamt, 2003, 2007, 2009, 2013, 2016, 2018. Fachserie 19, Reihe 2.2

Bewertung der Ergebnisse der Zeitreihe:

Die Summe der Emissionen geht seit dem Jahr 2000 stetig **zurück**.

Im Sinne des Indikators ist somit von einer abnehmenden Umweltbelastung auf die betroffenen Schutzgüter auszugehen.

Beurteilung des Indikators:

Der Indikator bildet die zu beschreibende Umweltauswirkung **nur als Proxy** ab, da nicht die Emissionskonzentrationen, sondern nur die Abwassermengen beschrieben werden.

Der Indikator umfasst **nur teilweise** die für den Wirkpfad definierten Systemgrenzen, da andere energiesystembedingte Emissionseinträge in Gewässer außerhalb der Kühl- und Abwassernutzung unberücksichtigt bleiben.

Die Qualität der für die Berechnung/ Ableitung herangezogenen Daten ist als **hoch** zu bewerten.

5.2.2 Indikator: Emissionen von eutrophierenden Stoffen aus dem Energiesystem in die Luft

5.2.2.1 Datengrundlage

Für das Eutrophierungspotenzial werden die N-Äquivalente aus den Emissionswerten für NO_x und NH₃ gebildet. Datengrundlage sind die detaillierten Inventartabellen im NFR-Format (Nomenclature for Reporting), Annex 1: National sector emissions: Main pollutants, particulate matter, heavy metals and persistent organic pollutants [UBA 2020]. Die amtlichen Daten sind öffentlich zugänglich, werden jährlich aktualisiert und stehen in der Regel nach ca. einem Jahr zur Verfügung.

5.2.2.2 Quantifizierung

Die Basis für die Berechnung bilden die Werte für die Emissionen von NO_x aus Tabelle 14 und für NH₃ aus Tabelle 20. Dabei wurden gerundete stöchiometrische Umrechnungsfaktoren verwendet (kg N / NO_x = 0,3; kg N / kg NH₃ = 0,82).

Für die Berechnung des vorgeschlagenen Indikators zur Abbildung der indirekten Einträge durch die Deposition von Luftschadstoffen wird auf das Zahlenmaterial zurückgegriffen, dass für die Indikatoren für den Wirkpfad der luftgetragenen Schadstoffe abgeleitet wird. Somit gelten die positiven Aussagen zur Datenqualität auch hier.

5.2.2.3 Ergebnisse

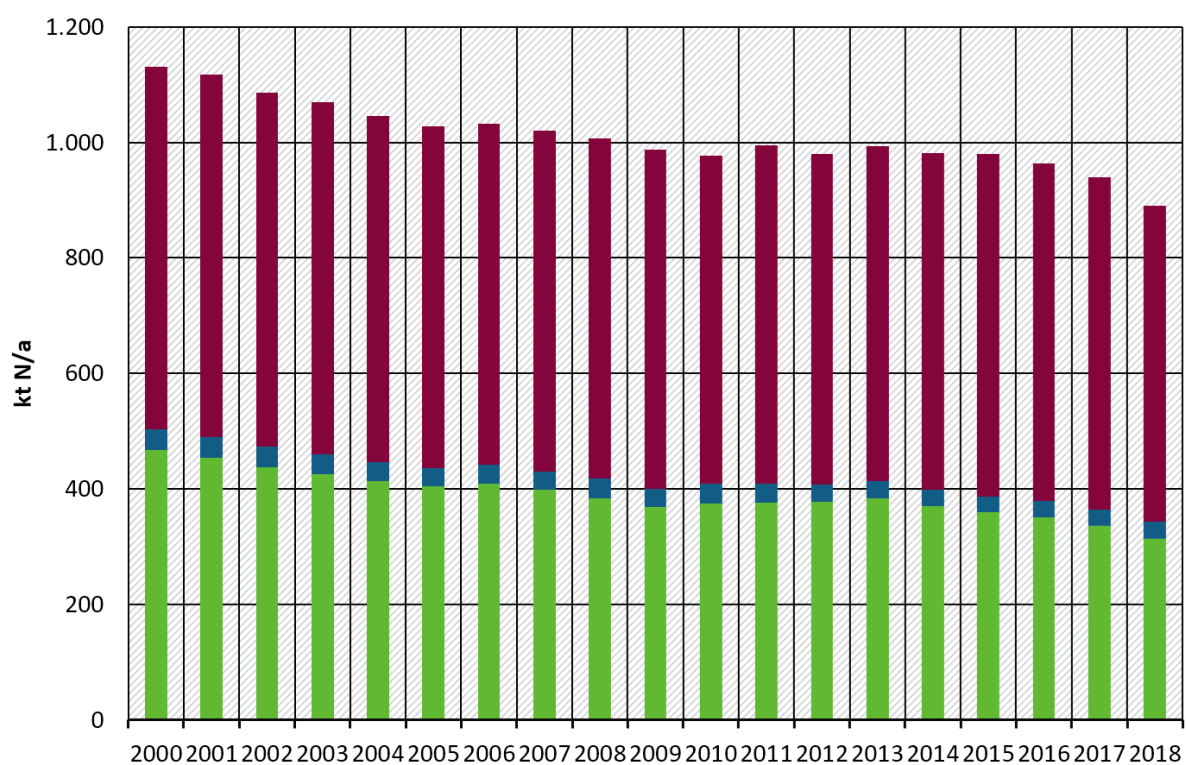
Die Ergebnisse sind in Abbildung 32 dargestellt. Die Emission eutrophierender Luftschadstoffe aus dem Energiesystem (Summe der Sektoren, die ganz oder teilweise dem Energiesystem zugeordnet werden) hat von 2000 bis 2018 um 32% abgenommen. Der Anteil des Energiesystems an den Gesamtemissionen eutrophierender Luftschadstoffe sank von 44% im Jahr 2000 auf 38% im Jahr 2018.

5.2.2.4 Beurteilung

Der Indikator kennzeichnet die Wirkung eutrophierender Stoffe auf stickstoffempfindliche Lebensraumtypen und ist damit relevant für das Schutzgut Pflanzen. Er illustriert zudem die direkten Wirkungen auf das Schutzgut Boden und indirekt die Wirkungen auf das Schutzgut Wasser (Eintrag von Stickstoff in Grundwasser) und das Schutzgut Menschen (bei Nutzung des Grundwassers als Trinkwasser).

Die Bewertbarkeit ist hingegen nur eingeschränkt möglich, ein direkter Vergleich mit den ausgewiesenen Vorbelastungsdaten bspw. zur Stickstoffdeposition und mit Critical Load Daten ist aufgrund der unterschiedlichen methodischen Ansätze maximal in eingeschränkter Weise möglich, da es sich bei den errechneten Werten um Depositionspotenziale handelt und keine Aussagen darüber getätigt werden können, ob und wo das Potenzial schlussendlich deponiert.

Abbildung 32: Emission eutrophierender Luftschadstoffe aus dem Energiesystem



■ Sektoren vollständig im Energiesystem
 ■ Sektoren teilweise im Energiesystem
■ Sektoren außerhalb Systemgrenze

Quelle: Berechnung ifeu [2020]

Tabelle 23: Emission eutrophierender Luftschadstoffe aus der Energiewirtschaft, in kt N/a

	Summe	Sektoren vollständig im Energiesystem	Sektoren teilweise im Energiesystem	Sektoren außerhalb Systemgrenze
2000	1.131	467	36	628
2001	1.118	454	36	628
2002	1.086	438	35	612
2003	1.069	425	35	609
2004	1.045	414	31	599
2005	1.028	404	31	593
2006	1.032	409	33	590
2007	1.019	399	31	589
2008	1.007	384	34	589
2009	987	369	32	586
2010	976	375	34	567
2011	995	377	32	587
2012	980	378	30	573
2013	994	384	29	580
2014	981	370	28	583
2015	979	359	28	592
2016	963	350	29	584
2017	940	335	29	576
2018	890	314	29	547

Quelle: [UBA 2020], Berechnung ifeu [2020]

Bewertung der Ergebnisse der Zeitreihe:

Die Summe der Emissionen geht seit dem Jahr 2000 leicht **zurück**.

Der relative Beitrag aus den Sektoren, die vollständig oder teilweise der Energiewende zuzuschreiben sind nimmt geringfügig ab.

Im Sinne des Indikators ist somit von einer abnehmenden Umweltbelastung auf die betroffenen Schutzgüter auszugehen.

Beurteilung des Indikators:

Der Indikator bildet die zu beschreibende Umweltauswirkung **indirekt** ab, da nur ein Depositionspotenzial nicht aber der reale Schadstoffeintrag in Böden beschreiben wird.

Der Indikator umfasst **nahezu vollständig** die für den Wirkpfad definierten Systemgrenzen.

Die Qualität der für die Berechnung/ Ableitung herangezogenen Daten ist als **hoch** zu bewerten.

5.2.3 Indikator: Emissionen von versauernden Stoffen aus dem Energiesystem in die Luft

5.2.3.1 Datengrundlage

Für das Versauerungspotenzial werden die eq-Werte aus den Emissionswerten für NO_x, NH₃ und SO₂ gebildet. Datengrundlage sind die detaillierten Inventartabellen im NFR-Format (Nomenclature for Reporting), Annex 1: National sector emissions: Main pollutants, particulate matter, heavy metals and persistent organic pollutants [UBA 2020]. Die amtlichen Daten sind öffentlich zugänglich, werden jährlich aktualisiert und stehen in der Regel nach ca. einem Jahr zur Verfügung.

5.2.3.2 Quantifizierung

Die Basis für die Berechnung bilden die Werte für die Emissionen von NO_x aus Tabelle 14, für SO₂ aus Tabelle 15 und für NH₃ aus Tabelle 20. Dabei wurden gerundete Umrechnungsfaktoren verwendet (18,75 eq / kg NO_x; 51,25 eq / kg NH₃; 71,4 eq / kg SO₂).

Für die Berechnung des vorgeschlagenen Indikators zur Abbildung der indirekten Einträge durch die Deposition von Luftschadstoffen wird auf das Zahlenmaterial zurückgegriffen, dass für die Indikatoren für den Wirkpfad der luftgetragenen Schadstoffe abgeleitet wird. Somit gelten die positiven Aussagen zur Datenqualität auch hier.

5.2.3.3 Ergebnisse

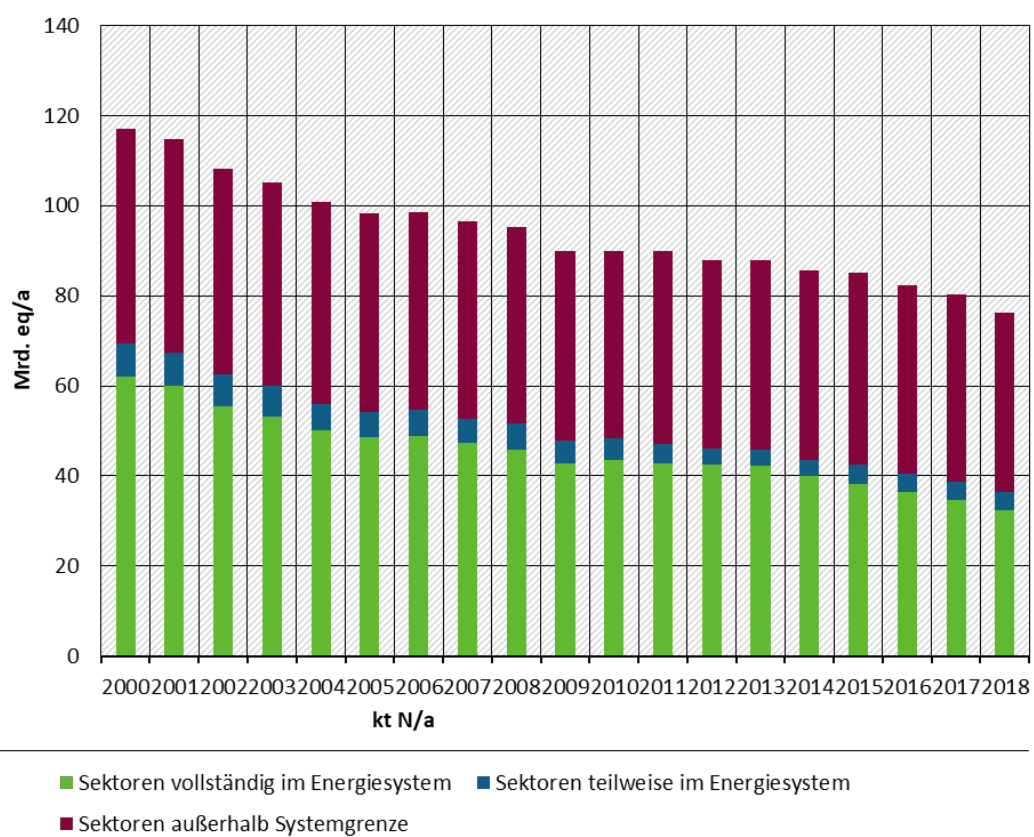
Die Ergebnisse sind in Abbildung 33 dargestellt. Die Emission versauernder Luftschadstoffe aus dem Energiesystem (Summe der Sektoren, die ganz oder teilweise dem Energiesystem zugeordnet werden) hat von 2000 bis 2018 um 47% abgenommen. Der Anteil des Energiesystems an den Gesamtemissionen versauernder Luftschadstoffe sank von 59% im Jahr 2000 auf 48% im Jahr 2018.

5.2.3.4 Beurteilung

Der Indikator kennzeichnet die Wirkung versauernder Stoffe auf säureempfindliche Lebensraumtypen und ist damit relevant für das Schutzgut Pflanzen. Er illustriert zudem die direkten Wirkungen auf das Schutzgut Boden und indirekt die Wirkungen auf das Schutzgut Wasser (z.B. Freisetzung von Aluminium aus dem Boden ins Grundwasser) und das Schutzgut Menschen (bei Nutzung des Grundwassers als Trinkwasser). Da versauernde Luftschadstoffe schädliche Wirkungen auf Gebäude haben, ist auch das Schutzgut Kultur- und Sachgüter betroffen.

Die Bewertbarkeit ist hingegen nur eingeschränkt möglich, ein direkter Vergleich mit den ausgewiesenen Vorbelastungsdaten bspw. zur Stickstoffdeposition und mit Critical Load Daten ist aufgrund der unterschiedlichen methodischen Ansätze maximal in eingeschränkter Weise möglich, da es sich bei den errechneten Werten um Depositionspotenziale handelt und keine Aussagen darüber getätigt werden können, ob und wo das Potenzial schlussendlich deponiert.

Abbildung 33: Emission versauernder Luftschadstoffe aus der Energiewirtschaft



Quelle: Berechnung ifeu [2020]

Tabelle 24: Emission versauernder Luftschadstoffe aus der Energiewirtschaft, in Mrd. eq/a

	Summe	Sektoren vollständig im Energiesystem	Sektoren teilweise im Energiesystem	Sektoren außerhalb Systemgrenze
2000	117,1	61,9	7,4	47,8
2001	114,8	60,0	7,4	47,3
2002	108,3	55,5	7,1	45,7
2003	105,3	53,2	6,7	45,3
2004	100,8	50,1	5,9	44,8
2005	98,3	48,6	5,6	44,1
2006	98,5	48,9	5,8	43,9
2007	96,5	47,3	5,3	43,9
2008	95,3	45,7	6,1	43,6
2009	89,9	42,9	5,0	42,0
2010	89,9	43,5	5,0	41,5
2011	90,0	42,8	4,4	42,8
2012	87,8	42,5	3,7	41,6
2013	87,8	42,3	3,5	42,0
2014	85,5	40,0	3,5	42,1
2015	85,2	38,3	4,2	42,7
2016	82,4	36,3	4,1	42,0
2017	80,3	34,6	4,0	41,7
2018	76,3	32,5	4,0	39,8

Quelle: UBA 2020, Berechnung ifeu [2020]

Bewertung der Ergebnisse der Zeitreihe:

Die Summe der Emissionen geht seit dem Jahr 2000 **zurück**.

Der relative Beitrag aus den Sektoren, die vollständig oder teilweise der Energiewende zuzuschreiben sind nimmt ab.

Im Sinne des Indikators ist somit von einer abnehmenden Umweltbelastung auf die betroffenen Schutzgüter auszugehen.

Beurteilung des Indikators:

Der Indikator bildet die zu beschreibende Umweltauswirkung **indirekt** ab, da nur ein Depositionspotenzial nicht aber der reale Schadstoffeintrag in Böden beschreiben wird.

Der Indikator umfasst **nahezu vollständig** die für den Wirkpfad definierten Systemgrenzen.

Die Qualität der für die Berechnung/ Ableitung herangezogenen Daten ist als **hoch** zu bewerten.

5.2.4 Indikator: Stickstoffüberschuss auf Anbauflächen von Energiepflanzen

5.2.4.1 Datengrundlage

Für den Indikator liegen teilweise öffentlich zugängliche und regelmäßig aktualisierte Daten vor. Dabei wurden die folgenden Datenquellen verwendet:

- ▶ Landwirtschaftliche Nutzfläche in Deutschland [Statista 2020], wobei Daten für fehlende Jahre zwischen Stützjahren interpoliert wurden. Die Alternative, Primärdaten des Statistisches Bundesamtes zu nutzen, war aufgrund geänderter Systematik der Darstellung der Flächendaten nicht mit vertretbarem Aufwand zu bewerkstelligen. Die Datengrundlage ist nicht öffentlich zugänglich
- ▶ Anbaufläche für Energiepflanzen in Deutschland der Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe [FNR 2020, Becker 2020]
- ▶ Berechneter mittlerer Stickstoffüberschuss der Landwirtschaft in Deutschland [Häußermann et al. 2019]

Der vorgeschlagene Indikator zur Abbildung des Stickstoffüberschusses in Böden durch den Anbau von Energiepflanzen skaliert die Datenquelle mit Hilfe der statistischen Daten auf die Anbauflächen von Energiepflanzen – bleibt dabei aber auf den deutschen Raum beschränkt, eine Integration der außerdeutschen Umweltlasten ist nicht möglich (entsprechend dem Modellvorschlag in Kapitel 3.3.1 ist das aber auch nicht zwingend geboten).

5.2.4.2 Quantifizierung

Für den Stickstoffüberschuss in Böden wird die Anbaufläche für Energiepflanzen in Deutschland [FNR 2020] mit dem flächengemittelten N-Überschuss 77,4 kg N/ha LF multipliziert, der sich aus der Stickstoff-Flächenbilanz für Deutschland für das Mittel der Jahre 2015 bis 2017 ergibt [Häußermann et al. 2019]. Zum Vergleich wird der Stickstoffüberschuss aus der restlichen Landwirtschaft in gleicher Weise berechnet. Durch Subtraktion der gesamten landwirtschaftlichen Fläche [Statista 2020] mit der Anbaufläche für Energiepflanzen in Deutschland ergibt sich die Fläche der restlichen Landwirtschaft. Der Wert für den Stickstoffüberschuss liegt nicht für alle betrachteten Jahre vor; Die Ergebnisse sind aufgrund der Verwendung von Mittelwerten und Stützjahren mit Unsicherheiten behaftet. Die Datengrundlage für die Ableitung des vorgeschlagenen Indikators zur Abbildung des Stickstoffüberschusses in Böden durch den Anbau von Energiepflanzen kann als valide bewertet werden und ist hinreichend fortschreibefähig, da die Zahlen der FNR jährlich erhoben und publiziert werden. Es bleibt die Restunsicherheit, dass nicht zwischen den verschiedenen Anbaubiomassen unterschieden wird, ein potenzieller Fruchtwechsel (bspw. von Mais auf Rübe o.Ä.) führt demnach nur dann zu einer Änderung, wenn der Fruchtwechsel Auswirkungen auf die für den Energiepflanzenanbau benötigte Fläche hat.

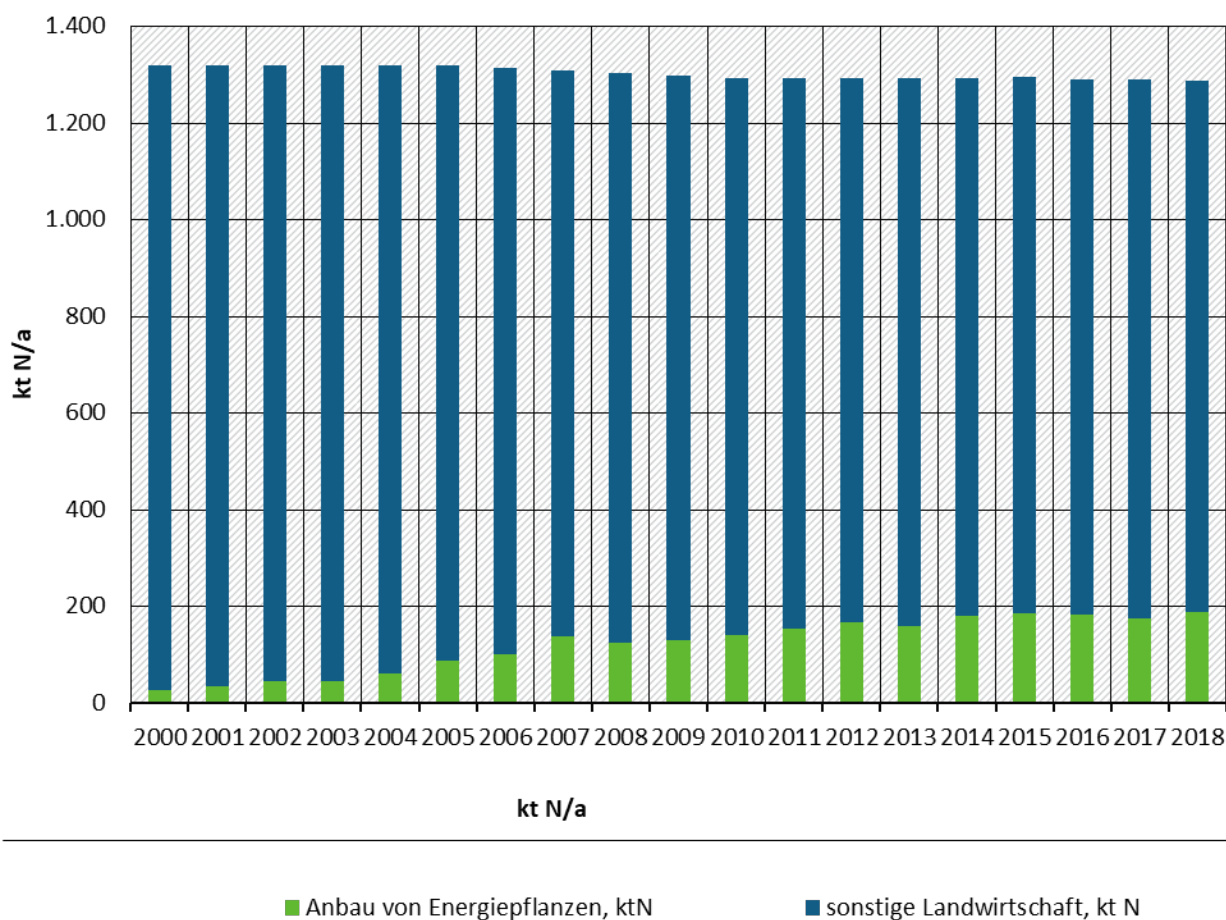
5.2.4.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Abbildung 34 dargestellt. Die Zahlenwerte finden sich in Tabelle 25. Von 2000 bis 2018 nahm die Anbaufläche von Energiepflanzen in Deutschland um den Faktor 6,6 von 3.594 km² auf 23.710 km² zu. Die landwirtschaftliche Nutzfläche ging im gleichen Zeitraum von um 4.219 km² zurück. Unter der Annahme eines konstanten Stickstoffüberschusses pro ha und Jahr war der Anbau von Energiepflanzen im Jahr 2018 für den Überschuss von 185 kt N verantwortlich; das entspricht ca. 17% des gesamten Stickstoffüberschusses der Landwirtschaft in Deutschland.

5.2.4.4 Beurteilung

Der Stickstoffüberschuss der Landwirtschaft in Deutschland ist problematisch, da dadurch Nitrat ins Grundwasser gelangt. Er ist bedeutsam für die Schutzgüter Pflanzen, Tiere und biologische Vielfalt, das Schutzgut Boden und Wasser sowie indirekt für das Schutzgut Menschen bei Nutzung des Grundwassers als Trinkwasser. Aufschlussreich ist der Vergleich mit dem Indikator Eutrophierungspotential, der zeigt, dass das Energiesystem im Jahr 2018 343 kt N in die Luft einträgt. Von dieser Menge wird nur ein Teil in Deutschland in den Boden eingetragen. Unter der Annahme, dass 50% des Eutrophierungspotenzials als Deposition in Deutschland wirksam werden, ist die Stickstoffdeposition aus dem Energiesystem durch Emissionen in die Luft ähnlich hoch wie der Stickstoffeintrag in Böden durch den Anbau von Energiepflanzen.

Abbildung 34: Stickstoffüberschuss auf Anbauflächen von Energiepflanzen



Quelle: Statista [2020], FNR [2020], Becker [2020], Häußermann et al. [2019]

Tabelle 25: Stickstoffüberschuss auf Anbauflächen von Energiepflanzen

	Anbau von Energiepflanzen, km ²	Sonstige landwirtsch. Nutzfläche, km ²	Anbau von Energiepflanzen, ktN	sonstige Landwirtschaft, kt N
2000	3.594	167.076	28	1.293
2001	4.405	166.201	34	1.286
2002	5.814	164.728	45	1.275
2003	5.888	164.590	46	1.274
2004	7.800	162.614	60	1.259
2005	11.286	159.064	87	1.231
2006	12.950	156.738	100	1.213
2007	17.710	151.316	137	1.171
2008	16.040	152.324	124	1.179
2009	17.015	150.687	132	1.166
2010	18.340	148.700	142	1.151
2011	20.060	147.033	155	1.138
2012	21.600	145.547	167	1.127
2013	20.600	146.600	159	1.135
2014	23.500	143.754	182	1.113
2015	23.900	143.407	185	1.110
2016	23.800	142.789	184	1.105
2017	22.800	144.073	176	1.115
2018	24.260	142.191	188	1.101

Quelle: Statista [2020], FNR [2020], Becker [2020], Häußermann et al. [2019]

Bewertung der Ergebnisse der Zeitreihe:

Die Summe der Emissionen bleibt seit dem Jahr 2000 nahezu **konstant**.

Im Sinne des Indikators ist somit von einer zunehmenden Umweltbelastung auf die betroffenen Schutzgüter auszugehen.

Beurteilung des Indikators:

Der Indikator bildet die zu beschreibende Umweltauswirkung **direkt** ab.

Der Indikator umfasst **nahezu vollständig** die für den Wirkpfad definierten Systemgrenzen.

Die Qualität der für die Berechnung/ Ableitung herangezogenen Daten ist als **akzeptabel** zu bewerten, da die Ergebnisse durch Verwendung von Mittelwerten und Stützjahren mit Unsicherheiten behaftet sind.

5.3 Wirkungspfad Geräusch, Licht- und Wärmeemissionen

5.3.1 Indikator: Lärmbelastungspotenzialflächen

5.3.1.1 Datengrundlage

Die Lärmbelastungspotenzialflächen wurden für drei Anlagen zur Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie errechnet: Windenergieanlagen, Kraftwerke (größer 800 MW) und Photovoltaik-Anlagen. Daten zur Leistung konventioneller Kraftwerke wurden [BMWi 2020], Daten zu WEA (Onshore) und PV [BMWi 2020b] entnommen. Die Leistungsdaten sind jährlich aktualisiert verfügbar.

Der Expertenschätzung von Hintzsche [2019] folgend wurden folgende Schallleistungspegel definiert: 100 dB für durchschnittliche Windenergieanlagen im Jahr 2000 (650 kW); 103 dB für durchschnittliche Windenergieanlagen im Jahr 2018 (1,8 MW); 120 dB für Kraftwerke (größer 800 MW) und 70 dB für Photovoltaik-Wechselrichter. Für die Jahre zwischen 2000 und 2018 wurden die Schallleistungspegel für Windenergieanlagen linear zwischen den o.g. Werten interpoliert.

Aus den angegebenen Quellen lassen sich Schallemissionsfaktoren sowie die maximalen Flächen je MW installierter Leistung mit Überschreitung ausgewählter Schwellen errechnen. Als Schwelle wurde der Grenzwert für allgemeine Wohngebiete von 40 dB(A) angesetzt.

5.3.1.2 Quantifizierung

Für die Schallausbreitung wird das Model der geometrischen Pegelabnahme entsprechend Nr. A.2.4 der TA Lärm verwendet. Lokal wirkende meteorologische und topographische Faktoren der Schallausbreitung bleiben ebenso wie schalltechnische Maßnahmen an den Anlagen unberücksichtigt. Somit errechnen sich die folgenden „Schallemissionsfaktoren“ als lärmbelastete Fläche oberhalb von 40 dB(A) nachts pro MW installierter Leistung:

- ▶ WEA 2000: 0,766 km²/MW
- ▶ WEA 2018: 0,552 km²/MW ³⁹
- ▶ Kraftwerke: 0,062 km²/MW ⁴⁰
- ▶ PV: 0,100 km²/MW

Durch Multiplikation der Werte der installierten Leistung mit den Schallemissionsfaktoren ergeben sich Lärmbelastungspotenzialflächen. Da keine lokale Verortung der Geräuschquellen vorgenommen wird, können auch keine Überlagerungseffekte bei den errechneten Flächen abgebildet werden. Es handelt sich somit um theoretische Lärmbelastungspotenzialflächen.

Wesentlich für die Ableitung des Geräuschindikators ist die Festlegung der Schallleistungspegel. Diese Festlegung ist mit Unsicherheiten behaftet und erfolgt zudem - wie beschreiben - auch nur

³⁹ Für den 140 MW Windpark Hohenseefeld II wurde im Schallgutachten [Notus 2018] die Fläche >40 dB(A) mit ca. 30 km² bestimmt; mit dem Schallemissionsfaktor errechnet sich eine Fläche von ca. 63 km².

⁴⁰ Für das 800 MWe Kohlekraftwerk der ONYX Power in Wilhelmshaven ergibt sich eine etwa 50 km² große Potenzialfläche; bis in 4.000 m Entfernung müssten somit >40 dB(A) erreicht werden. Nach der Geräuschprognose [TÜV Nord 2007] liegt der Beurteilungspegel am nächstgelegenen Wohnhaus in 1.500 m Entfernung jedoch bei 26 dB(A). Die Wirksamkeit der Schallschutzmaßnahmen ist evident, der Schallemissionsfaktoren für Kraftwerke ist hier deutlich zu groß.

für eine begrenzte Auswahl an bestimmte Anlagentypen und Größen innerhalb des Systemraums.

5.3.1.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Abbildung 35 dargestellt; die Zahlenwerte finden sich in Tabelle 26. Die errechneten Flächen haben von 2000 bis 2018 um den Faktor 3,2 zugenommen; dabei entfallen auf WEA im Jahr 2018 ca. 74%, auf konventionelle Kraftwerke 15% und auf PV-Anlagen 11%. Mit 39.400 km² wären ca. 11% der Fläche Deutschlands von Lärm aus Kraftwerken, WEA und PV-Wechselrichter betroffen.

5.3.1.4 Beurteilung

Die Wirkung von Lärm ist primär für das Schutzgut Menschen relevant. Weiterhin sind manche Tiere nachteilig von Geräuschen beeinträchtigt.

Das Ergebnis der Berechnungen für den Indikator überrascht. Zur Einordnung der Ergebnisse wurden die von Geräuschemissionen betroffenen Flächen an Straßen in Deutschland nach der DIN-Norm *Schallschutz im Städtebau* [DIN, 2002] ermittelt. Dieser Berechnung liegt ein anderes Verfahren zugrunde: In der Norm werden Abstände von Verkehrswegen zur Gewährleistung eines Beurteilungspegels von 40 dB(A) nachts genannt.⁴¹ Durch Multiplikation mit der Länge des Netzes⁴² können Potenzialflächen durch Verkehrslärm errechnet werden. Demnach wären 257.000 km² bzw. 72% der Fläche Deutschlands als Lärmbelastungspotentialflächen durch den Straßenverkehr einzustufen.

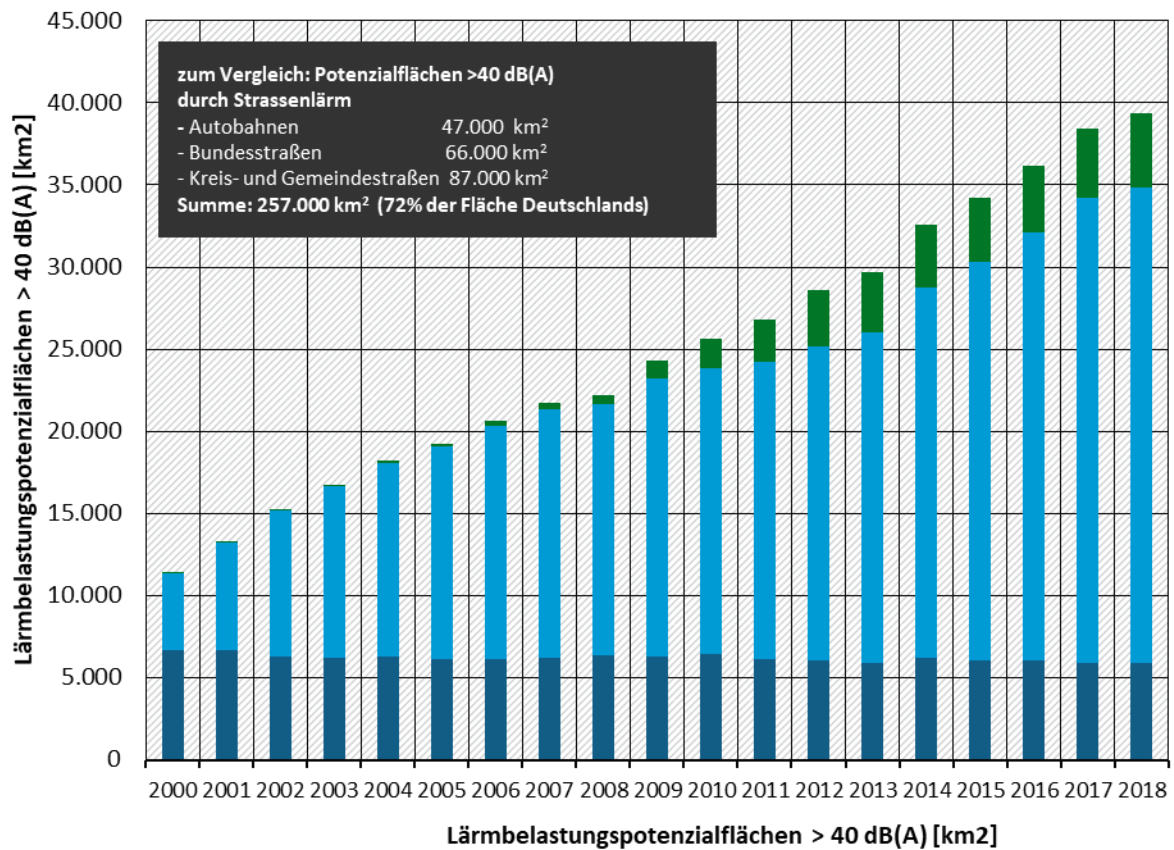
In beiden Fällen (Energiesystem und Straßenverkehr) erscheinen die Ergebnisse äußerst konservativ. Für eine realitätsnähere Berechnung kann jedoch kein praktikables Verfahren vorgeschlagen werden.

Bei der Beurteilung der Ergebnisse muss zudem berücksichtigt werden, dass die die Ergebnisse keine Aussagen zum Thema der tieffrequenten Geräusche, bspw. durch Windenergieanlagen generieren. Zudem wird nur eine Auswahl möglicher Anlagen zur Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie bewertet und hier auch nur der Betrieb und nicht Umweltauswirkungen der Errichtung.

⁴¹ 1.800 m bei Autobahnen, 800 m bei Bundesstraßen, 330 m bei Landesstraßen, 90 m bei Kreis- und Gemeindestraßen, 1.200 m im Schienenfernverkehr, 850 im Schienennachverkehr

⁴² 13.000 km Autobahn, 41.000 km Bundesstraßen, 87.000 km Landesstraßen; 91.000 km Kreisstraßen, 395.000 km Gemeindestraßen (Quelle: <http://www.strassederarbeit.de/strassennetz-in-deutschland/>)

Abbildung 35: Lärmbelastungspotenzialflächen >40 dB(A) nachts durch das Energiesystem



■ Konventionelle Kraftwerke ■ Windenergieanlagen ■ PV-Anlagen

Quelle: Berechnung ifeu [2020]

Tabelle 26: Lärmbelastungspotenzialflächen >40 dB(A) nachts durch das Energiesystem, in km²

	Konventionelle Kraftwerke	Windenergieanlagen	PV-Anlagen	Summe
2000	6.691	4.670	11	11.372
2001	6.647	6.589	18	13.254
2002	6.280	8.889	29	15.198
2003	6.185	10.503	43	16.731
2004	6.282	11.796	110	18.189
2005	6.151	12.893	205	19.249
2006	6.125	14.222	289	20.636
2007	6.214	15.100	415	21.729
2008	6.330	15.292	609	22.231
2009	6.304	16.933	1.052	24.289
2010	6.470	17.356	1.793	25.620
2011	6.100	18.118	2.581	26.799
2012	6.056	19.142	3.393	28.591
2013	5.889	20.157	3.656	29.701
2014	6.234	22.553	3.774	32.561
2015	6.075	24.266	3.906	34.247
2016	6.056	26.070	4.051	36.176
2017	5.913	28.289	4.212	38.413
2018	5.913	28.947	4.499	39.359

Quelle: Berechnung ifeu [2020]

Bewertung der Ergebnisse der Zeitreihe:

Die Summe der Emissionen nimmt seit dem Jahr 2000 stark zu.

Im Sinne des Indikators ist somit von einer zunehmenden Umweltbelastung auf die betroffenen Schutzgüter auszugehen.

Beurteilung des Indikators:

Der Indikator bildet die zu beschreibende Umweltauswirkung nur **indirekt** in Form von Potenzialflächen ab.

Der Indikator umfasst **nur eine Auswahl** an Prozessen in den für den Wirkpfad definierten Systemgrenzen.

Die Qualität der für die Berechnung/ Ableitung herangezogenen Daten ist als **mäßig** zu bewerten, da die Datengrundlagen derzeit noch unvollständig sind und die Ableitung daher mit hohen methodischen Unsicherheiten behaftet ist.

5.3.2 Indikator: Entnahme von Kühlwasser durch das Energiesystem

5.3.2.1 Datengrundlage

Die Entnahme von Kühlwasser durch das Energiesystem und damit die Einleitung von Wärme in die Flüsse Deutschlands kann mit Daten aus der Fachserie 19 Reihe 2.2 des Statistischen Bundesamtes quantifiziert werden [Statistisches Bundesamt 2003, 2007, 2009, 2013, 2016, 2018]. Die Fachserie wurde bislang dreijährlich aktualisiert; die Berichtslegung erfolgt ca. 2 Jahre nach Ende des Berichtsjahres. Nach Mitteilung von Destatis⁴³ ist ab 2022 eine jährliche Publikation geplant.

5.3.2.2 Quantifizierung

Indikator zur Abbildung des Wärmeeintrags in Oberflächengewässer wird direkt aus der Literatur übernommen (Fachserie 19 Reihe 2.2 des Statistischen Bundesamtes (Destatis)) und bedarf keiner weiteren Umrechnung mehr.

In den Jahren 2001 und 2004 wurde in der Fachserie die Werte in Tabelle 4.1 Spalten 3 und 5 für "Wassermenge, die erforderlich wäre, wenn für die einzelnen Nutzungen jeweils Frischwasser eingesetzt würde" durch den "Nutzungsfaktor" in Spalte 9 dividiert. Ab dem Jahr 2007 wurden die tatsächlichen Kühlwassermengen berichtet (für 2007 in Tab. 5.1 Spalten 3, 6 und 9; ab 2010 in Tab. 4.2, Spalte 6.-

Der Indikator zur Abbildung des Wärmeeintrags in Oberflächengewässer nutzt eine öffentliche Quelle ohne weitere Anpassungen. Die Datenqualität ist daher für den Indikator als gut zu bewerten. Es ist jedoch anzumerken, dass der Indikator das eigentliche Umweltproblemfeld der Wärmeeinträge nicht adressiert, sondern die Kühlwassermengen als Proxy für die Wärmefrachten verwendet (dem hier definierten Indikator liegt somit der Bewertungsansatz zu Grunde, dass eine größere Kühlwassereinleitung größere Umweltauswirkungen hervorruft als eine reduzierte Kühlwassereinleitung). Im Zuge der Bewertung der Darstellung der Indikatoren empfiehlt es sich, ergänzende Aspekte zur Situation der Fließgewässer in Deutschland wie bspw. Wasserstände, allg. Wassertemperatur etc. mit zu berücksichtigen.

5.3.2.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Abbildung 36 dargestellt; die Zahlenwerte finden sich in Tabelle 27 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..** Die Entnahme von Kühlwasser hat von 2001 bis 2016 um 41% abgenommen. Es ist davon auszugehen, dass die Abschaltung von acht Kernkraftwerken mit einer Kapazität von 8,4 GW die maßgebliche Ursache darstellt.

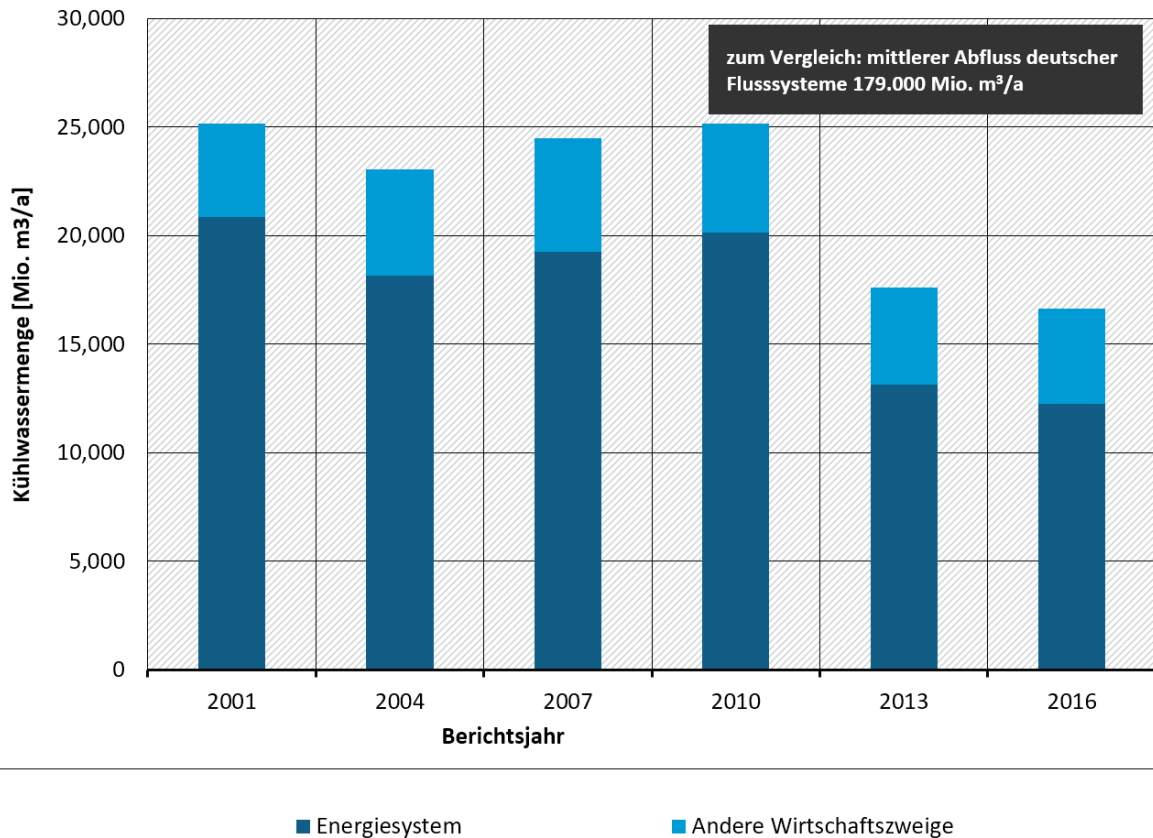
5.3.2.4 Beurteilung

Die maximal zulässige Aufwärmung wird standortspezifisch festgelegt; bei Block 9 des Großkraftwerks Mannheim beträgt diese z.B. 10 K (RP Karlsruhe 2009). Der Eintrag von Wärme in Flusssysteme verringert den Sauerstoffgehalt der Gewässer und beeinflusst erheblich die aquatische Flora und Fauna. Weiterhin hat die Entnahme von Kühlwasser zum Teil erhebliche Auswirkungen auf alle Wasserlebewesen, wenn diese mit dem Entnahmebauwerk kollidieren oder mit dem Kühlwasser das Kraftwerk durchlaufen. Der Indikator bildet die Auswirkungen durch die Kühlwasserentnahme aus dem Energiesystem gut ab. Die Wirkungen der Einleitungen von abgetöteten Pflanzen, Tieren und Bioziden sind mit dem Indikator *Abwasser aus dem Energiesystem* (Abschnitt 5.2.1) abgebildet.

⁴³ Telefonische Mitteilung (Kolvenbach/Destatis an Franke/ifeu), 13.03.2020

Zur Bewertung der Mengen ist ein Vergleich mit dem mittleren Abfluss der deutschen Flüsse (Rhein, Donau, Elbe, Oder, Weser und Ems)⁴⁴ mit ca. 178 Mio. m³/a sinnvoll. Der Anteil der Kühlwasserentnahme am langjährigen mittleren Abfluss der Flüsse Deutschlands sank von 12% im Jahr 2001 auf 6,9% im Jahr 2016.

Abbildung 36: Entnahme von Kühlwasser zur Energieversorgung



Quelle: Statistisches Bundesamt, 2003, 2006, 2009, 2013, 2016, 2019. Fachserie 19, Reihe 2.2

⁴⁴ Abgeleitet aus Daten in <https://de.wikipedia.org/wiki/Rhein>; <https://de.wikipedia.org/wiki/Elbe>; <https://de.wikipedia.org/wiki/Donau>; <https://de.wikipedia.org/wiki/Weser>; <https://de.wikipedia.org/wiki/Ems>

Tabelle 27: Entnahme von Kühlwasser zur Energieversorgung, in Mrd. m³/a

	Energiesystem	Andere Wirtschaftszweige
2001	20.869	4.298
2004	18.158	4.872
2007	19.247	5.219
2010	20.145	5.031
2013	13.148	4.450
2016	12.259	4.379

Quelle: Statistisches Bundesamt, 2003, 2007, 2009, 2013, 2016, 2018. Fachserie 19, Reihe 2.2

Bewertung der Ergebnisse der Zeitreihe:

Die Summe der Emissionen geht seit dem Jahr 2001 stetig **zurück**.

Der relative Beitrag der Emissionen aus dem Energiesystem nimmt ab.

Im Sinne des Indikators ist somit von einer abnehmenden Umweltbelastung auf die betroffenen Schutzgüter auszugehen.

Beurteilung des Indikators:

Der Indikator bildet die zu beschreibende Umweltauswirkung **nur als Proxy** ab, da nicht die Emissionskonzentrationen, sondern nur die Abwassermengen beschreiben werden.

Der Indikator umfasst **nur teilweise** die für den Wirkpfad definierten Systemgrenzen, da andere energiesystembedingte Wärmeemissionseinträge in Gewässer außerhalb der Kühlwassernutzung unberücksichtigt bleiben.

Die Qualität der für die Berechnung/ Ableitung herangezogenen Daten ist als **hoch** zu bewerten.

5.4 Wirkungspfad Flächeninanspruchnahme

5.4.1 Indikator: Temporäre Flächenbelegung durch das Energiesystem

5.4.1.1 Datengrundlage

Für den Indikator wurden die im Rahmen des UFO-Plan-Vorhabens „Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen“ (FKZ 3717 31 105 0) für das Jahr 2017 erhobenen Daten verwendet. Diese werden im Laufe des Jahres 2021 veröffentlicht. Daten zu Flächen mit Energiepflanzenanbau werden jährlich von der Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe aktualisiert und sind öffentlich verfügbar [FNR 2020].

5.4.1.2 Quantifizierung

Für die beiden Indikatoren temporäre Flächenbelegung (in ha) und charakterisiert anhand der Hemerobie (in ha aF-Äq.) liegen die entsprechend benötigten Faktoren für die im Rahmen der Systembetrachtung relevanten Energieträger vor. Sie wurden im Rahmen des Projekts „Flächenrucksack“ ausgearbeitet (ifeu/Integrall o.J.). Dadurch sind diese Indikatoren für das Energiesystem grundsätzlich quantifizierbar und auch als Zeitreihe abbildbar.

Bezüglich der Zeitreihenbildung ist zu beachten, dass sich einige der spezifischen Belegungsfaktoren über die Zeit nur wenig verändern (v.a. Abbau fossiler Rohstoffe, Kraftwerksanlagen), während andere Energieträger die Fortschreibung mit einem höheren Grad an Differenzierung erfordern. Zum Beispiel ist bei Biogas der Mix an Substraten relevant. Eine Verschiebung zwischen den Anteilen an nachwachsenden Rohstoffen und Abfällen bzw. Reststoffen schlägt sich auf die in Tabelle 10 und Tabelle 11 aufgeführten Belegungsfaktoren nieder. Hier sind im Falle der Fortschreibung geeignetere Quellen zu Grunde zu legen (z. B. Monitoring zur Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland durch das DBFZ (Daniel-Gromke et al. 2017)). Auch für Freiland-PV-Anlagen und Windenergieanlagen verändern sich die spezifischen Flächenbelegungen mit der dynamischen Entwicklung der Wirkungsgrade.

Die vom Forschungsnehmer bereitgestellten Daten für die Flächenbelegung wurden wie folgt gruppiert: Waldflächen (Anbau feste Biobrennstoffe), Ackerflächen (Anbau NawaRo (z. B. Mais) für Biogas), sonstige erneuerbare Energieträger (PV-Anlagen, WEA), nicht-erneuerbare Energieträger und Netzinfrastruktur. Die Daten für die Zeitreihen wurden wie folgt ermittelt:

- Die Belegung von Ackerflächen für den Energiepflanzenanbau kann ohne weitere Umrechnung aus [FNR 2020 und Becker 2020] übernommen werden und entspricht damit der Datenquelle, die bereits im Indikator „Stickstoffüberschuss auf Anbauflächen von Energiepflanzen“ den Anbau von Energiepflanzen beschreibt, wobei die Ausgabegröße dort km² ist, während für den Flächenindikator ha als Bezugsgröße gewählt wurde.
- Die Belegung von Waldflächen wurde für dieses Vorhaben als Zeitreihe rechnerisch abgeleitet. Grundlage sind die Werte der dritten Bundeswaldinventur [BWI 2020] aus denen die Flächen zum Holzboden (bestockt und bloßer Holzboden) für das Jahr 2012 entnommen (10.887.990 ha) und anhand der Angaben zur Veränderung gegenüber 2002 (Zunahmen um 60.253 ha) als Zeitreihe Gesamtfläche Holzboden (bestockt und bloß) interpoliert werden. Für die Jahre vor 2002 bzw. nach 2012 wurden mit den jeweiligen Randdaten der Erhebung verwendet. Für die Ableitung des für die Energiewende beanspruchten Holzbodens wurde eine Zeitreihe zum Holzeinschlag und Rohholzverwendung des Thünen Instituts ausgewertet [Thünen 2020]. In dieser Zeitreihe ist für die Jahre 2000 bis 2018 angegeben, welche

Mengen des Holzeinschlages energetisch verwendet wurden. Aus diesen Werten lässt sich ein Prozentsatz bilden (2020: 15%, 2018: 30%).

Die Gesamtfläche Holzboden (bestockt und bloß) pro Jahr wird nun mit dem jährlichen Prozentsatz zum energetisch genutzten Holzeinschlag multipliziert. Als Ergebnis ergibt sich ein Flächenwert, der den für das Energiesystem belegten Holzboden (im Sinne von Waldflächen) pro Jahr repräsentiert.

Bei dieser Form der Berechnung ist zwingend zu berücksichtigen, dass die Annahmen zum Holzboden auf Basis der dritten Bundeswaldinventur interpoliert sind und somit keine echte Zeitreihe abbildet. Zudem ist zu beachten, dass die Daten aus [Thünen 2020] eine Einschlag-rückrechnung darstellen. Der angewendete Rechenweg in [Thünen 2020] konnte im Rahmen des hier vorliegenden F&E Vorhabens nicht validiert werden. Es handelt sich somit eher um ein theoretisches Flächenbelegungspotenzial.

Für sonstige erneuerbare Energieträger, nicht-erneuerbare Energieträger und die Netzinfrastuktur, wurden die für 2017 errechneten Werte aus dem Projekt „Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen“ auch für die übrigen Jahre angesetzt.

Für eine Reihe von Einzelwerten wurden auch Daten aus der renommierten Ökobilanz-Datenbank ecoinvent verwendet. Diese Daten sind deutlich generischer und zum Teil mangelt es an Aktualität, doch finden sie nur für die Energiepfade Eingang, die insgesamt eher wenig zur Flächenbelegung beitragen (z.B. Vorketten fossiler Energieträger aus mehrheitlich unterirdischer Förderung wie Steinkohle, Gas und Öl). Für die Landinanspruchnahme durch Braunkohle stehen die detaillierten und jährlich aktualisierten Statistiken der Kohlenwirtschaft [Kohlenstatistik 2020] zur Verfügung.

Eine direkt verfügbare Zeitreihe liegt – wie erwähnt - nur für Ackerflächen vor. Für Waldflächen lässt sich eine Zeitreihe rechnerisch ableiten, für sonstige erneuerbare Energieträger, nicht-erneuerbare Energieträger und Netzinfrastuktur wurden die für 2017 errechneten Werte aus dem Projekt „Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen“ auch für die übrigen Jahre angesetzt.

5.4.1.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Abbildung 37 dargestellt; die Zahlenwerte finden sich in Tabelle 28. Die Zahlen illustrieren den Beitrag des Energiesystems an der Flächenbelegung. Die insgesamt belegten Flächen summieren sich 2018 auf ca. 17 % der Gesamtfläche Deutschlands. Dabei entfällt auf Waldflächen 55 %, Ackerflächen 41 %, auf sonstige erneuerbare Energieträger (PV-Anlagen, WEA) 0,7%, auf nicht-erneuerbare Energieträger (v.a. Braunkohletagebau) 2,9 % und die Netzinfrastuktur 0,6 %. Die temporäre Flächenbelegung durch Ackerflächen für Energiepflanzen vergrößerte sich von 2000 bis 2018 um den Faktor 6,7, für Waldflächen um den Faktor 1,9.

5.4.1.4 Bewertung

Die Flächeninanspruchnahme betrifft direkt das Schutzgut Fläche und das Schutzgut Tiere, Pflanzen und biologische Vielfalt. Indirekt sind durch die Flächeninanspruchnahme auch die Schutzgüter, Mensch, Boden und Kultur- und Sachgüter betroffen. Die Inanspruchnahme von Flächen verändert den Charakter der Landschaft beeinträchtigt ihren Erholungswert; bebaute Flächen verändern die Bodenfunktion (z.B. weniger Infiltration von Regenwasser).

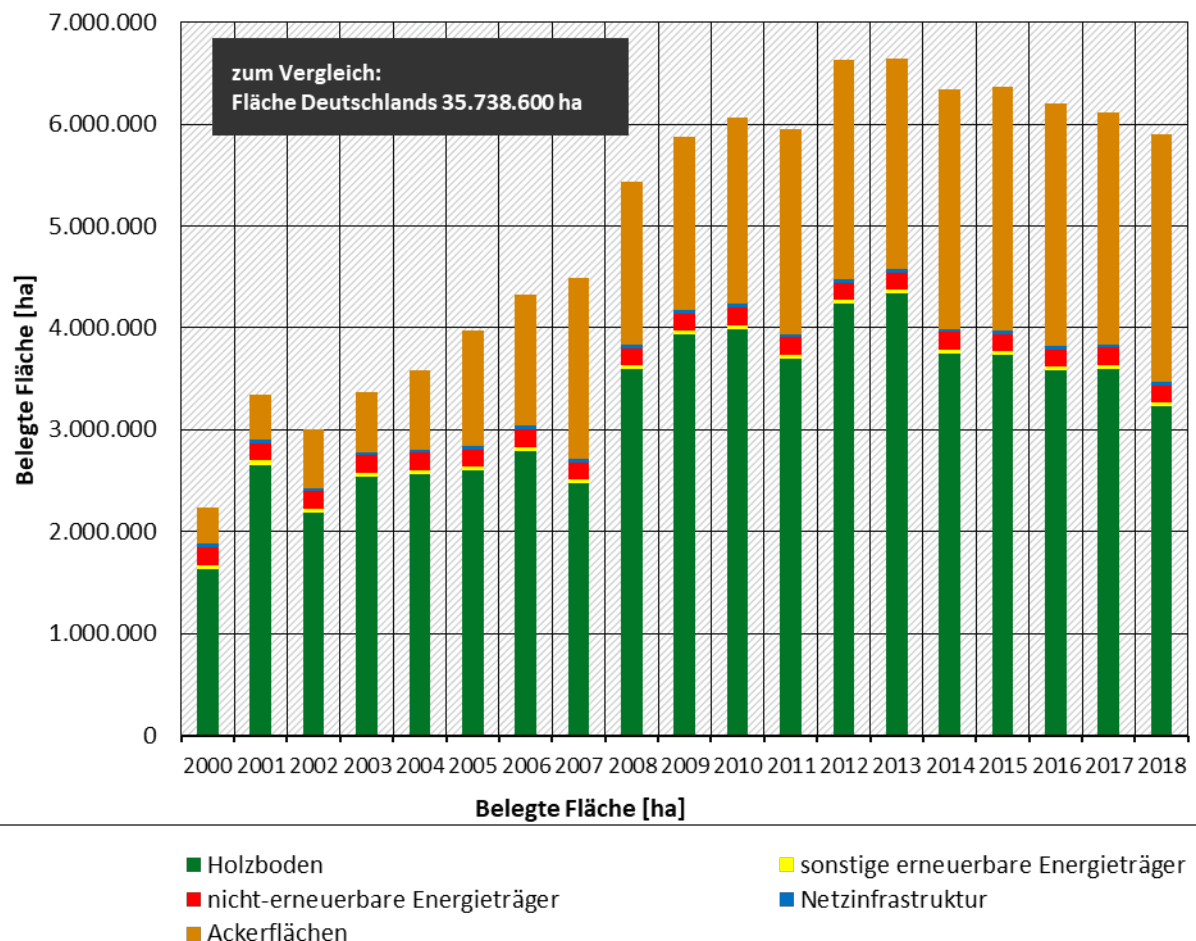
Was die Bewertbarkeit angeht, ist auf die starke Dominanz der auf Anbaubiomasse basierten Energiesysteme im Ergebnis hinzuweisen. Andere EE-Systeme wie Wind und Solar, wie auch der Braunkohleabbau und auch die Netzinfrastuktur liegen um ein bis zwei Größenordnungen

niedriger. Durch den zweiten, anhand der Hemerobie charakterisierten Indikator wird dies nur leicht abgeschwächt. Damit wird jedoch auch die flächenbezogene Relevanz der Biomassensysteme unterstrichen. Wenn es um den Wirkfaktor Flächeninanspruchnahme geht, ist zunächst Biomasse der entscheidende Punkt. Nichtsdestoweniger bieten die Indikatoren der Flächenbelegung auch für die anderen Systeme – gerade auch für Wind und Solar – eine aussagekräftige Bewertungsgrundlage bezüglich der Fläche.

Erschwerend für die Interpretation des Indikators ist die nur eingeschränkt belastbare Zeitreihe für die Waldflächen (hier ausgewiesen als Holzboden) und die fehlenden Zeitreihen für Flächen der nicht-erneuerbare Energieträger, sonstige Energieträger und die Netzinfrastuktur.

Bei weiterer Umsetzung der Energiewende wird die Flächenbelegung energetisch genutzter Biomasse diesen Indikator weiter dominieren. Für eine abschließende Bewertung ist die sachgerechte Quantifizierung der fehlenden Zeitreihen jedoch Voraussetzung, die nicht durch das Forschungsprojekt „Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen“ generiert wurden.

Abbildung 37: Temporäre Flächeninanspruchnahme durch das Energiesystem



Quelle: Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen (FKZ 3717 31 105 0), vorläufige Werte; Berechnungen ifeu

Anmerkung 1: Eine Zeitreihe liegt nur für Ackerflächen und eingeschränkt für Waldflächen vor. Für sonstige erneuerbare Energieträger, nicht-erneuerbare Energieträger und Netzinfrastuktur wurden die für 2017 errechneten Werte aus dem Projekt „Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen“ auch für die übrigen Jahre angesetzt.

Anmerkung 2: Eine in der Abbildung steigende Flächeninanspruchnahme bedeutet eine steigende Nutzung der vorhandenen Flächen für das Energiesystem. Die dargestellten Werte können nicht als eine in Summe gestiegene Flächenbelegung für landwirtschaftliche Flächen oder als eine in Summe steigende Menge an eingeschlagenem Holz interpretiert werden.

Tabelle 28: Temporäre Flächeninanspruchnahme durch das Energiesystem, in ha

	Holzboden (im Sinne von Waldflächen)	Ackerflächen	sonstige erneuerbare Energieträger	nicht-erneuerbare Energieträger	Netzinfrastuktur
2000	1.635.066	359.400	39.000	170.216	34.473
2001	2.656.973	440.500	39.000	170.216	34.473
2002	2.184.594	581.400	39.000	170.216	34.473
2003	2.538.631	588.800	39.000	170.216	34.473
2004	2.563.206	780.000	39.000	170.216	34.473
2005	2.596.186	1.128.600	39.000	170.216	34.473
2006	2.792.414	1.295.000	39.000	170.216	34.473
2007	2.472.638	1.771.000	39.000	170.216	34.473
2008	3.591.607	1.604.000	39.000	170.216	34.473
2009	3.932.570	1.701.500	39.000	170.216	34.473
2010	3.990.144	1.834.000	39.000	170.216	34.473
2011	3.698.079	2.006.000	39.000	170.216	34.473
2012	4.232.391	2.160.000	39.000	170.216	34.473
2013	4.334.198	2.060.000	39.000	170.216	34.473
2014	3.748.221	2.350.000	39.000	170.216	34.473
2015	3.730.760	2.390.000	39.000	170.216	34.473
2016	3.577.547	2.380.000	39.000	170.216	34.473
2017	3.594.892	2.280.000	39.000	170.216	34.473
2018	3.225.165	2.426.000	39.000	170.216	34.473

Quelle: Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen (FKZ 3717 31 105 0), vorläufige Werte; Berechnungen ifeu

Anmerkung 1: Eine Zeitreihe liegt nur für Ackerflächen und eingeschränkt für Waldflächen vor. Für sonstige erneuerbare Energieträger, nicht-erneuerbare Energieträger und Netzinfrastuktur wurden die für 2017 errechneten Werte aus dem Projekt „Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen“ auch für die übrigen Jahre angesetzt. Diese sind in der Tabelle rot markiert.

Anmerkung 2: Eine in der Tabelle steigende Flächeninanspruchnahme bedeutet eine steigende Nutzung der vorhandenen Flächen für das Energiesystem. Die dargestellten Werte können nicht als eine in Summe gestiegene Flächenbelegung für landwirtschaftliche Flächen oder als eine in Summe steigende Menge an eingeschlagenem Holz interpretiert werden.

Bewertung der Ergebnisse der Zeitreihe:

Die Summe der temporären Flächeninanspruchnahme nimmt seit dem Jahr 2000 stetig **zu**.

Im Sinne des Indikators ist somit von einer zunehmenden Umweltbelastung auf die betroffenen Schutzgüter auszugehen, wobei die Ergebnisse aufgrund von fehlenden Daten und methodischer Unsicherheiten nicht zweifelsfrei bewertbar ist.

Beurteilung des Indikators:

Der Indikator bildet die zu beschreibende Umweltauswirkung **in direkter Weise** ab.

Der Indikator umfasst **nahezu vollständig**, die für den Wirkpfad definierten Systemgrenzen.

Die Qualität der für die Berechnung/ Ableitung herangezogenen Daten ist als **mäßig** zu bewerten, da die Methode nicht vollständig transparent ist, keine vollständige Zeitreihe vorliegt und der Indikator nicht ohne weiteres berechnet werden kann.

5.4.2 Indikator: Temporäre Flächenbelegung durch das Energiesystem (Hemerobie-gewichtet)

5.4.2.1 Datengrundlage

Für den Indikator wurden die im Rahmen des UFO-Plan-Vorhabens „Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen“ (FKZ 3717 31 105 0) erhobenen Daten direkt verwendet. Dabei werden die verfügbaren Werte für die Hemerobie-gewichtete Flächenbelegung verwendet.

5.4.2.2 Quantifizierung

Für die beiden Indikatoren temporäre Flächenbelegung (in ha) und charakterisiert anhand der Hemerobie (in ha aF-Äq.) liegen die entsprechend benötigten Faktoren für die im Rahmen der Systembetrachtung relevanten Energieträger vor. Sie wurden im Rahmen des Projekts „Flächenrucksack“ ausgearbeitet (ifeu/Integrahl o.J.). Dadurch sind diese Indikatoren für das Energiesystem grundsätzlich quantifizierbar und auch als Zeitreihe abbildbar.

Die vom Forschungsnehmer bereitgestellten Daten für die Flächenbelegung wurden wie folgt gruppiert: Waldflächen, Ackerflächen, sonstige erneuerbare Energieträger, nicht-erneuerbare Energieträger und Netzinfrastuktur. Eine Zeitreihe aus [FNR 2020, Becker 2020] liegt nur für Ackerflächen vor. Die Zeitreihe für Waldflächen wurde wie in Kapitel 5.4.1.2 beschreiben, auf Grundlage von Daten der Bundeswaldinventur und [Thünen 2020] errechnet. Die Werte für ha aF-Äq. wurde mit dem Faktor 0,14 für Waldflächen und 0,38 für Ackerflächen errechnet. Für sonstige erneuerbare Energieträger, nicht-erneuerbare Energieträger und Netzinfrastuktur wurden die für 2017 bereitgestellten Werte aus dem Projekt „Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen“ auch für die übrigen Jahre angesetzt.

5.4.2.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Abbildung 38 dargestellt; die Zahlenwerte finden sich in Tabelle 29. Die Zahlen in Tabelle 29 illustrieren den großen Beitrag des Energiesystems an der hemerobie-gewichteten Flächenbelegung. Die insgesamt belegten Flächen summieren sich 2018 auf ca. 14 % der Gesamtfläche Deutschlands. Dabei entfällt auf Waldflächen 29 %, auf Ackerflächen 60 %, auf sonstige erneuerbare Energieträger (PV-Anlagen, WEA) 1,3 %, auf nicht-erneuerbare Energieträger (v.a. Braunkohletagebau) 8,8 % und auf die Netzinfrastuktur 0,6 %. Der Anteil der Hemerobie-gewichteten Belegung von Ackerflächen für Energiepflanzen an der gesamten hemerobie-gewichteten Fläche Deutschlands vergrößerte sich von 1,2 % im Jahr 2000 auf 8,2 % im Jahr 2018.

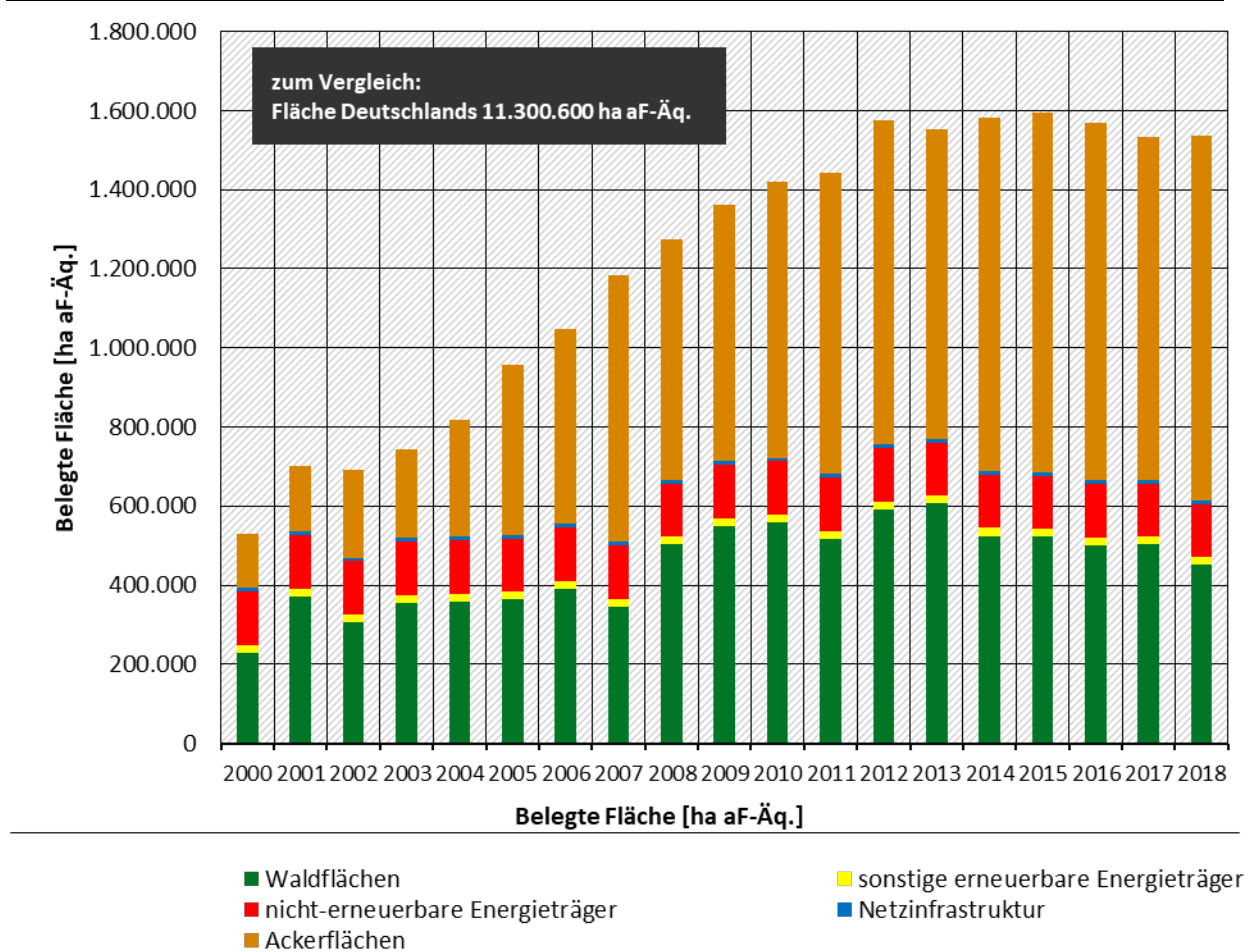
5.4.2.4 Bewertung

Durch die Bewertung der Hemerobie (Naturnähe) wird die Wirkung auf das Schutzgut Tiere, Pflanzen und biologische Vielfalt beschrieben. Die Naturnähe der Flächen beeinflusst ihren Erholungswert für den Menschen, deshalb beschreibt dieser Indikator die Wirkung auf das Schutzgut Menschen. Für eine abschließende Bewertung ist die Quantifizierung der fehlenden Zeitreihen Voraussetzung.

Im Vergleich mit dem Indikator *Temporäre Flächenbelegung durch das Energiesystem* zeigt die Hemerobie-Gewichtung, dass die Nutzung von Ackerflächen stärker gewertet wird. Bei weiterer Umsetzung der Energiewende wird die Belegung von Ackerflächen für Energiepflanzen diesen Indikator weiter dominieren.

Da derzeit keine vollständig valide Zeitreihe verfügbar ist und diese auch nicht durch das Forschungsprojekt bereitgestellt werden kann, ist der Indikator nur sehr eingeschränkt aussagefähig.

Abbildung 38: Temporäre Flächenbelegung durch das Energiesystem (Hemerobie-gewichtet)



Quelle: Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen (FKZ 3717 31 105 0), vorläufige Werte; Berechnungen ifeu

Anmerkung 1: Eine Zeitreihe liegt nur für Ackerflächen und eingeschränkt für Waldflächen vor. Für sonstige erneuerbare Energieträger, nicht-erneuerbare Energieträger und die Netzinfrastruktur wurden die für 2017 errechneten Werte aus dem Projekt „Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen“ auch für die übrigen Jahre angesetzt.

Anmerkung 2: Eine in der Abbildung steigende Flächeninanspruchnahme bedeutet eine steigende Nutzung der vorhandenen Flächen für das Energiesystem. Die dargestellten Werte können nicht als eine in Summe gestiegene Flächenbelegung für landwirtschaftliche Flächen oder als eine in Summe steigende Menge an eingeschlagenem Holz interpretiert werden.

Tabelle 29: Temporäre Flächeninanspruchnahme durch das Energiesystem, in ha aF-Äq. (Hemerobie-gewichtet)

	Waldflächen	Ackerflächen	sonstige erneuerbare Energieträger	nicht-erneuerbare Energieträger	Netzinfrasturktur
2000	228.909	136.572	19.482	134.695	9.157
2001	371.976	167.390	19.482	134.695	9.157
2002	305.843	220.932	19.482	134.695	9.157
2003	355.408	223.744	19.482	134.695	9.157
2004	358.849	296.400	19.482	134.695	9.157
2005	363.466	428.868	19.482	134.695	9.157
2006	390.938	492.100	19.482	134.695	9.157
2007	346.169	672.980	19.482	134.695	9.157
2008	502.825	609.520	19.482	134.695	9.157
2009	550.560	646.570	19.482	134.695	9.157
2010	558.620	696.920	19.482	134.695	9.157
2011	517.731	762.280	19.482	134.695	9.157
2012	592.535	820.800	19.482	134.695	9.157
2013	606.788	782.800	19.482	134.695	9.157
2014	524.751	893.000	19.482	134.695	9.157
2015	522.306	908.200	19.482	134.695	9.157
2016	500.857	904.400	19.482	134.695	9.157
2017	503.285	866.400	19.482	134.695	9.157
2018	451.523	921.880	19.482	134.695	9.157

Quelle: (ifeu/Integrahl o.J.), vorläufige Werte; Berechnungen ifeu

Anmerkung 1: Eine Zeitreihe liegt nur für Ackerflächen und eingeschränkt für Waldflächen vor. Für sonstige erneuerbare Energieträger, nicht-erneuerbare Energieträger und die Netzinfrasturktur wurden die für 2017 errechneten Werte aus dem Projekt „Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen“ auch für die übrigen Jahre angesetzt. Diese sind in der Tabelle rot markiert.

Anmerkung 2: Eine in der Tabelle steigende Flächeninanspruchnahme bedeutet eine steigende Nutzung der vorhandenen Flächen für das Energiesystem. Die dargestellten Werte können nicht als eine in Summe gestiegene Flächenbelegung für landwirtschaftliche Flächen oder als eine in Summe steigende Menge an eingeschlagenem Holz interpretiert werden.

Bewertung der Ergebnisse der Zeitreihe:

Die Summe der temporären Flächeninanspruchnahme nimmt seit dem Jahr 2000 stetig **zu**.

Im Sinne des Indikators ist somit von einer zunehmenden Umweltbelastung auf die betroffenen Schutzgüter auszugehen, wobei die Ergebnisse aufgrund von fehlenden Daten und methodischer Unsicherheiten nicht zweifelsfrei bewertbar ist.

Beurteilung des Indikators:

Der Indikator bildet die zu beschreibende Umweltauswirkung **in direkter Weise** ab.

Der Indikator umfasst **nahezu vollständig** die für den Wirkpfad definierten Systemgrenzen.

Die Qualität der für die Berechnung/ Ableitung herangezogenen Daten ist als **mäßig** zu bewerten, da die Methode nicht vollständig transparent ist, keine vollständige Zeitreihe vorliegt und der Indikator nicht ohne weiteres berechnet werden kann.

5.4.3 Indikator: Indirekte Flächeninanspruchnahme mit Auswirkungen auf das Landschaftsbild

5.4.3.1 Datengrundlage

Die Auswirkungen auf das Landschaftsbild sind schwer quantifizierbar, da die ästhetische Wertung des Landschaftsbildes stark von der persönlichen Einschätzung geprägt wird. Hilfsweise werden deshalb Abstandsregelungen für Industriestandorte (Kraftwerke), Windenergieanlagen und das Übertragungsnetz herangezogen. Dafür werden Daten für Teile des Energiesystems (installierte Leistung von Kraftwerken und Windenergieanlagen; Länge der Freileitungstrassen und Erdkabel im Übertragungsnetz) sowie Daten für anwendbare Abstandsregelungen herangezogen. Die Quellen sind öffentlich verfügbar und werden regelmäßig aktualisiert. Daten zur Leistung konventioneller Kraftwerke wurden aus [BMWi, 2020] entnommen, Zahlen zur installierten Leistung von Onshore-WEA [BMWi, 2020b], Daten zur installierten Leistung von WEA im Wald sind [Quentin 2020] entnommen. Die Daten zur Länge der Übertragungsnetztrassen sind in Abschnitt 5.6.4 beschrieben.

Es gibt keine verbindlichen Vorgaben zu Abstandsregelungen. In Anlehnung an [Franke et al. 2018] wurden folgende Werte zugrunde gelegt: Konventionelle Kraftwerke [0,1 ha/MW], Windenergieanlagen [6 ha/MW], Freileitungstrassen im Übertragungsnetz [220 kV: 6 ha/km; 380 kV 8 ha/km] sowie Erdkabel im Übertragungsnetz [3 ha/km]. Die direkte Flächenwirkung von Freiflächen-PV, Braunkohlentagebau sowie Anbauflächen für energetische Biomasse werden mit dem Indikator Temporäre Flächenbelegung durch das Energiesystem erfasst. Grundlage sind dabei folgende Annahmen:

- ▶ Konventionelle Kraftwerke: Es wird der Abstand zur nächstgelegenen Wohnbebauung herangezogen. Daraus wird von den Verfassern ein Wert von 0,1 ha/MW installierter Leistung geschätzt, der ggf. weiter zu validieren wäre.
- ▶ WEA: Um die gegenseitige Beeinflussung zu minimieren, müssen Windenergieanlagen einen Mindestabstand zueinander einhalten. Dieser ist abhängig von der vorherrschenden Windrichtung und der Anlagengröße. Nach der Agentur für Erneuerbare Energien e.V. [AAE 2010] lag der rechnerische Wert der Abstandsfläche im Jahr 2020 bei 6 ha pro MW.
- ▶ Freileitungstrassen im Übertragungsnetz: Nach [Energieatlas Bayern 2014] wird für eine 2-systemige Freileitung (380 kV, 50Hertz) ein Wert von 70 m angesetzt. Für 220 kV-Leitungen wird ein Wert von 50 m angenommen.
- ▶ Die Trassenbreite für das Erdkabel wird nach [50Hertz kein Datum] mit ca. 30 m angesetzt.

5.4.3.2 Quantifizierung

Die Quantifizierung erfolgt durch Multiplikation der installierten Leistung bzw. der Trassenlängen mit den Abstandswerten. Die Daten für die installierte Windenergiekapazität im Wald liegen erst ab dem Jahr 2010 vor. Die Angaben zur Länge der Übertragungsnetztrassen für das Jahr 2013 wurden auch für die anderen Jahre angesetzt. Die Flächenwirkung von Freiflächen-PV, vom Braunkohlentagebau sowie von Anbauflächen für energetische Biomasse werden mit dem Indikator Temporäre Flächenbelegung durch das Energiesystem (Kapitel 5.4.1) erfasst.

5.4.3.3 Ergebnisse

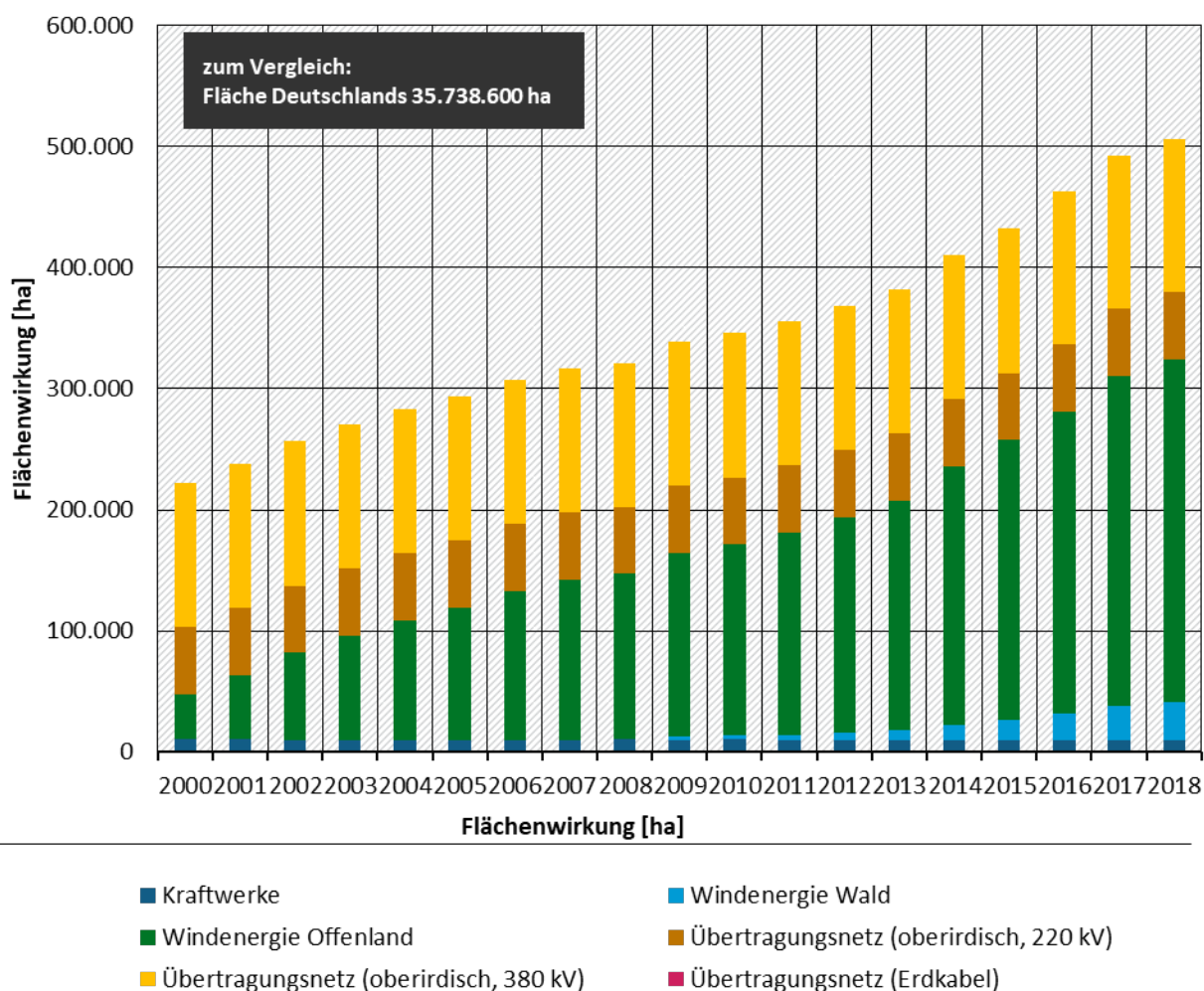
Die Ergebnisse sind in Abbildung 39 dargestellt; die Zahlenwerte finden sich in Tabelle 30. Seit dem Jahr 2000 hat sich die indirekte Flächenwirkung mehr als verdoppelt und wird seit 2012

durch Windenergieanlagen dominiert. In der Summe werden im Jahr 2018 ca. 1,3 % der Fläche Deutschlands durch die hier betrachteten Systeme beeinflusst.

5.4.3.4 Bewertung

Die Zahlen illustrieren eine deutliche Zunahme der indirekten Einwirkungen des Energiesystems auf das Landschaftsbild in Deutschland. Die Bewertung des Indikators ist aus mehreren Gründen schwierig. Auch die direkte Flächenbelegung (z.B. Braunkohlentagebau, Freiland-PV, Anbau von Energiepflanzen) beeinflusst das Landschaftsbild. Weiterhin spiegeln die verwendeten Flächenwerte nicht die gesamte Wirkung auf das Landschaftsbild wider, die zudem vom Werturteil des Betrachters abhängig ist. Die Systemgrenze ist schwierig zu ziehen. Auch die Verteilnetze, Laufwasserkraftwerke und Dachflächen-PV haben Wirkungen auf das Landschaftsbild. Mangels verfügbarer Daten werden diese mit diesem Indikator nicht berücksichtigt. Außerdem wurden BHKW, Geothermie und Laufwasserkraftwerke sowie Freiland-PV-Anlagen wegen der untergeordneten Bedeutung und fehlender Abstandsregelungen nicht berücksichtigt. Außerdem ist anzumerken, dass die Daten für WEA im Wald erst ab dem Jahr 2009 zur Verfügung stehen. Für die Jahre vor 2009 entsprechen daher die Werte für WEA-Offenland den Werten für WEA-Onshore.

Abbildung 39: Indirekte Flächeninanspruchnahme mit Auswirkungen auf das Landschaftsbild durch das Energiesystem



Quelle: Berechnung ifeu [2020]

Tabelle 30: Indirekte Flächeninanspruchnahme mit Auswirkungen auf das Landschaftsbild durch das Energiesystem, in ha

	Kraftwerke	Windenergie Wald	Windenergie Offenland	Übertragungsnetz (oberirdisch, 220 kV)	Übertragungsnetz (oberirdisch, 380 kV)	Übertragungsnetz (Erdkabel)
2000	10.750		36.582	55.422	119.088	-
2001	10.680		52.428	55.422	119.088	-
2002	10.090		71.856	55.422	119.088	-
2003	9.938		86.286	55.422	119.088	-
2004	10.094		98.514	55.422	119.088	-
2005	9.883		109.488	55.422	119.088	-
2006	9.841		122.844	55.422	119.088	-
2007	9.984		132.696	55.422	119.088	-
2008	10.170		136.764	55.422	119.088	-
2009	10.128	2.627	151.555	55.422	119.088	-
2010	10.396	3.092	157.846	55.422	119.088	-
2011	9.802	4.290	166.854	55.422	119.088	-
2012	9.730	5.806	178.460	55.422	119.088	-
2013	9.461	8.474	189.340	55.422	119.088	-
2014	10.016	11.929	213.791	55.422	119.088	-
2015	9.760	16.314	231.468	55.422	119.088	-
2016	9.730	22.412	249.286	55.422	126.384	-
2017	9.500	28.499	272.545	55.422	126.384	-
2018	9.500	31.670	283.012	55.422	126.384	-

Quelle: Berechnung ifeu [2020]

Bewertung der Ergebnisse der Zeitreihe:

Die Summe der indirekten Flächeninanspruchnahme mit Auswirkung auf das Landschaftsbild nimmt seit dem Jahr 2000 stetig **zu**.

Im Sinne des Indikators ist somit von einer zunehmenden Umweltbelastung auf die betroffenen Schutzgüter auszugehen.

Beurteilung des Indikators:

Der Indikator bildet die zu beschreibende Umweltauswirkung **lediglich als Proxy** ab, da der Indikator keine lokalen Begebenheiten reflektieren kann.

Der Indikator umfasst **nur eine Auswahl** der Prozesse in den die für den Wirkpfad definierten Systemgrenzen.

Die Qualität der für die Berechnung/ Ableitung herangezogenen Daten ist als **mäßig** zu bewerten, es müssen verschiedene teils nicht kongruente Datenquellen miteinander verschnitten werden, deren Qualität als mäßig angesehen wird. Außerdem ist die Methode der Ableitung mit hohen Unsicherheiten behaftet.

5.5 Wirkpfad Rohstoffnutzung

5.5.1 Indikator: Durch das Energiesystem verbrauchte Rohstoffe nach Rohstoffen bzw. Rohstoffgruppen

5.5.1.1 Datengrundlage

Für den Indikator verbrauchte Rohstoffe können die Energiebilanzen der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen einschl. Satellitenbilanzen herangezogen werden [AGEB 2020]. Diese werden jährlich aktualisiert. Sie liegen bislang einschließlich des Jahres 2018 vor.

5.5.1.2 Quantifizierung

Die Daten aus [AGEB 2020] werden in natürlichen Einheiten für Steinkohle, Braunkohle und Mineralöle (Mio. t/a) ausgewiesen. Für die Nutzung radioaktiver Stoffe in der Kernenergie sowie bei Erdgas wurden die Werte in Steinkohleeinheiten (SKE) verwendet. Die Ausweisung nach Steinkohleeinheiten kann aus einer Energieperspektive sinnvoll sein und wird entsprechend von der AGEB [2020] oder in Studien, die auf energetische Aspekte fokussieren wie BGR Energiestudien [BGR 2019], genutzt. Aus rohstofflicher Perspektive ist die Einheit Steinkohleeinheiten nicht optimal. Rohstoffe mit einem hohen Energiegehalt wie beispielsweise radioaktive Stoffe werden überproportional dargestellt. Der Ausstieg aus der Kernenergie in den kommenden Jahren würde einen Rückgang von verbrauchten Rohstoffen anzeigen, der vor allem auf die Setzung dieser Einheit zurückzuführen wäre. Sinnvoller wäre daher eine Ausweisung der Masse. Die AGEB weist jedoch Gase in Kubikmetern aus, radioaktive Rohstoffe ebenso wie Biomasse und Sekundärrohstoffe werden ausschließlich in SKE oder Energieeinheiten ausgewiesen. Eine Umrechnung auf Masse könnte für Erdgase, radioaktive Stoffe und für (primäre) Biomasse entlang den Konventionen bei der Materialflussrechnung erfolgen (EUROSTAT, 2018). Für die Umrechnung sind im Falle von Erdgas weiterhin abgesicherte und regionalisierte Handelsdaten erforderlich, da die Umrechnung von Erdgas aufgrund der unterschiedlichen Dichte entsprechend der Herkunftsregion unterschiedlich ist. Es sei angemerkt, dass die öffentlich zugänglichen Handelsdaten von Erdgas und auch von radioaktiven Stoffen nicht immer vollständig zu sein scheinen und oft Unplausibilitäten aufweisen, was unter anderem auf Vertraulichkeitsregelungen zurückgeführt werden kann. Sowohl die Energiebilanz als auch die Satellitenbilanz [AGEB 2020] erlaubt gegenwärtig keine Trennung zwischen Biomasse und Sekundärrohstoffen, so dass beides nur zusammen ausgewiesen werden kann, obwohl unterschiedliche Materialien betroffen sind und diese rohstoffseitig auch unterschiedlich erfasst werden. Die Umrechnung von Biomasse (in Trockenmasse) könnte ebenso entlang der Konventionen in der Materialflussrechnung nach (EUROSTAT, 2018) erfolgen. Aufgrund der fehlenden Differenzierung in den Ausgangsdaten war dies in diesem Projekt nicht möglich. In der unten stehenden Abbildung wurden die Einheiten (natürliche) Tonnen und Tonnen Steinkohleeinheiten gemischt. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass die oben genannten Umrechnungen im Projekt nicht durchgeführt werden konnten. Die Mischung der Einheiten ist keine Lösung, sondern weist auf das Problem hin, das in einem Folgeprojekt gelöst werden sollte.

Das heißt, zukünftig sollten alle Rohstoffe in Tonnen entlang den international harmonisierten Umrechnungsvorgaben der Materialflussanalysen [Eurostat, 2018] erfolgen, primäre und sekundäre Rohstoffe sollten getrennt ausgewiesen werden. Eine zusätzliche Ausweisung in kumulierten Rohstoffaufwendungen (KRA) bzw. in Rohmaterialäquivalenten würde eine Vergleichbarkeit mit dem zweiten Rohstoffindikator (Kapitel 5.5.2) ermöglichen. Auch hierfür sind Aktualisierungen und Vervollständigung von KRA-Berechnungen (Faktoren nach einheitlichen Systemgrenzen) erforderlich.

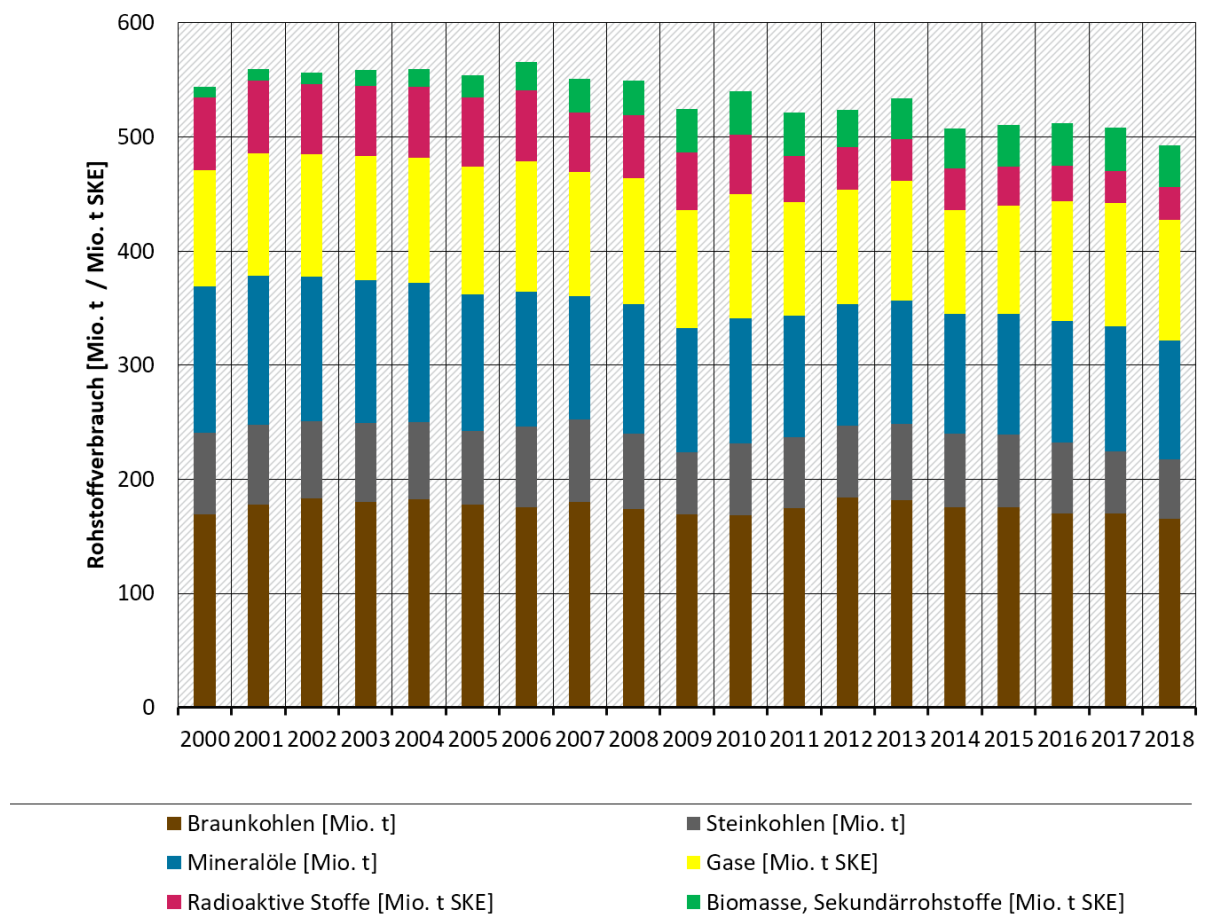
5.5.1.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Abbildung 40 dargestellt; die Zahlenwerte finden sich in Tabelle 31. Von 2000 bis 2018 ist der Rohstoffverbrauch im Energiesystem um ca. 7% gesunken; der Verbrauch nicht-erneuerbarer Energieträger sank um 12%.

5.5.1.4 Bewertung

Die Rohstoffinanspruchnahme betrifft primär das Schutzgut Ressourcen. Die (überwiegend fossilen) Rohstoffe stehen nach dem Verbrennen nicht mehr zur Verfügung und sind unwiederbringlich für eine weitere menschliche Nutzung verloren. Auch biotische Rohstoffe sind nach der Nutzung (Verbrennung) verloren. Im Gegensatz zu fossilen Rohstoffen können jedoch biotische Rohstoffe nachwachsen. Mit fortschreitender Realisierung der Energiewende (z.B. Kohleausstieg) wird der Verbrauch nicht-erneuerbarer Energieträger weiter abnehmen.

Abbildung 40: Durch das Energiesystem verbrauchte Rohstoffe nach Rohstoffen bzw. Rohstoffgruppen



Quelle: AGEB [2000 bis 2019]

Tabelle 31: Durch das Energiesystem verbrauchte Rohstoffe nach Rohstoffgruppen

	Steinkohlen [Mio. t]	Braunkohlen [Mio. t]	Mineralöle [Mio. t]	Gase [Mio. t SKE]	Radioaktive Stoffe [Mio. t SKE]	Biomasse, Sekundärroh- stoffe [Mio. t SKE]
2000	71,1	169,6	128,3	102,2	63,2	9,6
2001	69,9	177,8	130,4	107,8	63,7	10,1
2002	67,6	183,5	126,2	107,7	61,4	10,2
2003	69,4	180,2	124,6	109,0	61,4	14,2
2004	68,2	182,2	121,7	109,5	62,2	16,0
2005	64,2	177,9	120,3	111,3	60,7	19,8
2006	70,1	175,7	118,6	114,1	62,3	24,9
2007	72,6	179,8	107,8	108,8	52,3	29,5
2008	65,5	174,2	114,0	110,2	55,4	30,0
2009	54,7	168,8	108,8	103,8	50,2	37,9
2010	63,0	168,4	109,9	108,5	52,3	38,2
2011	62,2	175,0	106,0	100,0	40,2	37,9
2012	63,0	183,8	106,9	100,1	37,0	33,1
2013	67,2	181,4	108,2	104,9	36,2	36,0
2014	64,1	175,5	105,2	91,2	36,2	35,6
2015	63,8	175,6	105,1	94,9	34,2	36,7
2016	62,1	169,7	106,8	104,7	31,5	37,4
2017	54,9	169,7	109,3	108,0	28,4	38,2
2018	52,1	165,7	104,1	105,7	28,3	37,0

Quelle: AGEBA [2000 bis 2019]

Bewertung der Ergebnisse der Zeitreihe:

Die Summe der durch das Energiesystem verbrauchten Rohstoffe variiert seit dem Jahr 2000 nur geringfügig.

Im Sinne des Indikators ist somit von einer gleichbleibenden Umweltbelastung auf das betroffene Schutzgut auszugehen, wobei eine Bewertung aufgrund der uneinheitlichen Ausweisung der Rohstoffe nur begrenzt möglich ist.

Beurteilung des Indikators:

Der Indikator bildet die zu beschreibende Umweltauswirkung **in direkte Weise** ab.

Der Indikator umfasst **nahezu vollständig** die für den Wirkpfad definierten Systemgrenzen.

Die Qualität der für die Berechnung/ Ableitung herangezogenen Daten ist als **mäßig** zu bewerten, da die Daten der Zeitreihe aufgrund der uneinheitlichen Ausweisung nicht zweifelsfrei bewertbar sind.

5.5.2 Indikator: Materialkonsum im Bereich der Energieinfrastruktur in Deutschland

5.5.2.1 Datengrundlage

Für den Indikator in der Energieinfrastruktur gebundene Rohstoffe liegen bislang keine ausdifferenzierten Daten aus der Umweltökonomischen Gesamtrechnungen (UGR) des Statistischen Bundesamtes vor [Statistisches Bundesamt (Destatis), 2018]. Im Rahmen des Forschungsprojekts DeteRess (Dittrich et al. 2018) wurde das – die Instrumente der UGR nutzende – Umweltökonomische Rohstoffmodell URMOD entwickelt. Mit Hilfe des Modells wurde unter anderem die Kategorie Investitionen in der letzten inländischen Verwendung ausdifferenziert, so dass eine rohstoffliche Zuordnung zu Investitionen in die Energieinfrastruktur möglich ist. Das Modell berücksichtigt dabei die Vorketten im In- und Ausland in der Einheit Rohstoffäquivalente sowie Aufwendungen für Neubau und Unterhaltung pro Jahr.

Für analytische Zwecke sind zusätzlich technologie- und rohstoffspezifische Informationen interessant, da in der Energieinfrastruktur Rohstoffe gebraucht werden, die als wirtschaftskritisch eingeschätzt bzw. mit einem hohen Umweltbelastungspotenzial verbunden sind. Auch diese Rohstoffmengen sind bislang ausschließlich im Rahmen von Forschungsprojekten, teilweise nur für ausgewählte Energieanlagen bzw. Anlagentypen, erhoben worden (siehe Kapitel 4.6).

5.5.2.2 Quantifizierung

Die Quantifizierung kann mit Hilfe von Daten der Umweltökonomischen Gesamtrechnungen (UGR) erfolgen. Dass dies möglich ist, wurde im Projekt DeteRess mit der Entwicklung des Umweltökonomischen Rohstoffmodells URMOD gezeigt [Dittrich et al. 2018]. Ein Ergebnis liegt bislang nur für das Jahr 2010 für die Primärrohstoffe vor.

Die Ausweisung des Rohstoffaufwandes nach Technologien wurde, wie in Kapitel 4.6. dargestellt, in verschiedenen Forschungsprojekten erhoben. Der jährliche Materialinput wurde im Projekt MaRess für das Jahr 2008 umfassend erhoben, und ist in Kap. 4.6. bereits aufgezeigt.

Zur Ausweisung rohstoffspezifischer Angaben ist eine Rohstoffauswahl erforderlich. Im Rahmen des Projekts wurde vorgeschlagen, die im Rahmen des Projekts ÖkoRess [Dehoust et al. 2017] identifizierten Rohstoffe mit einem hohen Umweltgefährdungspotenzial und/oder eine Auswahl in Anlehnung an die seitens der EU als wirtschaftskritisch identifizierten Rohstoffe auszuweisen.

Eine konkrete Rohstoffauswahl und die folgende Rohstoffquantifizierung erfordern einen abschließenden Abstimmungsprozess, der jedoch den Rahmen dieses Projekts überstieg. Daher liegt zu diesem Zeitpunkt noch kein Ergebnis zu rohstoffspezifischen Aufwendungen in der Energieinfrastruktur vor.

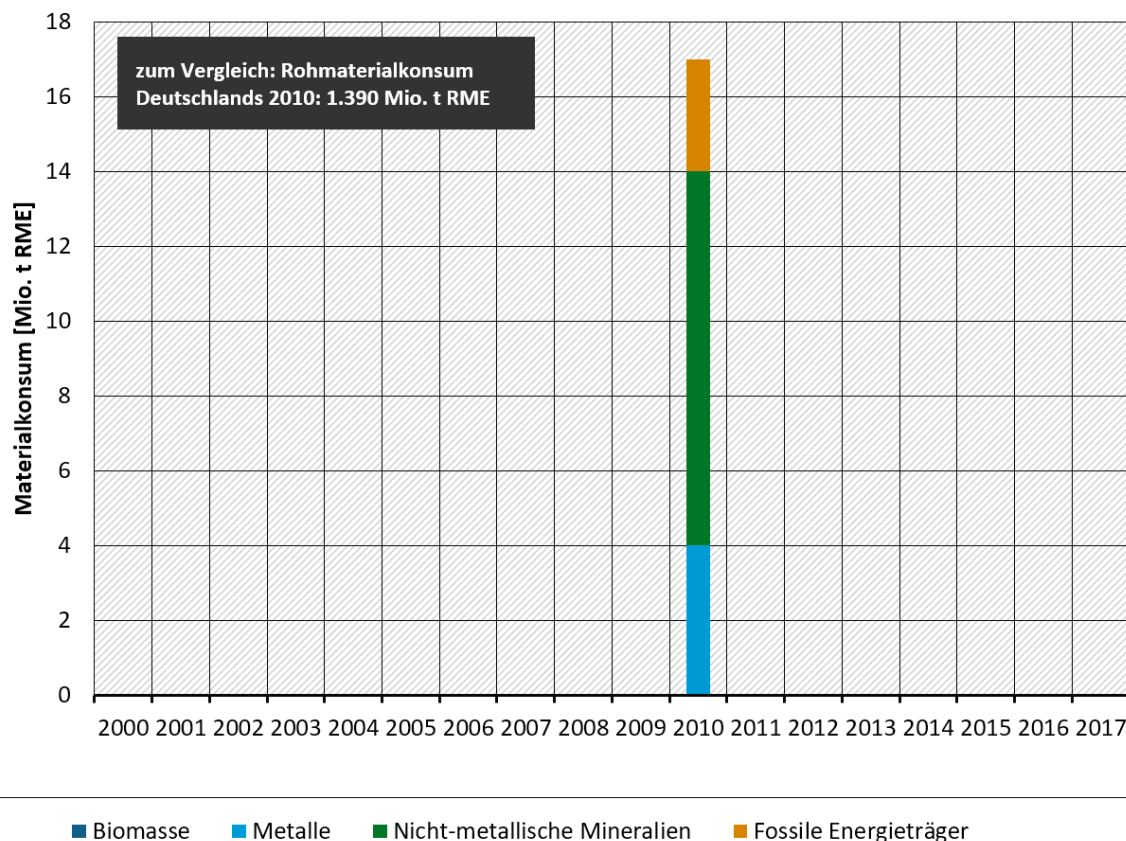
5.5.2.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Abbildung 41 dargestellt; die Zahlenwerte finden sich in Tabelle 32. Aufgrund des Fehlens einer Zeitreihe kann kein Ergebnistrend zur Bewertung abgeleitet werden.

5.5.2.4 Bewertung

Der Indikator *in der Energie-Infrastruktur gebundene Rohstoffe* kann wertvolle Hinweise zum Gesamtaufwand sowie zum Aufwand insbesondere von Metallen und Mineralen bereitstellen, die für Erneuerbare Energien benötigt werden. Es ist davon auszugehen, dass die Rohstoffaufwendungen für die Energieinfrastruktur insgesamt und auch bezogen auf Rohstoffe mit einem hohen Umweltgefährdungspotenzial zunehmen werden.

Abbildung 41: Materialkonsum im Bereich der Energieinfrastruktur in Deutschland



Quelle: Dittrich et al. 2018 [Projekt DeteRes]

Tabelle 32: Materialkonsum im Bereich der Energieinfrastruktur in Deutschland, in Mio. t RME

	Biomasse	Metalle	Nicht-metallische Mineralien	Fossile Energieträger
2010	0	4	10	3

Quelle: Berechnung ifeu 2020

Bewertung der Ergebnisse der Zeitreihe:

Die Zeitreihe kann nicht bewertet werden.

Beurteilung des Indikators:

Der Indikator bildet die zu beschreibende Umweltauswirkung **in direkte Weise** ab.

Der Indikator umfasst **nahezu vollständig** die für den Wirkpfad definierten Systemgrenzen.

Die Qualität der für die Berechnung/ Ableitung herangezogenen Daten ist als **mäßig** zu bewerten, da im Vorhaben keine Zeitreihe errechnet werden konnte.

5.6 Wirkungspfad Direkte Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen

5.6.1 Indikator: Veränderung der Flächeninanspruchnahme zum Vorjahr durch das Energiesystem

5.6.1.1 Datengrundlage

Die Änderung der Flächeninanspruchnahme durch das Energiesystem im Vergleich zum Vorjahr wird auf Grundlage des Indikators *Flächeninanspruchnahme durch das Energiesystem* errechnet.

5.6.1.2 Quantifizierung

Die Zunahme oder Abnahme der Flächeninanspruchnahme durch das Energiesystem im Vergleich zum Vorjahr bilden ein Maß für die Veränderung der Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen. Die Maßeinheit ist die Zunahme oder Abnahme in ha pro Jahr. Dabei werden die Differenzierungen des Indikators *Flächeninanspruchnahme durch das Energiesystem* (biogene Energieträger, sonstige erneuerbare Energieträger, nicht-erneuerbare Energieträger und Netzinfrastruktur) übernommen. Die Änderung der Flächeninanspruchnahme durch das Energiesystem im Vergleich zum Vorjahr kann durch Differenzbildung aus dem Indikator *Flächeninanspruchnahme durch das Energiesystem* errechnet werden. Für den Indikator *Flächeninanspruchnahme durch das Energiesystem* liegen bislang nur Zeitreihen für die Waldflächen und die Ackerflächen vor. Insofern ist für den Indikator *Veränderung der Flächeninanspruchnahme zum Vorjahr durch das Energiesystem* derzeit nur hierfür eine Quantifizierung möglich.

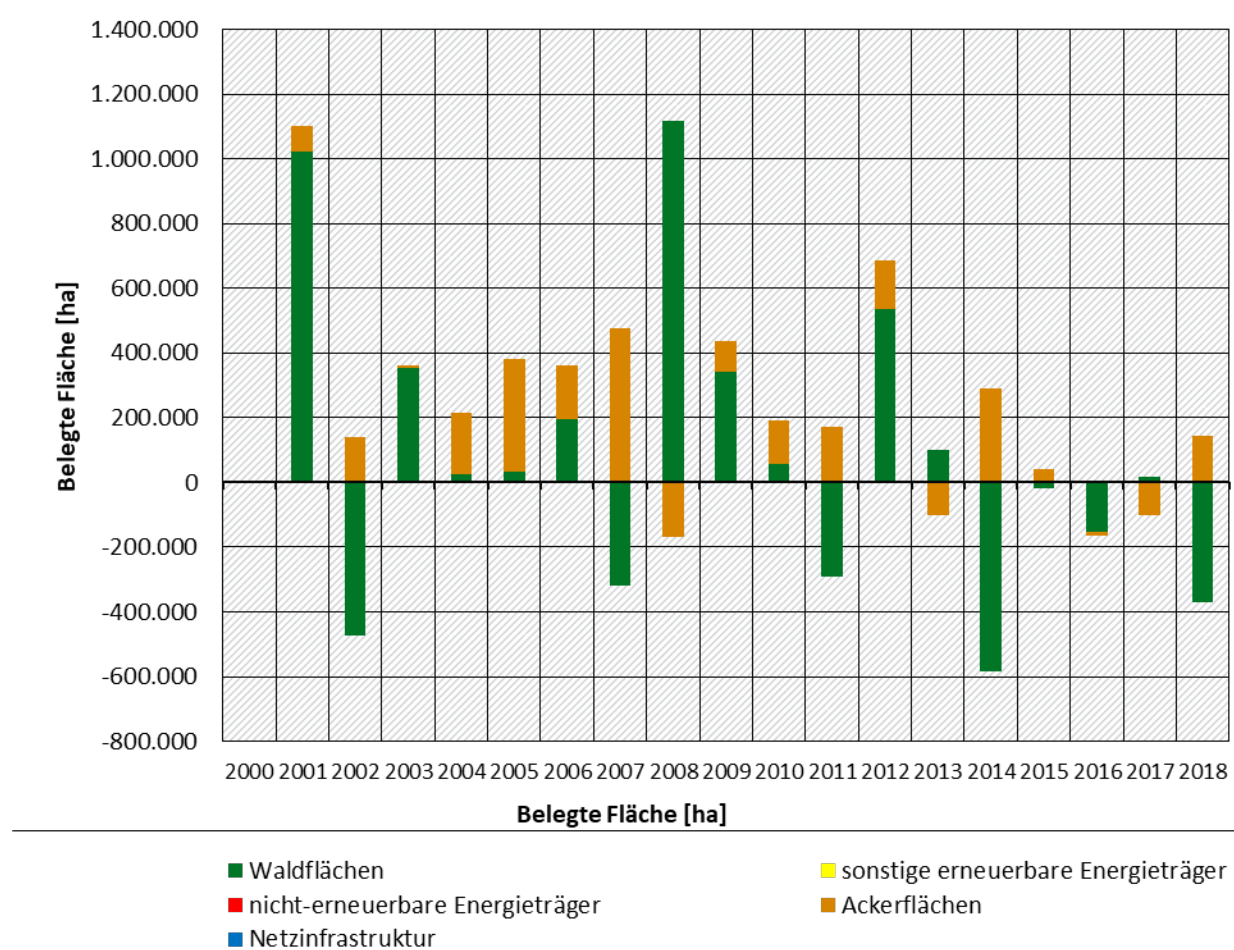
5.6.1.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Abbildung 42 dargestellt; die Zahlenwerte finden sich in Tabelle 33. Der Indikator spiegelt derzeit nur die Veränderungen in der Belegung von Ackerflächen zum Anbau von Energiepflanzen wider. Die größte Zunahme gab es im Jahr 2007 mit 476.000 ha; der größte Rückgang war im Jahr 2008 mit 167.000 ha zu verzeichnen.

5.6.1.4 Bewertung

Die Indikatoren für den Wirkungspfad „Direkte Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen“ sind nur bedingt bewertbar, da keine Daten für das Ausmaß der direkten Schädigung vorliegen. Daher wird hier ein Proxy-Indikator gewählt, der das Schadenspotenzial und nicht das Ausmaß der Schädigung abbildet. Veränderungen in der direkten Flächeninanspruchnahme (z.B. Monokulturen auf Ackerflächen, gefälltte Bäume bei Rodungen oder die Renaturierung nach dem Rückbau von Kraftwerksflächen) haben direkte Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen. Diese werden mit dem Indikator erfasst und den Sektoren zugeordnet. Hinsichtlich der Waldflächen ist zwingend zu beachten, dass die aus dem Indikator *Flächeninanspruchnahme durch das Energiesystem* übernommene Zeitreihe für Waldflächen aufgrund der verwendeten Daten und der Form der Ableitung (vgl. Kapitel 5.4.1.2) mit Unsicherheiten behaftet ist und daher nur sehr eingeschränkt interpretierbar ist.

Abbildung 42: Veränderung der Flächeninanspruchnahme zum Vorjahr durch das Energiesystem



Quelle: Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen (FKZ 3717 31 105 0), vorläufige Werte; Berechnungen ifeu

Tabelle 33: Veränderung der Flächeninanspruchnahme zum Vorjahr durch das Energiesystem [ha]

	Waldflächen	Ackerflächen	sonstige erneuerbare Energieträger	nicht-erneuerbare Energieträger	Netzinfrastuktur
2000	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
2001	1.021.907	81.100	k.A.	k.A.	k.A.
2002	-472.379	140.900	k.A.	k.A.	k.A.
2003	354.037	7.400	k.A.	k.A.	k.A.
2004	24.575	191.200	k.A.	k.A.	k.A.
2005	32.980	348.600	k.A.	k.A.	k.A.
2006	196.227	166.400	k.A.	k.A.	k.A.
2007	-319.776	476.000	k.A.	k.A.	k.A.
2008	1.118.969	-167.000	k.A.	k.A.	k.A.
2009	340.963	97.500	k.A.	k.A.	k.A.
2010	57.574	132.500	k.A.	k.A.	k.A.
2011	-292.065	172.000	k.A.	k.A.	k.A.
2012	534.312	154.000	k.A.	k.A.	k.A.
2013	101.807	-100.000	k.A.	k.A.	k.A.
2014	-585.977	290.000	k.A.	k.A.	k.A.
2015	-17.462	40.000	k.A.	k.A.	k.A.
2016	-153.212	-10.000	k.A.	k.A.	k.A.
2017	17.344	-100.000	k.A.	k.A.	k.A.
2018	-369.726	146.000	k.A.	k.A.	k.A.

Quelle: Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen (FKZ 3717 31 105 0), vorläufige Werte; Berechnungen ifeu

Bewertung der Ergebnisse der Zeitreihe:

Die Veränderung der Flächeninanspruchnahme zum Vorjahr durch das Energiesystem ist in der Zeitreihe variabel. In der Regel gibt es jedoch Zunahmen, insbesondere bei den Ackerflächen.

Im Sinne des Indikators ist somit von einer zunehmenden Umweltbelastung auf die betroffenen Schutzgüter auszugehen.

Beurteilung des Indikators:

Der Indikator bildet die zu beschreibende Umweltauswirkung **lediglich als Proxy** ab.

Der Indikator umfasst **nur eine Auswahl** der Prozesse in den für den Wirkpfad definierten Systemgrenzen.

Die Qualität der für die Berechnung/ Ableitung herangezogenen Daten ist als **mäßig** zu bewerten, da die Methode nicht vollständig transparent ist, keine vollständige Zeitreihe vorliegt und der Indikator nicht ohne weiteres berechnet werden kann.

5.6.2 Indikator: Turbinendurchfluss von Wasserkraftwerken und Kühlwassereinsatz in Wärmekraftwerken

5.6.2.1 Datengrundlage

Die Indikatoren für den Wirkpfad „Direkte Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen“ sind nur bedingt bewertbar, da keine Daten für das Ausmaß der direkten Schädigung vorliegen. Daher wird hier ein Proxy-Indikator gewählt, der das Schadenspotenzial und nicht das Ausmaß der Schädigung abbildet. Die Menge des Turbinendurchflusses wird unter Verwendung der Daten zur Stromerzeugung aus Wasserkraft [AGEB 2020a] und empirischer Werte von typischen Wasserkraftwerken errechnet. Die Daten zur Kühlwasserentnahme aus Energieversorgung stammen aus Tabelle 4.2 der Fachserie 19 Reihe 2.2 des Statistischen Bundesamtes [Statistisches Bundesamt 2004, 2006, 2010, 2013, 2016]. Die AGEB-Daten werden jährlich aktualisiert; die Daten zum Kühlwasser liegen bislang dreijährig aktualisiert vor, ab 2020 jährlich.

5.6.2.2 Quantifizierung

Zur Umrechnung der Stromerzeugungsmengen in die Wassermenge aus Laufwasser wurde der empirische Wert der Kraftwerke Baden-Württembergs aus dem Jahr 2010 von 480.000 m³/GWh und für Pumpspeicherwerke der Wert für das Murgwerk von 29.000 m³/GWh angesetzt [Franke et al. 2018]. Diese Annahmen müssen durch weitere Forschungsarbeiten überprüft werden. Fehlende Jahre für Zahlen zum Kühlwassereinsatz wurden geschätzt, um die Vergleichbarkeit mit den Zahlen für den Turbinendurchfluss zu ermöglichen.

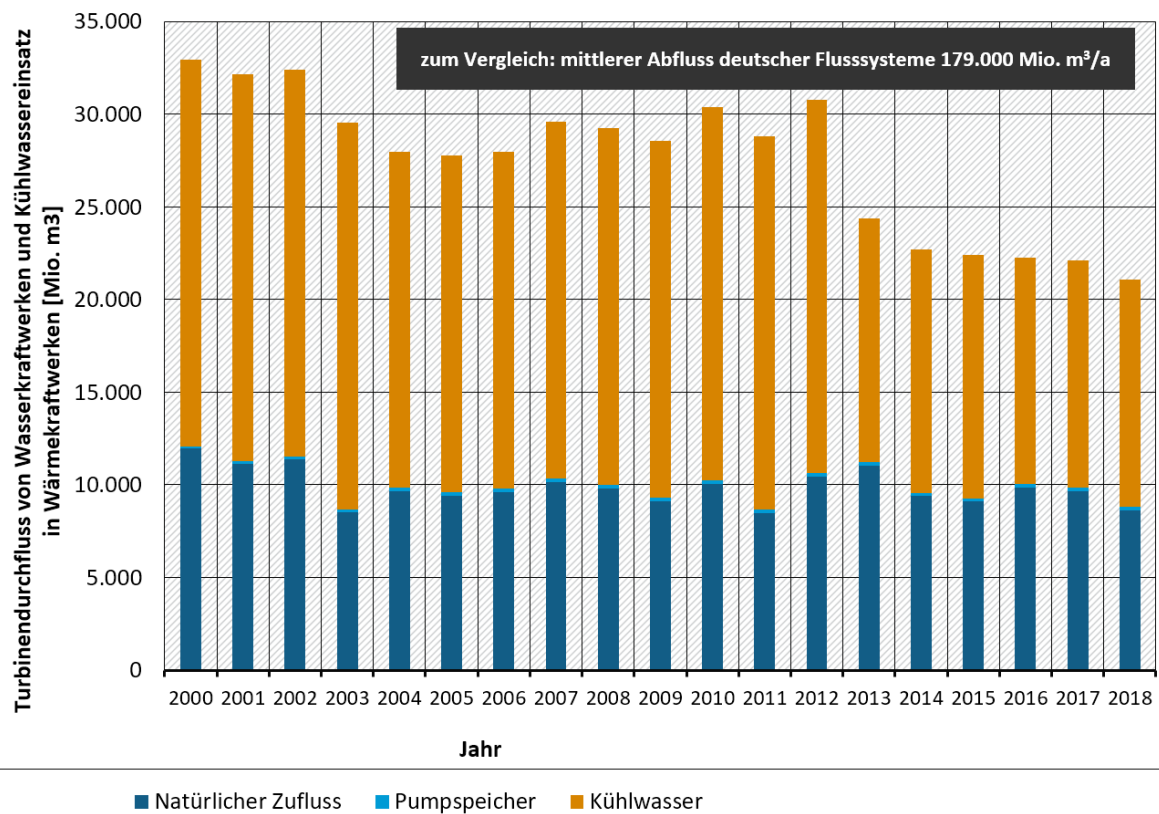
5.6.2.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Abbildung 43 dargestellt; die Zahlenwerte finden sich in Tabelle 34. In der Summe ging die insgesamt genutzte Wassermenge von ca. 33 Mrd. m³ im Jahr 2000 auf ca. 21 Mrd. m³ im Jahr 2018 zurück. Damit sank der Anteil genutzten Wassers von 18% auf 12%, wenn der mittlere Abfluss der Flüsse Deutschlands angesetzt wird. Der Turbinendurchfluss der Laufwasserkraftwerke zeigt eine abnehmende Tendenz, was u.a. auf heiße und trockene Jahre schließen lässt. Der Anteil der Pumpspeicherwerke an der genutzten Wassermenge ist klein. Der größte Rückgang der Wassernutzung ist durch die Stilllegung von Kernkraftwerken bedingt.

5.6.2.4 Bewertung

Aquatische Pflanzen und Tiere werden durch Wasserkraftnutzung und Kühlwasserentnahme getötet oder geschädigt. Hierbei stellt die Wassermenge aus Turbinendurchfluss und das entnommene Kühlwasser das Schadenspotenzial dar. Durch den Rückgang des Turbinendurchflusses von Wasserkraftwerken und des Kühlwassereinsatzes in Wärmekraftwerken, wurde das Schädigungspotenzial von aquatischen Pflanzen und Tieren um ca. 36% reduziert. Eine weitergehende Bewertung mit Beschreibung der Implikationen für den Schutz spezieller Arten oder Lebensräume ist nicht leistbar, da große Unterschiede zwischen der an Standorten und dem Artenbesatz bestehen. So ergab eine Untersuchung an 6 Kraftwerken an Elbe, Weser und Jadebusen Verluste an Fischen von 12,7 t/a bis 91,5 t/a mit z.T. großen Unterschieden in den betroffenen Arten [Sprengel 1997]. Vorsorge wird bei Standortwahl und Anlagenkonzept getroffen. Die Vorsorge kann weiter optimiert werden, z.B. durch Fischtreppen, Fischeicheanlagen und optimierte Einlaufbauwerke mit feinmaschigen Gittern.

Abbildung 43: Turbinendurchfluss von Wasserkraftwerken und Kühlwassereinsatz in Wärmekraftwerken



Quellen: Statistisches Bundesamt, 2003, 2006, 2009, 2013, 2016, 2019. Fachserie 19, Reihe 2.2; AGEB [2020a]; eigene Berechnungen

Tabelle 34: Turbinendurchfluss von Wasserkraftwerken und Kühlwassereinsatz in Wärmekraftwerken, in Mio.m³/a

	Natürlicher Zufluss	Pumpspeicher	Kühlwasser
2000	11.952	131	20.869
2001	11.136	131	20.869
2002	11.376	137	20.869
2003	8.506	150	20.869
2004	9.646	185	18.158
2005	9.426	197	18.158
2006	9.615	196	18.158
2007	10.161	201	19.247
2008	9.813	175	19.247
2009	9.135	164	19.247
2010	10.058	186	20.145
2011	8.483	169	20.145
2012	10.442	177	20.145
2013	11.039	168	13.148
2014	9.402	170	13.148
2015	9.108	172	13.148
2016	9.862	162	12.259
2017	9.672	174	12.259
2018	8.628	179	12.259

Quellen: Statistisches Bundesamt, 2003, 2006, 2009, 2013, 2016, 2019. Fachserie 19, Reihe 2.2; AGEBA [2020a]; eigene Berechnungen

Anmerkung: geschätzte Daten rot markiert

Bewertung der Ergebnisse der Zeitreihe:

Die Summe des Turbinendurchfluss von Wasserkraftwerken und der Kühlwassereinsatz in Wärmekraftwerken gehen seit dem Jahr 2000 stetig **zurück**.

Im Sinne des Indikators ist somit von einer abnehmenden Umweltbelastung auf die betroffenen Schutzgüter auszugehen.

Beurteilung des Indikators:

Der Indikator bildet die zu beschreibende Umweltauswirkung **nur als Proxy** ab, da nicht die Schädigung an Tieren und Pflanzen, sondern nur die Wasserdurchflussmengen beschrieben werden.

Der Indikator umfasst **nur teilweise** die für den Wirkpfad definierten Systemgrenzen.

Die Qualität der für die Berechnung/ Ableitung herangezogenen Daten ist als **akzeptabel** zu bewerten, da teilweise Stützjahre sowie Zeitpunktdaten zur Ableitung verwendet wurden.

5.6.3 Indikator: Installierte Leistung von Windenergieanlagen in Deutschland nach Standort

5.6.3.1 Datengrundlage

Die Indikatoren für den Wirkpfad „Direkte Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen“ sind nur bedingt bewertbar, da keine Daten für das Ausmaß der direkten Schädigung vorliegen. Daher wird hier ein Proxy-Indikator gewählt, der Hinweise auf das Schadenspotenzial geben kann und nicht das Ausmaß der Schädigung abbildet. Für die installierte Leistung von Windenergieanlagen liegen offizielle und regelmäßig aktualisierte Daten vor. Die Zahlen zur installierten Leistung von WEA in Deutschland wurden [BMWi 2020b] entnommen. Angaben zu WEA im Wald wurden [Quentin 2020] entnommen.

5.6.3.2 Quantifizierung

Die installierte Leistung der Offshore-WEA und WEA im Wald wurde den Quellen direkt entnommen, die Leistung der Anlagen im Offenland wurde ab dem Jahr 2009 durch Subtraktion der WEA im Wald von den Onshore-WEA bestimmt. Für die Jahre 2000 bis 2008 entspricht die installierte Leistung an Offenland-WEA den Daten der Onshore-WEA. Für diese Jahre können nach [Quentin 2020] aufgrund der fehlenden Datengrundlage keine installierten Leistungen für Waldanlagen ausgewiesen werden. Eine qualitative Aussage zwischen Anlagenstandorten ist somit ab dem Jahr 2009 möglich.

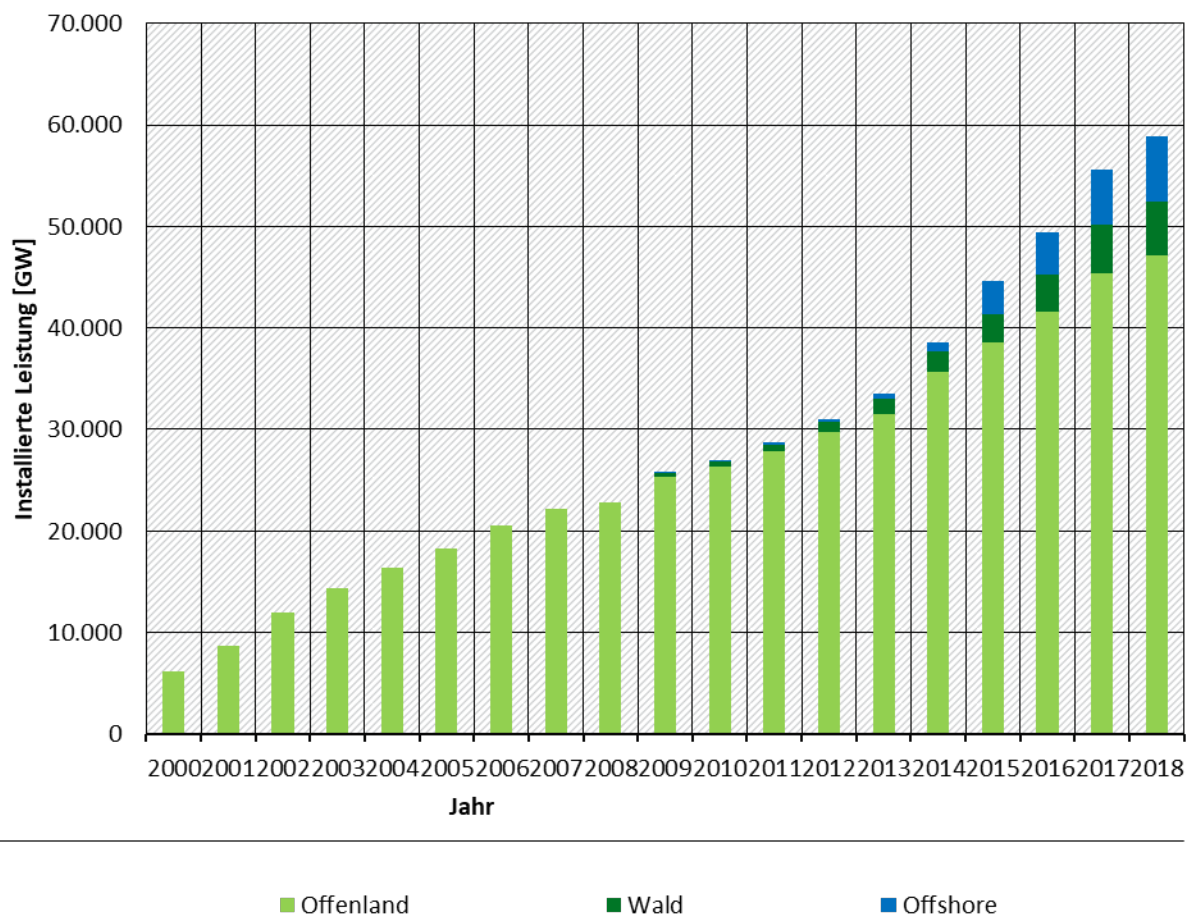
5.6.3.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Abbildung 44 dargestellt; die Zahlenwerte finden sich in Tabelle 35. Die Leistung der Onshore-WEA stieg von 2000 bis 2018 um den Faktor 7,7. Von den 52,5 GW installierten Leistung im Jahr 2018 sind ca. 9% Standorte im Wald und 11% Offshore-Standorte; die restlichen 80% der Standorte sind Offenland.

5.6.3.4 Bewertung

Vögel und Fledermäuse können durch Windenergieanlagen direkt geschädigt bzw. ihr Lebensraum beeinträchtigt werden; die Angaben zur installierten Leistung dienen lediglich als Proxy-Indikatoren. Die installierte Leistung von WEA an Land ist von 2000 bis 2018 gestiegen. In welchem Ausmaß Tiere tatsächlich geschädigt werden, lässt sich auf Grundlage der vorliegenden Daten nicht verlässlich ermitteln. Eine weitergehende Bewertung mit Beschreibung der Implikationen für den Schutz spezieller Arten oder Lebensräume kann somit im Rahmen dieser Untersuchung nicht geleistet werden. Vorsorge wird bereits bei Standortwahl und Anlagenkonzept getroffen (z.B. Abschaltung der WEA bei Vogelzug).

Abbildung 44: Installierte Leistung von Windenergieanlagen in Deutschland nach Standort



Quelle: BMWi 2020b und Quentin 2020

Tabelle 35: Installierte Leistung von Windenergieanlagen in Deutschland nach Standort, in GW

	Offenland	Wald	Offshore
2000	6.097	0	0
2001	8.738	0	0
2002	11.976	0	0
2003	14.381	0	0
2004	16.419	0	0
2005	18.248	0	0
2006	20.474	0	0
2007	22.116	0	0
2008	22.794	0	0
2009	25.259	438	35
2010	26.308	515	80
2011	27.809	715	188
2012	29.743	968	268
2013	31.557	1.412	508
2014	35.632	1.988	994
2015	38.578	2.719	3.283
2016	41.548	3.735	4.152
2017	45.424	4.750	5.406
2018	47.169	5.278	6.396

Quelle: BMWi 2020b und Quentin 2020

Bewertung der Ergebnisse der Zeitreihe:

Die installierte Leistung von Windenergieanlagen nimmt für alle Standorttypen (Offenland, Wald, Offshore) seit dem Jahr 2000 kontinuierlich zu.

Im Sinne des Indikators ist somit von einer zunehmenden Umweltbelastung auf die betroffenen Schutzgüter auszugehen.

Beurteilung des Indikators:

Der Indikator bildet die zu beschreibende Umweltauswirkung **nur als Proxy** ab, da nicht die Schädigung der Avifauna beschrieben wird, sondern die Umweltbewertung anhand einer unterstellten Kausalität der Leistung von Windenergieanlagen und einer nicht näher spezifizierbaren Menge an getöteten Individuen vorgenommen wird.

Der Indikator umfasst **nur teilweise** die für den Wirkpfad definierten Systemgrenzen.

Die Qualität der für die Berechnung/ Ableitung herangezogenen Daten ist als **mäßig** zu bewerten, da keine durchgehenden Zeitreihen verfügbar sind und die Qualität der Verbandsdaten nicht geklärt ist.

5.6.4 Indikator: Übertragungsnetz-Trassen in Deutschland

5.6.4.1 Datengrundlage

Die Indikatoren für den Wirkpfad „Direkte Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen“ sind nur bedingt bewertbar, da keine Daten für das Ausmaß der direkten Schädigung vorliegen. Daher wird hier ein Proxy-Indikator gewählt, der das Schadenspotenzial und nicht das Ausmaß der Schädigung abbildet. Angaben zur Länge der Übertragungsnetztrassen im Höchstspannungsnetz (9.200 km 220 kV; 14.900 km 380 kV) bis 2013 wurden der Studie zu den BMWi-Langfristszenarien entnommen [Pfluger et al. 2017]. Die darin ausgewiesenen Daten geben jedoch nur die Länge für das Jahr 2013 an.

Zeitreihen zur Entwicklung der Trassenlänge des Übertragungsnetzes ab 2014 sind derzeit nicht verfügbar. Sie können jedoch aus dem Verhältnisses Stromkreis-km/Trassen-km errechnet werden.

Daten für die Trassenlängen des Hoch- und Mittelspannungsnetzes konnten nicht ermittelt werden.

5.6.4.2 Quantifizierung

Die Werte für 2013 (9.200 km 220 kV; 14.900 km 380 kV) wurden der Quelle direkt entnommen. Nach [Pfluger et al. 2017] sind sie das Ergebnis einer Modellrechnung und stellen im Vergleich zur Realität eine Abschätzung nach oben darstellen. Die tatsächlichen Trassenlängen würden in der Summe bei etwa 18.000 bis 19.000 km liegen. Die Daten wurden für alle anderen Berichtsjahre angesetzt.

Nach dem Bericht „Monitoring des Stromnetzausbaus Viertes Quartal 2019“ [Bundesnetzagentur 2020] wurden bis 2019 ca. 906 km von geplanten 1.826 km neuen Leitungen der Vorhaben aus dem Energieleitungsbaugesetz (EnLAG) realisiert. Von der Gesamtlänge der 5.830 km Leitungen nach dem Bundesbedarfsplangesetz (BBPlG) wurden bis Ende 2019 insgesamt 372 km fertiggestellt. Unter der Annahme eines Verhältnisses Stromkreis-km/Trassen-km von 1,4 [Franke et al., 2017] wird die EnLAG/BBPlG-Trassenlänge mit 912 km errechnet und für das 380 kV-Netz dem Jahr 2016 zugeordnet.

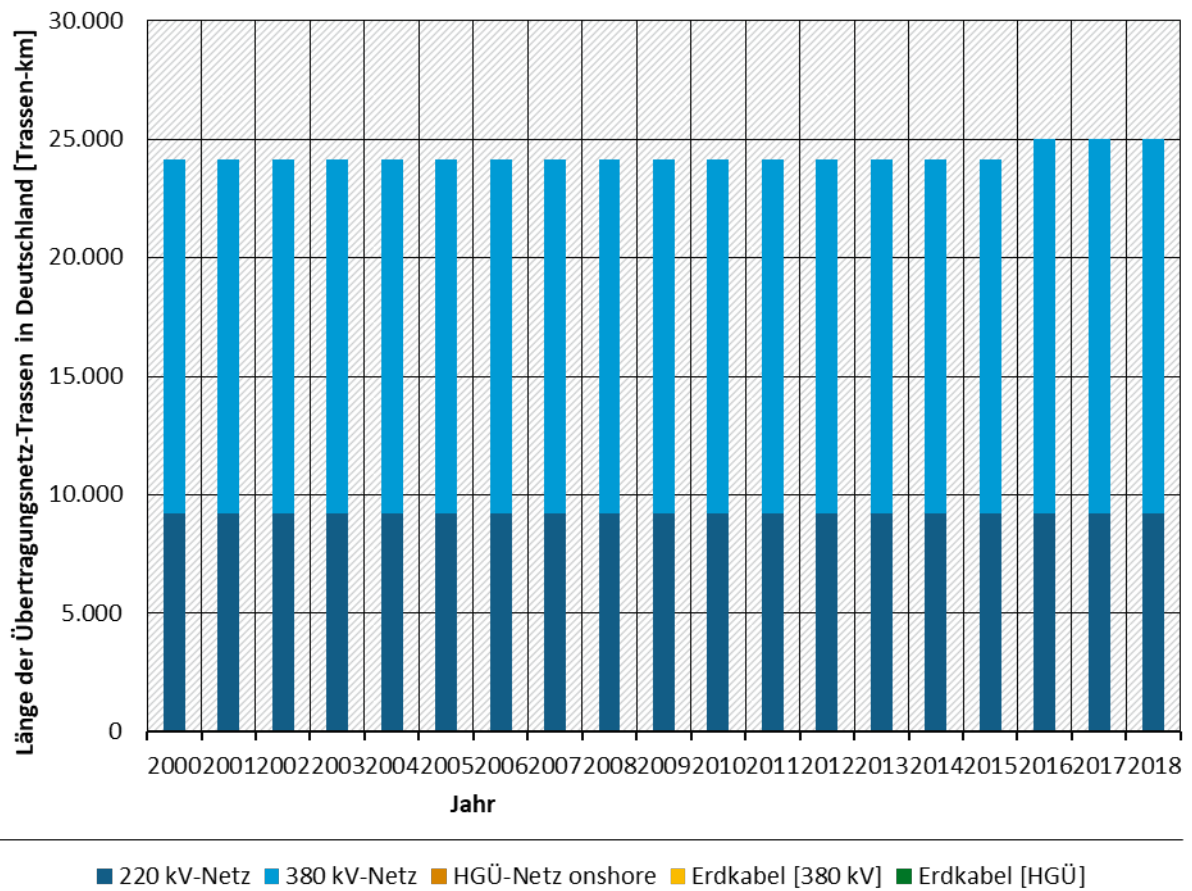
5.6.4.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Abbildung 45 dargestellt; die Zahlenwerte finden sich in Tabelle 36. Von 2000 bis 2018 hat sich die Länge der Trassen somit um 3% erhöht.

5.6.4.4 Bewertung

Vögel, Fledermäuse und Insekten können durch Höchstspannungsleitungen direkt geschädigt bzw. ihr Lebensraum beeinträchtigt werden; die Trassenlänge dient als Proxi-Indikator. Von 2000 bis 2018 gab es nur einen geringen Netzausbau um 4%; das zusätzliche Schädigungspotenzial ist somit klein, wird jedoch bei weiterem Netzausbau steigen. Eine weitergehende Bewertung mit Beschreibung der Implikationen für den Schutz spezieller Arten oder Lebensräume ist nicht leistbar. Vorsorge wird bei der Planung der Trassenführung und der technischen Ausgestaltung (z.B. Erdkabel) getroffen.

Abbildung 45: Länge der Übertragungsnetz-Trassen in Deutschland



Quelle: Pflüger et al. [2017], Bundesnetzagentur [2020], Berechnung ifeu

Anmerkung: Bislang keine Zeitreihe verfügbar. Annahme: Daten für 2013 gelten auch für 2000 bis 2015, danach Zubau von 912 km Trassenlänge (errechnet) addiert

Tabelle 36: Länge der Übertragungsnetz-Trassen in Deutschland, in km

	220 kV-Netz	380 kV-Netz	HGÜ-Netz Onshore	Erdkabel [380 kV]	Erdkabel [HGÜ]
2000	9.237	14.886	-	-	-
2001	9.237	14.886	-	-	-
2002	9.237	14.886	-	-	-
2003	9.237	14.886	-	-	-
2004	9.237	14.886	-	-	-
2005	9.237	14.886	-	-	-
2006	9.237	14.886	-	-	-
2007	9.237	14.886	-	-	-
2008	9.237	14.886	-	-	-
2009	9.237	14.886	-	-	-
2010	9.237	14.886	-	-	-
2011	9.237	14.886	-	-	-
2012	9.237	14.886	-	-	-
2013	9.237	14.886	-	-	-
2014	9.237	14.886	-	-	-
2015	9.237	14.886	-	-	-
2016	9.237	15.798	-	-	-
2017	9.237	15.798	-	-	-
2018	9.237	15.798	-	-	-

Quelle: Pfluger et al. [2017], Bundesnetzagentur [2020], Berechnung ifeu

Bewertung der Ergebnisse der Zeitreihe:

Länge der Übertragungsnetz-Trassen in Deutschland bleibt von 2000 bis 2015 konstant und stieg dann nur geringfügig an.

Im Sinne des Indikators ist somit von einer gleichbleibenden Umweltbelastung auf die betroffenen Schutzgüter auszugehen.

Beurteilung des Indikators:

Der Indikator bildet die zu beschreibende Umweltauswirkung **nur als Proxy** ab, da nicht die Schädigung der Avifauna beschrieben wird, sondern die Umweltbewertung anhand einer unterstellten Kausalität von Länge der Übertragungsnetz-Trassen und einer nicht näher spezifizierbaren Menge an getöteten Individuen vorgenommen wird.

Der Indikator umfasst **nur teilweise** die für den Wirkpfad definierten Systemgrenzen.

Die Qualität der für die Berechnung/ Ableitung herangezogenen Daten ist als **mäßig** zu bewerten, da keine durchgehenden Zeitreihen zur Verfügung stehen und die Ableitung mit Unsicherheiten behaftet ist.

5.7 Wirkpfad Risiko der Kernenergie

5.7.1 Indikator: Nukleare Stromerzeugung in Deutschland und Nachbarländern

5.7.1.1 Datengrundlage

Für diesen Indikator liegen verlässliche jährlich aktualisierte Daten vor. Hier wurden die Daten nuklearen Bruttostromerzeugung aus der gebührenpflichtigen Datenbank *World Energy Statistics* der International Energy Agency [IEA, 2020] für die ausgewählten Länder abgerufen. Diese stehen jährlich aktualisiert zur Verfügung.

5.7.1.2 Quantifizierung

Die Daten der Datenbank wurden direkt verwendet. Sie beschreiben den darzustellenden Sachverhalt hinreichend, die Datenqualität kann als valide bewertet werden.

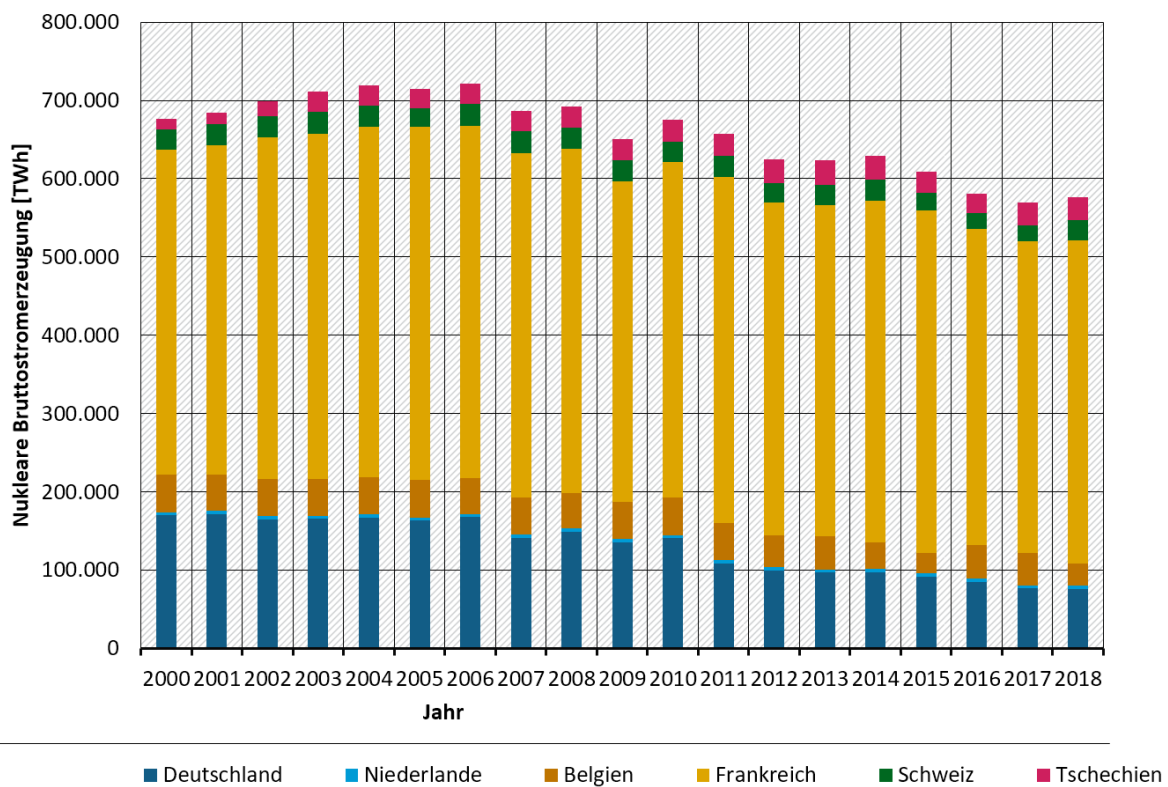
5.7.1.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Abbildung 46 dargestellt; die Zahlenwerte finden sich in Tabelle 37. Während in Deutschland die nukleare Stromerzeugung von 2000 bis 2018 um 55% gesunken ist, betrug der Rückgang in der Summe aller betrachteten Länder lediglich 15%. Der Anteil der nuklearen Stromerzeugung in Deutschland an der Summe aller betrachteten Länder ging von 25% im Jahr 2000 auf 13% im Jahr 2018 zurück.

5.7.1.4 Bewertung

Der Indikator beschreibt das Risiko für das Schutzgut Menschen durch schwere Unfälle in Kernkraftwerken durch Nutzung der Kernenergie. Ein Risiko der Bevölkerung Deutschlands durch schwere Unfälle in Kernkraftwerken besteht auch nach dem Abschalten des letzten Reaktors in Deutschland, da in den Nachbarländern Kernenergie weiter genutzt wird. Es wird durch den Atomausstieg in Deutschland und das Abschalten von Kernkraftwerken in Nachbarländern weiter abnehmen. Eine Schärfung des Indikators (z.B. Erhebung der Stromerzeugung in Kernkraftwerken in Abhängigkeit von der Entfernung zu Bevölkerungsschwerpunkten) wäre sehr aufwändig.

Abbildung 46: Nukleare Bruttostromerzeugung in Deutschland und Nachbarländern



Quelle: International Energy Agency, World Energy Statistics Database [online, 2020]

Tabelle 37: Nukleare Bruttostromerzeugung in Deutschland und Nachbarländern, in TWh

	Deutschland	Niederlande	Belgien	Frankreich	Schweiz	Tschechien
2000	169.606	3.926	48.157	415.162	26.446	13.590
2001	171.305	3.976	46.349	421.076	26.811	14.749
2002	164.842	3.915	47.360	436.760	27.234	18.738
2003	165.060	4.018	47.379	441.070	27.487	25.872
2004	167.065	3.822	47.312	448.241	26.958	26.325
2005	163.055	3.997	47.595	451.529	23.341	24.728
2006	167.269	3.469	46.645	450.191	27.819	26.046
2007	140.534	4.200	48.227	439.730	27.925	26.172
2008	148.495	4.169	45.568	439.447	27.700	26.551
2009	134.932	4.248	47.222	409.736	27.686	27.208
2010	140.556	3.969	47.944	428.521	26.339	27.998
2011	107.971	4.141	48.234	442.388	26.710	28.283
2012	99.460	3.915	40.295	425.406	25.441	30.324
2013	97.290	2.891	42.644	423.685	25.990	30.745
2014	97.129	4.091	33.703	436.479	27.557	30.325
2015	91.786	4.077	26.103	437.428	23.089	26.841
2016	84.634	3.960	43.523	403.195	21.146	24.104
2017	76.324	3.402	42.227	398.359	20.376	28.340
2018	76.005	3.515	28.597	412.962	25.513	29.921

Quelle: International Energy Agency, World Energy Statistics Database [IEA, 2020]

Bewertung der Ergebnisse der Zeitreihe:

Die nukleare Bruttostromerzeugung in Deutschland und Nachbarländern unterliegt gewissen Schwankungen und nimmt nur im begrenzten Umfang ab.

Im Sinne des Indikators ist somit von einer gleichbleibenden Umweltbelastung auf die betroffenen Schutzgüter auszugehen.

Beurteilung des Indikators:

Der Indikator bildet die zu beschreibende Umweltauswirkung **nur als Proxy** ab, da das Risiko nur anhand der nuklearen Bruttostromerzeugung in Deutschland und Nachbarländern quantifiziert wird.

Der Indikator umfasst **nahezu vollständig** die für den Wirkpfad definierten Systemgrenzen.

Die Qualität der für die Berechnung/ Ableitung herangezogenen Daten ist als **akzeptabel** zu bewerten, da nicht kostenfrei und damit nicht öffentlich zugänglich.

5.7.2 Indikator: Kernbrennstoff aus deutschen Leistungsreaktoren, oberirdisch gelagert

5.7.2.1 Datengrundlage

Für diesen Indikator liegen verlässliche und regelmäßig aktualisierte Daten aus einer öffentlichen Quelle vor. Seit 2014 veröffentlicht das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit das Verzeichnis radioaktiver Abfälle [BMUB 2014, 2015, 2018].

5.7.2.2 Quantifizierung

Die Daten der genannten Quelle wurden direkt verwendet. Werte liegen in den verfügbaren Publikationen nur für die Einzeljahre 2013, 2014 und 2017 vor. Es ist wahrscheinlich, dass die Daten fortlaufend und vermutlich auch rückwirkend zur Verfügung stehen. Die maximale Menge an oberirdisch gelagerten Brennelementen aus Kernkraftwerken wird mit der Abschaltung des letzten Kernkraftwerks Ende 2022 nicht weiter zunehmen, während sich die Lagerorte jedoch ändern können. Daten für fehlende Jahre müssten erhoben werden.

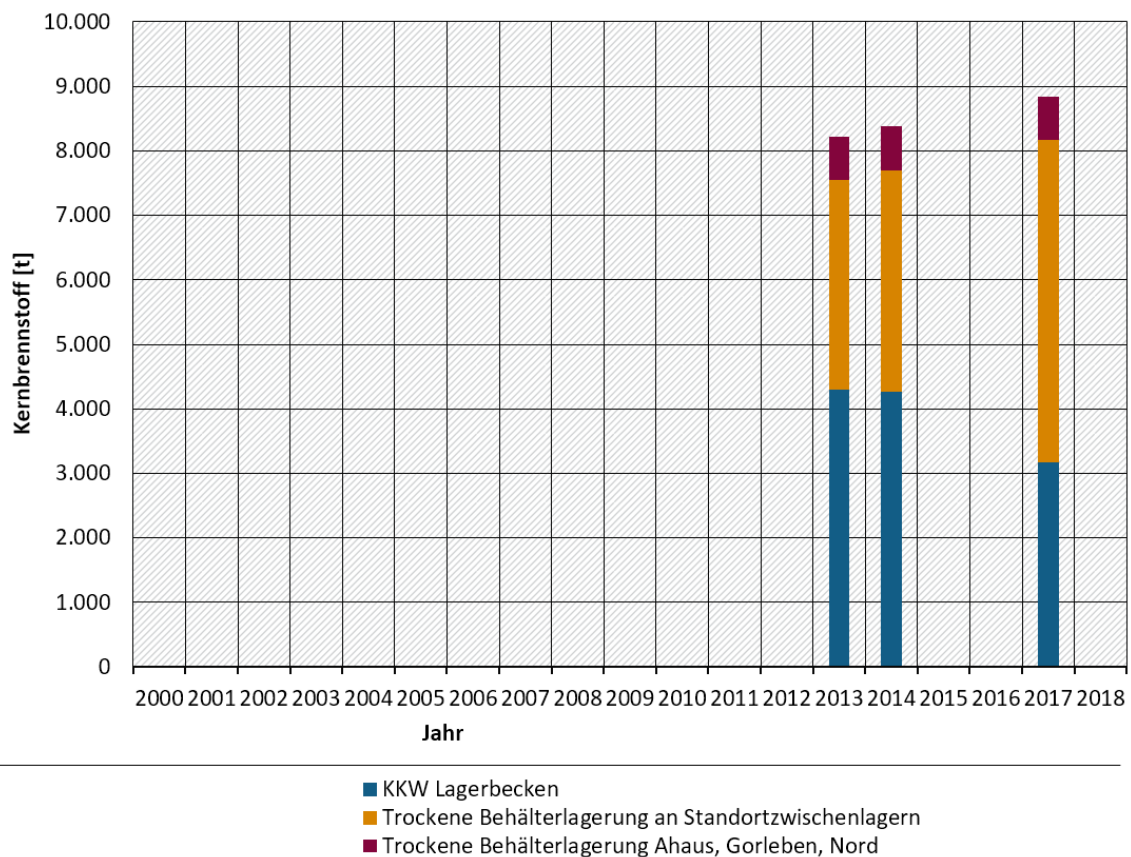
5.7.2.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Abbildung 47 dargestellt; die Zahlenwerte finden sich in Tabelle 38. Seit 2013 bis 2017 hat sich die Menge an oberirdisch gelagerten hochradioaktiven Abfällen aus Kernbrennstoffen um 8% auf 8.839 t erhöht, davon wurden 64% in trockenen Behältern und 36% in KKW-Lagerbecken gelagert.

5.7.2.4 Bewertung

Der Indikator beschreibt das Risiko für das Schutzgut Menschen durch schwere Unfälle in Verbindung mit hochradioaktiven Abfallstoffen. Die Angabe der Menge von Brennelementen aus deutschen Leistungsreaktoren für die Endlagerung, die noch oberirdisch gelagert sind, ist eine geeignete Kenngröße. Bis zur Endlagerung wird der Kernbrennstoff zunehmend in trockenen Behältern gelagert. Eine Schärfung des Indikators (z.B. Erhebung der Lagerorte in Abhängigkeit von der Entfernung zu Bevölkerungsschwerpunkten) wäre sehr aufwändig und verspricht wenig Erkenntnisgewinn.

Abbildung 47: Kernbrennstoff aus deutschen Leistungsreaktoren, oberirdisch gelagert



Verzeichnis radioaktiver Abfälle [BMUB 2014, 2015, 2018]

Tabelle 38: Kernbrennstoff aus deutschen Leistungsreaktoren, oberirdisch gelagert, in t

	KKW Lagerbecken	Trockene Behälterlagerung an Standortzwischenlagern	Trockene Behälterlagerung Ahaus, Gorleben, Nord
2013	4.292	3.249	675
2014	4.258	3.444	677
2015	k.A.	k.A.	k.A.
2016	k.A.	k.A.	k.A.
2017	3.167	4.995	677
2018	k.A.	k.A.	k.A.

Quelle: Verzeichnis radioaktiver Abfälle [BMUB 2014, 2015, 2018]

Bewertung der Ergebnisse der Zeitreihe:

Die oberirdisch gelagerte Menge an Kernbrennstoff aus deutschen Leistungsreaktoren nimmt zu.

Im Sinne des Indikators ist somit von einer zunehmenden Umweltbelastung auf die betroffenen Schutzgüter auszugehen.

Beurteilung des Indikators:

Der Indikator bildet die zu beschreibende Umweltauswirkung **nur als Proxy** ab, da das Risiko nur anhand der oberirdisch gelagerten Kernbrennstoffe aus deutschen Leistungsreaktoren quantifiziert wird.

Der Indikator umfasst **nahezu vollständig** die für den Wirkpfad definierten Systemgrenzen.

Die Qualität der für die Berechnung/ Ableitung herangezogenen Daten ist als **akzeptabel** zu bewerten, da keine durchgehende Zeitreihe verfügbar ist.

6 Ergebnisse und Defizitanalyse

6.1 Ergebnisse

Die nachfolgende Abbildung 48 zeigt eine zusammenfassende Übersicht der in Kapitel 5 in den grünen Text Boxen formulierten Ergebnisse der einzelnen Indikatoren (Spalte Ergebnisse Indikator). Basierend auf diesen Ergebnissen wird ein Trend für die Wirkpfade abgeleitet. Es werden Aussagen dazu generiert, ob die Umweltbelastungen über den Wirkpfad zunehmen, abnehmen oder gleichbleiben. Bei gegenläufigen Ergebnissen einzelner Indikatoren innerhalb eines Wirkpfades (was fast immer der Fall ist) werden entsprechende Abwägungsentscheide getroffen. Damit diese Abwägungen keinen zu großen ergebnisrelevanten Einfluss haben, werden die Umweltauswirkungen auf die Schutzgüter anhand der einzelnen Indikatoren bestimmt.

Folgendes Ergebnis lässt sich dabei festhalten:

- ▶ Die Umweltauswirkungen über den Wirkpfad Luftgetragene Schadstoffe nehmen nach Auswertung der Ergebnisse aller betrachteten Indikatoren in der Summe ab. Ebenso die Umweltauswirkungen über den Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden. Eine Ausnahme stellt Ammoniak dar: Hier sind die Emissionen aus der Ausbringung von Gärresten aus dem Energiepflanzenanbau seit dem Referenzjahr 2000 sehr stark gestiegen.
- ▶ Die Umweltauswirkungen über den Wirkpfad Geräusch, Licht- und Wärmeemissionen bleiben in der Summe gleich, zunehmende Umweltbelastungen bei den Geräuschentwicklungen stehen langfristig entlastend wirkenden Entwicklungen bei den Wärmeeinträgen in die Gewässer entgegen.
- ▶ Die Umweltauswirkungen über den Wirkpfad Flächeninanspruchnahme nehmen zu.
- ▶ Die Umweltauswirkungen über den Wirkpfad Rohstoffe bleiben in der Gesamtbetrachtung gleich.
- ▶ Die Umweltauswirkungen über den Wirkpfad direkte Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen nehmen in der Summe zu, wobei in einer vertieften Betrachtung zwischen den belastenden und den entlastenden Trends unterschieden werden muss.
- ▶ Die im Exkurs betrachteten Umweltauswirkungen der Kernenergie bleiben in Summe gleich.

Es zeigt sich, dass mit dem ausgewählten Set an Indikatoren im Endeffekt für nahezu alle Schutzgüter positive wie negative Umweltauswirkungen festgestellt werden (Ausnahme Fläche und Landschaft, hier nur negative Auswirkungen). Doch die hier formulierten und in der Abbildung 48 grafisch aufbereiteten Ergebnisse reflektieren noch nicht die qualitative Beurteilung der Indikatoren. Diese wird in Kapitel 6.2 ergänzt und ist wesentlich für die angemessene Beurteilung der Umweltauswirkungen auf die einzelnen Schutzgüter, die in Kapitel 6.3 erfolgt.

Abbildung 48: Matrix zur Zusammenfassung der Ergebnisse

Wirkpfade	Indikatoren	Ergebnisse Indikator	Trend Wirkpfad	Bewertung Umweltbelastung auf Schutzgüter								
				M	T/P/B	F	B	W	Lu	La	KS	R
Luftschadstoffe	Emissionen von Stickoxiden aus dem Energiesystem	nimmt ab	nimmt ab	E	E				E		E	
	Emissionen von Schwefeloxiden aus dem Energiesystem	nimmt ab		E	E				E		E	
	Emissionen von Feinstaub aus dem Energiesystem	nimmt ab		E	E				E			
	Emissionen von Black Carbon (BC) aus dem Energiesystem	nimmt ab		E	E				E			
	Emissionen von Kohlenmonoxid aus dem Energiesystem	nimmt ab		E	E				E			
	Emissionen von Quecksilber (Hg) aus dem Energiesystem	bleibt gleich		O	O				O			
	Emissionen von Ammoniak aus dem Energiesystem	nimmt zu		Z	Z				Z			
	attributable Todesfälle durch Luftschadstoffe in Deutschland	nimmt ab		E	E							
Emissionen in Wasser und Boden	Abwasser aus dem Energiesystem	nimmt ab	nimmt ab	E	E			E				
	Emissionen von eutrophierenden Stoffen aus dem Energiesystem in die Luft	nimmt ab			E		E	E			E	
	Emissionen von versauernden Stoffen aus dem Energiesystem in die Luft	nimmt ab			E		E	E			E	
	Stickstoffüberschuss in Böden aus dem Anbau von Energiepflanzen	nimmt zu			Z		Z	Z			Z	
Geräusch, Licht- und Wärme-emissionen	Lärmbelastungspotenzialflächen	nimmt zu	bleibt gleich	Z	Z							
	Entnahme von Kühlwasser durch das Energiesystem	nimmt ab			E			E				
Flächeninanspruchnahme	Temporäre Flächenbelegung durch das Energiesystem	nimmt zu	nimmt zu		Z	Z	Z			Z		
	Temporäre Flächenbelegung durch das Energiesystem (Hemerobie-gewichtet)	nimmt zu			Z	Z	Z			Z		
	Indirekte Flächeninanspruchnahme mit Auswirkungen auf das Landschaftsbild	nimmt zu		Z	Z	Z				Z	Z	
Rohstoff-nutzung	Durch das Energiesystem verbrauchte Rohstoffe nach Rohstoffen bzw. Rohstoffgruppen	bleibt gleich	bleibt gleich									O
	Materialkonsum im Bereich der Energieinfrastruktur in Deutschland	-										O
Direkte Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen	Veränderung der Flächeninanspruchnahme zum Vorjahr durch das Energiesystem	nimmt zu	nimmt zu		Z							
	Turbinendurchfluss von Wasserkraftwerken und Kühlwassereinsatz in Wärmekraftwerken	nimmt ab			E							
	Installierte Leistung von Windenergieanlagen in Deutschland nach Standort	nimmt zu			Z							
	Übertragungsnetz-Trassen in Deutschland	bleibt gleich			O							
Kernenergie	Nukleare Stromerzeugung in Deutschland und Nachbarländern	bleibt gleich	bleibt gleich	O	O						O	
	Kernbrennstoff aus deutschen Leistungsreaktoren, oberirdisch gelagert	nimmt zu		Z								
Legende:												
Abkürzung der Schutzgüter: M = Mensch; T/P/B = Tiere / Pflanzen / Biodiversität; F = Fläche; B = Boden; W = Wasser; Lu = Luft; La = Landschaft; KS = Kultur- und sonstige Sachgüter; R = Rohstoffe						Wie können die Ergebnisse der Indikatoren bzw. Trendaussagen für die Wirkpfade auf die Schutzgüter bewertet werden? E = Entlastung im Sinne von abnehmenden Auswirkungen Z = Zusatzbelastung im Sinne von zunehmenden Auswirkungen O = Ohne Änderung ----- leer = Schutzgut im Modell nicht betroffen von Wirkpfad						

Quelle: eigene Darstellung ifeu 2020

6.2 Systemgrenzen und Treffsicherheit der Indikatoren

Die nachfolgende Abbildung 49 fasst die im Rahmen von Kapitel 5 durchgeführte qualitative Beurteilung der einzelnen Indikatoren zusammen. Die Indikatoren wurden jeweils anhand der folgenden Leitfragen beurteilt:

- Wie bildet der Indikator die zu beschreibende Umweltauswirkung ab?
- Wie umfasst der Indikator die für den Wirkpfad definierten Systemgrenzen?
- Wie ist die Qualität der für die Berechnung/ Ableitung notwendigen Daten zu bewerten?

Das Thema der **Systemgrenzen** bedarf an dieser Stelle einer weiteren vertieften Betrachtung. Sie wurden für jeden Wirkpfad separat spezifiziert. Dafür wurde das in Kapitel 3.3.2 dargestellte grundlegende Systemraummodell auf die jeweils im Wirkpfad relevanten Bestandteile des Systemraums fokussiert. Im Rahmen der Indikatorenableitung wurde dann überprüft, ob die ausgewählten Indikatoren den für den Wirkpfad definierten Systemraum auch vollumfänglich beschreiben. Unterschiede zwischen dem „Soll“ und dem „Ist“ wurden im Unterkapitel Ableitung der Indikatoren transparent dargestellt. In der Gesamtschau zeigt sich unter II in Abbildung 49, dass die Indikatoren in den Wirkpfaden Luftgetragene Schadstoffe, Flächeninanspruchnahme und Rohstoffnutzung tendenziell geringe Abweichungen zum definierten Systemraum zeigen, sprich die Repräsentativität für die Umweltauswirkungen der Energiewende hier vergleichsweise hoch sind. Es wird deutlich, dass insbesondere die internationalen Vorketten der Energieträger nicht konsistent abbildbar sind.

Größere Abweichungen zwischen „Soll“ und „Ist“ ergeben sich insbesondere im Wirkpfad Geräusch-, Licht- und Wärmeemissionen. Insbesondere der ausgearbeitete Indikator für die Lärm-potenzialflächen umfasst nur eine stark eingegrenzte Auswahl an möglichen Emissionsquellen im Systemraum, Lichtemissionen konnten gar nicht abgebildet werden. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Ausgestaltung der Systemgrenzen in jedem Indikator leicht unterschiedlich ist, diese Abweichungen aber für die Mehrheit der Indikatoren als tolerierbar bewertet werden kann, da die relevanten Emittenten im Systemraum stets erfasst werden.

Die Ergebnisse der Beurteilung der Indikatoren sind in den grünen TextBoxen in Kapitel 5 dokumentiert und finden sich in der untenstehenden Matrix in den Zeilen „Bewertung der Indikatoren“ wieder. Diese Darstellung wird ergänzt um eine Beurteilung darüber, wie der Wirkpfad durch die Indikatoren abgebildet ist (unter IV in Tabelle 49). Dabei wird wie folgt unterschieden:

- „Komplett“ im Sinne von: die gewählten Indikatoren beschreiben alle potenziellen Umweltfolgen über den Wirkpfad
- „Hinreichend“ im Sinne von: die gewählten Indikatoren beschreiben alle relevanten Umweltfolgen über den Wirkpfad
- „in Auszügen“ im Sinne von: die gewählten Indikatoren beschreiben Umweltfolgen über den Wirkpfad ohne Anspruch auf Vollständigkeit

Die nachfolgende Abbildung 49 zeigt die grafische Umsetzung der Bewertung. Es zeigt sich, dass insbesondere die Wirkpfade Luftgetragene Schadstoffe, Flächeninanspruchnahme und Rohstoffnutzung durch die gewählten Indikatoren hinreichend abgebildet werden können.

Der Wirkpfad Emissionen in Wasser und Boden wird zwar mit Indikatoren hinreichender Güte bedient, jedoch beschreiben diese nicht alle potenziellen Umweltfolgen, die über diesen Wirkpfad entstehen können. Die Wirkpfade Geräusch-, Licht- und Wärme-emissionen sowie direkte Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen werden ebenso wie die im Rahmen des Exkurses zur Kernenergie dargestellten Umweltauswirkungen vornehmlich von Proxy-Indikatoren beschrieben, wobei diese die potenziellen Umweltfolgen durch direkte Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen über den Wirkpfade nicht vollumfänglich abbilden können..

Abbildung 49: Matrix zu Beurteilung der Treffsicherheit der Indikatoren

Wirkpfade	Indikatoren	Bewertung Indikator			Bewertung WP	Bewertung Schutzgüter								
		I	II	III		IV	M	T/P/B	F	B	W	Lu	La	KS
Luftschadstoffe	Emissionen von Stickoxiden aus dem Energiesystem	A	A	A	A	B	B				A		B	
	Emissionen von Schwefeloxiden aus dem Energiesystem	A	A	A		B	B				A		B	
	Emissionen von Feinstaub aus dem Energiesystem	A	A	A		B	B				A			
	Emissionen von Black Carbon (BC) aus dem Energiesystem	A	A	A		B	B				A			
	Emissionen von Kohlenmonoxid aus dem Energiesystem	A	A	A		B	B				A			
	Emissionen von Quecksilber (Hg) aus dem Energiesystem	A	A	A		B	B				A			
	Emissionen von Ammoniak aus dem Energiesystem	A	A	A		B	B				A			
	attributable Todesfälle durch Luftschadstoffe in Deutschland	A	-	-		A	C							
Emissionen in Wasser und Boden	Abwasser aus dem Energiesystem	C	B	A	B	C	B			B				
	Emissionen von eutrophierenden Stoffen aus dem Energiesystem in die Luft	B	A	A			B		B	B			B	
	Emissionen von versauernden Stoffen aus dem Energiesystem in die Luft	B	A	A			B		B	B			B	
	Stickstoffüberschuss in Böden aus dem Anbau von Energiepflanzen	A	A	B			B		B	B			B	
Geräusch, Licht- und Wärme-emissionen	Lärmbelastungspotenzialflächen	B	C	C	C	B	B							
	Entnahme von Kühlwasser durch das Energiesystem	C	B	A			B			C				
Flächeninanspruchnahme	Temporäre Flächenbelegung durch das Energiesystem	A	A	C	A		B	A	A			A		
	Temporäre Flächenbelegung durch das Energiesystem (Hemerobie-gewichtet)	A	A	C			B	A	A			A		
	Indirekte Flächeninanspruchnahme mit Auswirkungen auf das Landschaftsbild	C	C	C		B	C	A				B	B	
Rohstoff-nutzung	Durch das Energiesystem verbrauchte Rohstoffe nach Rohstoffen bzw. Rohstoffgruppen	A	A	C	A									A
	Materialkonsum im Bereich der Energieinfrastruktur in Deutschland	A	A	C										A
Direkte Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen	Veränderung der Flächeninanspruchnahme zum Vorjahr durch das Energiesystem	C	C	C	C		B							
	Turbinendurchfluss von Wasserkraftwerken und Kühlwassereinsatz in Wärmekraftwerken	C	B	B			B							
	Installierte Leistung von Windenergieanlagen in Deutschland nach Standort	C	B	C			B							
	Übertragungsnetz-Trassen in Deutschland	C	B	C			B							
Kernenergie	Nukleare Stromerzeugung in Deutschland und Nachbarländern	C	A	B	C	B	C						B	
	Kernbrennstoff aus deutschen Leistungsreaktoren, oberirdisch gelagert	C	A	B		B								
Legende:														
I: wie bildet der Indikator die zu beschreibende Umweltauswirkung ab? A = direkt; B = indirekt; C = nur als Proxy						Lassen die Indikatoren über Wirkpfade eine sachgerechte Beurteilung der Umweltauswirkungen auf die betroffenen Schutzgüter zu? A = Ja B = nur Hinweise C = Nein								
II: wie umfasst der Indikator die für den WP definierten Systemgrenzen ? A = nahezu vollständig; B = teilweise; C = nur Auswahl														
III: wie ist die Qualität der für die Berechnung/ Ableitung notwendigen Daten zu bewerten? A = Hoch; B = Akzeptabel; C = Mäßig														
IV: wie ist der Wirkpfad durch die Indikatoren abgebildet? A = komplett B = hinreichend C = in Auszügen						----- leer = Schutzgut im Modell nicht betroffen von Wirkpfad								
Abkürzung der Schutzgüter: M = Mensch; T/P/B = Tiere / Pflanzen / Biodiversität; F = Fläche; B = Boden; W = Wasser; Lu = Luft; La = Landschaft; KS = Kultur- und sonstige Sachgüter; R = Rohstoffe														

Quelle: eigene Darstellung ifeu 2020

Für die Beurteilung der **Trefferbarkeit** der Indikatoren wird bewertet, in wie weit die Indikatoren über die Wirkpfade eine sachgerechte Beurteilung der Umweltauswirkungen auf die betroffenen Schutzgüter erlauben (Spalten Bewertung Schutzgüter). Es ist zu unterscheiden, ob die Ergebnisse der Indikatoren eine direkte Bewertbarkeit darstellen, oder nur Hinweise auf eine potenzielle Umweltveränderung geben können. Die Darstellung in Abbildung 49 zeigt:

- Nur die Schutzgüter **Fläche, Luft und Rohstoffe** werden ausschließlich mit Indikatoren bewertet, die eine sachgerechte Beurteilung der Umweltauswirkungen erlauben.
- Die Schutzgüter **menschliche Gesundheit** sowie **Tiere / Pflanzen / Biodiversität** zeigen ein gemischtes Bild. Insbesondere die Indikatoren für den Wirkpfad Luftschadstoffe und die eng damit im Zusammenhang stehenden Indikatoren zur Beschreibung der Umweltauswirkungen über Emissionen in Wasser und Bodensind zwar qualitativ hinreichend gut abbildbar, , bleiben jedoch auf Ebene der Emissionen stehen und beschreiben somit nur potenzielle Umweltauswirkungen (was sich in der Bewertung B in der Spalte „Bewertung Schutzgüter“ niederschlägt). Hinsichtlich des Schutzgutes **Tiere / Pflanzen / Biodiversität** ist dabei zwingend zu beachten, dass eine Betroffenheit über Luftschadstoffe bzw. deren Deposition mit hinreichender Genauigkeit abbildbar ist, die direkten Auswirkungen auf dieses Schutzgut aber mehrheitlich über Proxy-Indikatoren dargestellt werden, die allenfalls Hinweise auf die potenziellen Umweltfolgen der Energiewende liefern können.
- Die Schutzgüter **Boden** und **Wasser** werden vornehmlich von Indikatoren adressiert, die nur Hinweise auf potenzielle Umweltauswirkungen liefern können, insbesondere wenn es um qualitative Aspekte geht. Die quantitativen Auswirkungen zur Flächeninanspruchnahme können hingegen hinreichend gut abgebildet werden.
- Hinsichtlich der Schutzgüter **Landschaft** sowie **Kulturelles Erbe und sonstige Sachgüter** sind vor allem Hinweise auf potenzielle Umweltauswirkungen ableitbar, wobei spezifische Auswirkungen auf das Schutzgut Landschaft über die Indikatoren zur Flächeninanspruchnahme direkt quantifiziert werden können.

Weiterhin zeigt die Darstellung, dass sich um die Emissionen von Luftschadstoffen valide Cluster bilden, wo die Umweltauswirkungen der Energiewende auf die betroffenen Schutzgüter hinreichend gut mit qualitativ hochwertigen und passgenauen Indikatoren beschrieben werden. Die Bewertbarkeit der Schutzgüter über die anderen Wirkpfade steht demgegenüber etwas zurück, insbesondere betrifft dies die Umweltauswirkungen über den Wirkpfad Geräusch-, Licht und Wärmeemissionen und den Wirkpfad direkte Auswirkungen. Diese Einschränkungen sind bei der Beurteilung der Ergebnisse des Umweltmonitorings der Energiewende entsprechend zu berücksichtigen.

6.3 Auswirkungen des Energiesystems auf die Schutzgüter des UVP

Auf der Grundlage des Praxistests lassen sich die Veränderungen durch das Energiesystem auf die Situation in Deutschland seit dem Jahr 2000 wie folgt bewerten. Teilweise wurden entsprechende Umweltauswirkungen auch schon in der Literatur beschreiben bzw. im Zuge von Szenariobewertungen antizipiert (vgl. Franke B. et al 2018). Dabei werden die in Kapitel 6.1 in der Matrix dargestellten Ergebnisse der einzelnen Indikatoren auf die Schutzgüter mit den Ergebnissen der Beurteilung der Qualität und Aussagekraft der Indikatoren ins Verhältnis gesetzt:

Die Beurteilung des Schutzgutes **Menschen** stützt sich vor allem auf die Veränderungen der Luftqualität und der Risikobewertung der Kernenergie. Den positiven Effekten für die menschliche Gesundheit durch Verbesserung der Luftqualität steht eine potenziell zunehmende Lärmbelastung durch Windenergieanlagen gegenüber, die mit dem verwendeten Indikator allerdings nicht abschließend zuverlässig bewertet werden kann. Die in Wechselwirkungen mit dem Schutzgut **Flächen** entstehenden Wirkungen auf das Landschaftsbild und auf den Menschen (z.B. durch Qualität der Erholung) wurden mit dem Indikator indirekte Flächenwirkung abgebildet, können jedoch auch nicht abschließend zuverlässig bewertet werden. Auswirkungen auf das Schutzgut Mensch durch Lichtemissionen konnten nicht bewertet werden, da dieser Aspekt im Rahmen des Vorhabens nicht mit Hilfe eines Indikators quantifiziert werden konnte.

Die Beeinträchtigung des Schutzgutes **Tiere / Pflanzen / Biodiversität** über luftgetragene Schadstoffe und deren Depositionspotenzial vermindert sich deutlich. Der Eintrag von Stickstoff in die Böden durch Aktivitäten im Energiesystem wird als zunehmende Belastung des Schutzgutes gewertet. Die Schädigung aquatischer Lebensgemeinschaften durch Abwasser aus dem Energiesystem und Wärmeeintrag vermindert sich durch das Abschalten von Kraftwerken mit Durchflusskühlung. Die potenzielle Schädigung der Avifauna durch Windenergieanlagen und Leitungstrassen ist derzeit mit Hilfe der ausgearbeiteten Indikatoren nicht sachgerecht beurteilbar. Für die Wirkung der Flächeninanspruchnahme steht mit dem Hemerobie-gewichteten Flächenwert ein geeigneter Indikator zur Verfügung. Volatilitäten in der Zeitreihe entstehen durch die Flächenbelegungen für Anbaubiomasse (Ackerflächen). Ein Ansteigen der Ackerflächen kann zur Umwidmung bestehender Brachflächen führen, was negative Auswirkungen auf das Schutzgut Tiere / Pflanzen / Biodiversität haben könnte. Möglicherweise verdrängt die Anbaubiomasse aber auch andere Feldfrüchte. Eine direkte Schädigung des Schutzgutes kann daher nicht zweifelsfrei abgeleitet werden. Auswirkungen auf das Schutzgut Tiere / Pflanzen / Biodiversität durch Lichtemissionen konnten nicht bewertet werden, da dieser Aspekt im Rahmen des Vorhabens nicht mit Hilfe eines Indikators quantifiziert werden konnte.

Relevant für das Schutzgut **Boden** ist neben der direkten Flächeninanspruchnahme auch der Aspekt von Schadstoffeinträgen über den Luftpfad. Belastungen des Schutzgutes durch steigende Flächenbelegung für Infrastrukturmaßnahmen und dem Anbau energetisch genutzter Biomasse, verbunden mit einem Stickstoffüberschuss aus der Düngung, steht ein gesunkenes Depositionspotenzial eutrophierender und versauernder Luftschadstoffe gegenüber. In Zukunft ist weiterhin der Rückgang der großflächigen Landschaftsumwälzung durch die Braunkohleförderung zu erwarten.

Durch die Verminderung der Abwassermengen und dem gesunken Depositionspotenzial eutrophierender und versauernder Luftschadstoffe in die Gewässer, verbesserte sich die Umweltsituation in Bezug auf das Schutzgut **Wasser**, während der Eintrag von Stickstoff ins Grundwasser durch die Zunahme des Anbaus von Energiepflanzen stieg.

Die Veränderungen beim Schutzgut **Fläche** werden durch den vorgeschlagenen Indikator grundsätzlich bewertbar. Es zeigt sich, dass der Flächenbedarf für das Energiesystem aktuell steigend ist, wenngleich auch seit 2010 nur noch in geringem Maße und mit einer gewissen Volatilität (Zu- und Abnahmen in kleinem Umfang zwischen den einzelnen Berichtsjahren). Zu beachten ist, dass eine Bewertung der Zeitreihe aufgrund fehlender Daten nicht sinnvoll möglich ist.

Mit dem Rückgang fossil befeuerter Verbrennungsanlagen in allen Sektoren verbessert sich die Luftqualität für alle untersuchten Schadstoffe, somit kann für das Schutzgut **Luft** eine definitive Verbesserung der Umweltsituation festgestellt werden. An dieser Stelle erscheint es wichtig, das

Risiko zukünftig ggf. steigender Feinstaubbelastung zu erwähnen, wenn die Verbrennung fester Biomasse im Rahmen des Fortschreitens der Energiewende forciert wird.

Das Schutzgut **Klima** wird hier im Sinne des globalen Klimas verstanden. Somit ist die Summe an Treibhausgasemissionen der für die Bewertung relevante Faktor. Diese werden in diesem Projekt nicht bewertet.

Für das Schutzgut **Landschaft**, d.h. optische Aspekte und somit vor allem der Erholungsnutzen der Landschaft entstehen Beeinträchtigungen beim Zubau von Windenergieanlagen bzw. des Repowerings bestehender Windparks oder durch andere Energiewandlungsanlagen. Diese werden mit den Indikatoren direkte Flächenbelegung und indirekte Flächenwirkung abgebildet. Die Energiewende führt zu sichtbaren Auswirkungen auf das Schutzgut Landschaftsbild, eine sinnvolle Bewertung ist mit den abgeleiteten Indikatoren aufgrund der schon genannten Einschränkungen jedoch nicht möglich

Das Schutzgut **Kultur- und sonstige Sachgüter** steht üblicherweise in engen Wechselwirkungen mit dem Schutzgut Luft. Mögliche Auswirkungen auf Bau- und Kulturdenkmäler bestehen vor allem durch Emissionen von versauernden Stoffen, die Baumaterialien angreifen. Der Emissionsrückgang versauernder Stoffe trägt zu einer Entlastung des Schutzgutes bei. Diese Entlastungen müssen jedoch mit dem Stickstoffüberschuss und der damit einhergehenden Veränderung der Qualität des Ackerbodens ins Verhältnis gesetzt werden.

Zwar sind **Rohstoffe** nicht als Schutzgut im UVPG definiert, dennoch ist es sinnvoll die Wirkungen der Energiewende auf den Rohstoffverbrauch zu bewerten. Das wird durch die vorgeschlagenen Indikatoren eingeschränkt möglich. Während für den Rohstoffverbrauch Daten für eine Zeitreihe verfügbar sind (die jedoch nicht ohne weiteres interpretierbar ist), müssten Daten für die Zeitreihe beim Indikator Materialkonsum im Bereich der Energieinfrastruktur ergänzt werden. Damit ist eine abschließende Bewertbarkeit der Umweltauswirkungen der Energiewende auf das Schutzgut Rohstoffe derzeit nicht möglich.

6.4 Vergleich mit den Umweltzustandsbeschreibungen in der Literatur

Die Auswertung der Literatur hat gezeigt, dass die vorhandenen Studien mehrheitlich entweder detailliert ausgewählte Umweltauswirkungen spezifischer Anlagen zur Erzeugung von Energie- und Verteilungsanlagen adressieren oder aber versuchen, ein eher umfassendes Bild des Energiesystems zu beschreiben, dabei jedoch auf einer abstrakten Ebene bleiben und teilweise nur eine erratisch anmutende Auswahl von Umwelteffekten beschreiben.

Im vorliegenden F&E-Vorhaben wurde der Versuch unternommen, quantifizierbare Indikatoren für eine umfassende Umweltbewertung zu erarbeiten. Um den Anspruch „umfassend“ zu genügen wurde dazu das Schutzgutkonzept aus dem UVPG übernommen und erweitert. Dadurch wird gewährleistet, dass kein Umweltmedium in der Betrachtung unberücksichtigt bleibt. Die Betroffenheit der Schutzgüter wird über die so genannten Wirkpfade ermittelt. Dabei steht die Frage im Vordergrund, auf welche Weise die Errichtung und der Betrieb der verschiedenen Konzepte zur Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie und weitere Energieinfrastrukturen auf die Schutzgüter einwirken. Die Indikatoren beschreiben diese Wirkpfade mit Daten in Zeitreihen, zeigen Trends und Effekte auf und machen sie bewertbar.

Da die gewählten Indikatoren mehrheitlich aus der Literatur abgeleitet sind bzw. auf Basis publizierter Daten errechnet werden, fördert das F&E Vorhaben mehrheitlich keine völlig neuen Erkenntnisse zu Tage (mit Ausnahme des Indikators für Geräuschemissionen), wohl aber werden Trends und Effekte mit einander in Verbindung gesetzt.

Somit zeichnet die Bewertung der Umwelteffekte der Energiewende ein uneinheitliches Bild. Bei keinem Schutzgut gibt es nur Verbesserungen. Die Umweltauswirkungen verändern sich und somit treten neben Entlastungen auch neue Belastungen auf. Auch diese Erkenntnis ist nicht neu, jedoch lassen sich durch das im Forschungsvorhaben durchgeführte Wirkpfadmodell die Einflussfaktoren auf die Belastung der jeweiligen Schutzgüter besser visualisieren und auch vergleichen.

6.5 Notwendigkeit zur Ausarbeitung weiterer Indikatoren

6.5.1 Wo fehlen Indikatorenmodelle zur Beschreibung der Umweltauswirkungen?

An folgenden Stellen hat sich gezeigt, dass im Monitoringmodell Lücken bestehen, die es mittel- bis langfristig durch ergänzende Forschungsarbeiten noch zu schließen gilt:

- Neben der Reduktion der Treibhausgase ist ein bedeutender Vorteil der Energiewende die Verringerung der Emission von Luftschadstoffen, da weniger fossile Energieträger verbrannt werden. Es gibt allerdings einige Bereiche, in denen die Emissionen ansteigen, z.B. zunehmende Mengen an Ammoniak aus der Verwendung von Gärresten der Biogasproduktion aus Energiepflanzen. Der gegenwärtige Indikator bildet die lokale Verteilung der Immissionen nicht ab. Hier wäre zu prüfen, ob die Modellierung nach Regionen eine bessere Bewertung ermöglicht. Ob dafür geeignete Daten verfügbar sind, kann nicht beurteilt werden.
- Die Verringerung der Emission von NO_x, SO₂, PM_{2,5}, und NH₃ führen zur Reduktion von Todesfällen und Erkrankungen durch Luftschadstoffbelastung. Die Wirkungen werden von der Europäischen Umweltagentur aufgrund von Immissionsdaten berechnet [EEA, 2019]. Es wäre vorteilhaft und zudem im öffentlichen Interesse, die gesundheitlichen Auswirkungen z.B. auf empirischen Zeitreihen zu Quellen und Immissionen stützen zu können. Hier wäre z.B. die Modellierung im Rahmen der *Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (CLRTAP) durch das Meteorological Synthesizing Centre - East (MSC-E)* [Gusev et al., 2019] von Relevanz. Auf der Webseite von MSC-E (<http://en.msceast.org/>) sind länderspezifische Bilanzen mit Emissionen und Immissionen von verschiedenen Luftschadstoffen verfügbar. Es bleibt jedoch das Problem, dass im Vorhaben nur ein Ausriss möglicher Emittenten betrachtet wird, nämlich diejenigen, welche dem Systemraum „Energiewende“ zuzuordnen sind.
- Wie bereits dargestellt, fehlt ein realistisches Modell zur Bewertung der Wirkung von Geräuschen. Hier wäre eine Gewichtung anhand der Bevölkerungsdichte möglich, aber nicht sinnvoll. Denn Aussagen auf Basis der durchschnittlichen Bevölkerungsdichte sind irreführend (Schallemissionen von Windenergieanlagen entstehen ja zumeist im nicht besiedelten Außenbereich) und eine prototypische Lokalisierung spezifischer Anlagentechnologien (Windenergieanlagen im Außenbereich, Feuerungsanlagen tendenziell eher Siedlungsnah etc.) ist nicht sachgerecht abzuleiten. Eine gesicherte Zahl betroffener Personen lässt sich so nicht identifizieren, die Auswirkungen auf weitere Schutzgüter wie bspw. Tiere / Pflanzen / Biodiversität lässt sich somit auch nicht besser beschreiben als mit dem km² basierten Ansatz. Der informatorische Mehrwert einer solchen Analyse steht also in keinem Verhältnis zum Aufwand.

- ▶ Bislang konnte kein praktikables Modell für die Bewertung von Lichtemissionen vorgeschlagen werden. Neben fehlenden bzw. bislang unvollständig erhobenen Grundlagendaten fehlt eine einheitliche wissenschaftliche Bewertungsgrundlage der möglichen Auswirkungen von Lichtemissionen.
- ▶ Bislang nur unzureichend abgebildet sind die Umweltwirkungen von Wärmeemissionen. Hier konnte im Rahmen des Forschungsvorhabens nur ein Proxy-Indikator abgeleitet werden, der zudem nur einen Teil der möglichen Umweltauswirkungen abbildet (Wärmeeinträge von Großfeuerungsanlagen in Gewässer). Auch hier sind, äquivalent zu den Lichtemissionen, noch Grundlagendaten zu erheben und einheitliche wissenschaftliche Bewertungsgrundlagen der möglichen Auswirkungen zu erarbeiten.
- ▶ Die Wirkungen durch Windenergieanlagen, Freiland-PV und Leitungstrassen auf Pflanzen, Tiere und Biodiversität wird mit dem Indikator Flächeninanspruchnahme nur unzureichend abgebildet, auch wenn er Hemerobie-gewichtet wird. Es wäre wünschenswert, wenn Lebensraumtyp-spezifische Einwirkungen abgebildet werden könnten. Diese werden in konkreten Vorhaben sehr spezifisch bewertet. Möglichweise ist die Bildung von regionalen Betroffenheitsklassen möglich.
- ▶ In der öffentlichen Diskussion spielt die Beeinflussung des Landschaftsbildes insbesondere bei Windenergieanlagen eine große Rolle. Die Quantifizierung der indirekten Flächenwirkungen berücksichtigt nicht die lokale Situation (bspw. Bevölkerungsdichte, vorherrschende Flächennutzung, weitere Belange wie Tourismus etc.); hier wäre eine Weiterentwicklung des Indikators sinnvoll.

6.5.2 Wo existieren Indikatorenkonzepte aber es fehlen die Daten?

Im Rahmen der Ableitung der Indikatoren hat sich gezeigt, dass es für die Ausarbeitung der folgenden Denkmodelle/ Indikatorenvorschläge noch ergänzende Daten braucht, die es mittel- bis langfristig durch flankierende Datenerhebungen zu generieren gilt:

- ▶ Der Stickstoffüberschuss für Energiepflanzen ist eine signifikante und nachteilige Umweltwirkung der Energiewende. Das in dieser Studie angewandte Berechnungsverfahren ist pauschal und differenziert nicht nach Pflanzentyp und Anbauregion. Für ein genaueres Bild könnten vorliegende Daten aus der Stickstoffbilanz für Deutschland mit detaillierteren lokal aufgelösten Anbaustatistiken im Sinne einer Ökobilanz für Anbaubiomasse verschnitten werden. Hier fehlen somit weniger die Daten als eine schlüssige Methode die vorhandenen Daten zielgerichtet und langfristig operationalisierbar miteinander zu verschneiden.
- ▶ Für den Indikator temporäre *Flächeninanspruchnahme (mit und ohne Charakterisierung anhand der Hemerobie)* liegt ein Konzept vor, jedoch fehlen Werte für die Zeitreihen der sonstigen erneuerbare Energieträger, der nicht-erneuerbaren Energieträger und der Netzinfrastuktur.
- ▶ Für den Indikator *durch das Energiesystem verbrauchte Rohstoffen* fehlt derzeit die Umrechnung von Erdgasen, radioaktiven Stoffen, Biomasse und Sekundärrohstoffe in natürliche Masse (Tonnen), was entlang den Konventionen in der Materialflussrechnung geschehen

kann. Verschiedene originäre Rohdaten (z.B. zum Handel mit radioaktiven Stoffen oder Erdgasen) müssten von Ämtern zur Verfügung gestellt werden. Weiterhin fehlt noch die Ausweisung der Ergebnisse in Form der kumulierten Rohstoffaufwendungen (KRA) oder auch in Rohmaterialäquivalenten (RME), wobei die erforderlichen Ausgangsdaten (zur Berechnung von KRA und von RME) nahezu identisch sind. Diese zusätzliche Ausweisung ist wesentlich, um eine Vergleichbarkeit mit dem zweiten Rohstoffindikator (Kapitel 5.5.2) zu ermöglichen. Hierfür sind Aktualisierungen und Vervollständigung von KRA-Berechnungen erforderlich.

- Für den Indikator *Materialkonsum im Bereich der Energieinfrastruktur* liegt ein mit dem UBA abgestimmtes Konzept für die Berechnung vor. Eine Quantifizierung der Zeitreihen steht derzeit aus Aufwandsgründen aus und ist auch nicht Teil des hier dokumentierten Forschungsvorhabens. Ein Ergebnis, das die Praktikabilität der Methode aufzeigt, liegt bislang nur für das Jahr 2010 für die Primärrohstoffe vor. In einem laufenden UBA-Projekt (DeuRess II) wird in den kommenden Jahren die Zeitreihe ergänzt, auch wenn der Fokus in DeuRess auf anderen Indikatoren liegt. Die dort geleistete Arbeit kann ein Grundstein sein, um den Indikator Materialkonsum im Bereich der Energieinfrastruktur zu ergänzen.
- Für den Indikator *Organismenschädigung durch Wasserkraftwerke und Kühlwasserentnahme* wurde als Proxy die Menge des Turbinendurchflusses und die Kühlwassermenge gewählt. Bislang liegen Daten zu Organismenverlusten bei der Entnahme von Kühlwasser und Turbinendurchfluss nur in Form von Stichproben oder Monitoringkonzepten für ausgewählte Standorte vor. Eine Hochrechnung wäre mit hohen statistischen Unsicherheiten behaftet, da lokale Situationen einen erheblichen Einfluss entwickeln. Erst wenn Daten systematisch und repräsentativ erhoben würden, könnte die Wirkung präziser beschrieben werden.
- In gleicher Weise müssten auch Daten zur *Organismenschädigung* (Avifauna, Fledermäuse) durch *Windenergieanlagen* und *Leitungstrassen* systematisch und repräsentativ für die durchschnittlichen deutschen Verhältnisse erhoben werden, um anhand der Trassenlänge und Informationen zu den Windenergieanlagen einen bewertbaren Indikator zu berechnen, bei dem Ausgabegröße und der beschriebene Sachverhalt in einem direkten Zusammenhang steht (Bsp.: Menge getöteter Organismen zur Bewertung der Auswirkung auf das Schutzgut Tiere / Pflanzen / Biodiversität). Für die sachgerechte Ableitung des Indikators bedarf es – im Rahmen eines erweiterten Forschungsbedarfs - einer grundlegenden Ausarbeitung ob bspw. die Anzahl oder die Größe der Windenergieanlagen das Gefährdungsrisiko für die Avifauna skalieren. Ein solcher Indikator müsste im Endeffekt aber auch viel stärker als bislang möglich die lokalen Aspekte (Einzelanlage oder Windpark, Nähe zu Vogelzug oder Vogelschutzgebiet etc.) sowie die bereits ergriffenen Minimierungsmaßnahmen reflektieren. Womöglich kann die zu beschreibende Umweltwirkung gar nicht mit einem berechenbaren Indikator sachgerecht abgebildet werden, sondern braucht an dieser Stelle ein echtes, anlagenspezifisches Schlagmonitoring für Vögel und Fledermäuse.

6.5.3 Was fehlt zur Bewertung der Ergebnisse?

Die Beschreibung der Umweltbelastung der Energiewende dient der Optimierung der Vorsorge und Steuerung von Minderungsmaßnahmen. Diese könnten aus der Bewertung der Ergebnisse

systematisch abgeleitet werden. Dies wird am Beispiel der Auswirkungen auf Lebensräume und Biodiversität in Tabelle 39 gezeigt.

Tabelle 39: Wirkungen auf Lebensräume und Biodiversität: Ursachen, Wirkungen und Minderungsmaßnahmen

Ursache	Wirkungen	Minderungsmaßnahmen
Braunkohletagebau	Irreversible Zerstörung von Lebensräumen	Schaffung neuer Lebensräume bei Rekultivierung
Feuerungsanlagen (Kraftwerke, Transport, Haushalte)	Schädigung von Menschen, Tieren und Pflanzen durch luft- und wassergetragene Emissionen	Reduktion der Emissionsfrachten durch Ersatz von Altanlagen, Vorsorge bei Standortwahl und Anlagenkonzept
Windenergieanlagen (WEA)	Zerschneidung von Lebensräumen, Tötung von Vögeln und Fledermäusen bei Kollision	Vorsorge bei Standortwahl und Anlagenkonzept, Abschaltung der WEA bei Vogelzug Ausgleichsmaßnahmen
Freileitungen	Zerschneidung von Lebensräumen, Tötung von Vögeln und Fledermäusen bei Kollision	Vorsorge bei Trassenwahl Vogelschutzmaßnahmen Ausgleichsmaßnahmen
Erdkabel	Zerschneidung von Lebensräumen	Vorsorge bei Trassenwahl Ausgleichsmaßnahmen
Freiflächen-PV	Flächenbelegung, Veränderungen von Lebensräumen	Auswahl von bereits anthropogen geprägten Standorten (z.B. geschlossenen Mülldeponien), Förderung von Magerrasen u.ä. hochwertigen Biotopen
Versiegelung von Flächen (z.B. durch Kraftwerke)	Kleinräumige Zerstörung von Lebensräumen	Vorsorge bei der Standortwahl (Auswahl von bereits anthropogen geprägten Standorten), Ausgleichsmaßnahmen
Wasserkraftwerke, Kühlwasserentnahme	Tötung von Wasserlebewesen	Technische Optimierung bei der Wasserentnahme, Fischtreppen
Wärmeeinleitung in Oberflächengewässer	Tötung von Wasserlebewesen durch Sauerstoffentzug, Veränderung von Lebensräumen	Wärmelastpläne, Erhöhung der Sauerstoffzufuhr
CO₂-Transport und Speicherung	Zerschneidung von Lebensräumen durch Pipelines	Vorsorge bei der Standortwahl und Trassenführung; Ausgleichsmaßnahmen
Unfälle in Kernkraftwerken	Potenziell weiträumige Kontamination	Vorsorge durch Ausstieg (in Deutschland umgesetzt ab 2022)
Risiko durch oberirdische Lagerung abgebrannter Kernbrennelemente	Potenziell weiträumige Kontamination	Endlagerung (Standortsuche läuft)
Anbau von Energiepflanzen	Intensivlandwirtschaft, Verlust von Artenvielfalt und Grünland	Anbausysteme mit Mischkulturen, Reduktion der Nährstoffeinträge durch Düngung, kein Grünlandumbruch

Quelle: Franke B. et al. 2018 (verändert)

7 Schlussfolgerungen und Fazit

Das große Ziel der Energiewende in Deutschland ist die Minderung der Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Stand 1990 um bis zu 95% bis zum Jahre 2050. Um den Erfolg im Prozess der kontinuierlichen Umsetzung von Maßnahmen der Energiewende zu messen, hat die Bundesregierung beschlossen, mit dem jährlichen Indikatoren-Bericht ein Monitoring zur „Energie der Zukunft“ durchzuführen. Dabei sollen auch die Umweltwirkungen der Energiewende betrachtet werden. Ziel des Forschungsvorhabens war die Ableitung bzw. die Entwicklung eines Umweltmonitorings, um die Auswirkungen der Energiewende auf die Umwelt als vielschichtiges Geflecht interdependenter Wirkungszusammenhänge bewertbar zu machen.

7.1 Schlussfolgerungen der Literaturanalyse

Im Rahmen einer Literaturanalyse wurden dafür vorhandene Studien nach geeigneten Konzeptansätzen oder möglichen Einzelindikatoren durchsucht und ausgewertet. Es zeigt sich, dass es nur wenige Studien gibt, die eine umfassende Bewertung für die Konzepte zur Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie und weitere Energieinfrastrukturen vornehmen. In deutlich mehr Literaturstellen werden spezifische Einzelkonzepte anhand ausgewählter Indikatoren bewertet. Dabei zeigt sich, dass die verschiedenen Umweltmedien und die Umweltauswirkungen der verschiedenen Konzepte zur Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie und weiterer Energieinfrastrukturen in der Literatur unterschiedlich repräsentiert sind. Es ist eine Diskrepanz dahingehend festzustellen, dass insbesondere Umweltauswirkungen, die im Zusammenhang mit der Bewertung erneuerbarer Energieträger diskutiert werden, nicht in gleicher Weise bei der Bewertung der fossilen Konzepte zur Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie und weitere Energieinfrastrukturen angewendet werden bzw. teilweise auch nicht anwendbar sind. Somit fehlt zum einen ein direkt anwendbares und alle Umweltmedien umfassendes Bewertungsmodell ebenso wie sachgerechte Indikatorenvorschläge, mit denen alle Konzepte zur Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie und weiterer Energieinfrastrukturen, die zum System „Energiewende“ zählen, in vergleichbarer Detailtiefe bewertet werden können.

Zusammenfassend lässt sich festhalten:

- ▶ Fertige Konzepte für ein Umweltmonitoring der Energiewende liegen in der Literatur nicht vor.
- ▶ Einzelne Indikatoren sind selten dazu geeignet alle Konzepte zur Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie und weiterer Energieinfrastrukturen gleichrangig sachgerecht zu bewerten.
- ▶ Die wenigen Studien, die einem umfassenden Bewertungsansatz des Energiesystems verfolgen, bleiben bei der Auswahl der Indikatoren oft erratisch.
- ▶ Es bedarf für ein sachgerechtes Umweltmonitoring der Energiewende eines Ansatzes der:
 - a) sicherstellt, dass keine Umweltmedien aus der Betrachtung herausfallen, und
 - b) bei dem die Auswahl der Indikatoren anhand einer möglichst stringent durchgeführten Logik erfolgt.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde daher ein Ansatz definiert, der auf die Ergebnisse dieser Literaturschau aufbaut. Dafür wurde aus dem Schutzgutansatz des UVPG ein Umweltbewertungsmodell definiert, das in Literatur und fachlicher Praxis als möglichst umfassend

gilt. Dieser Ansatz wurde um das spezifische Thema Ressourcen erweitert, da die Fragen der durch die Konzepte zur Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie und weiterer Energieinfrastrukturen verbrauchten und verbauten Ressourcen nicht vollständig durch die Schutzgutdiskussion abgedeckt werden. Die Betroffenheit dieser Schutzgüter wird durch Wirkpfade ermittelt. So wird z.B. das Schutzgut Menschen u.a. durch den Wirkpfad „luftgetragene Schadstoffe“ beeinträchtigt. Im nächsten Schritt werden für das Monitoring Indikatoren ausgewählt, die die Entwicklung der Situation der luftgetragenen Schadstoffe in Deutschland repräsentativ und mit Daten in Zeitreihen beschreiben.

Zusammenfassend lässt sich festhalten:

- Die konsequente Orientierung an den Schutzgütern des UVPG garantiert, dass keine Umweltauswirkungen außer Acht gelassen werden.
- Die Ermittlung der Schutzgutbetroffenheit anhand eines Wirkpfadmodells hilft die Indikatoren für die Dokumentation und Bewertung der Umweltauswirkungen auszuwählen und zu klassifizieren.
- Die für das Monitoring ausgewählten Indikatoren stellen eine repräsentative Auswahl für die Beschreibung der Entwicklung der Situation im Wirkpfad dar.

7.2 Methodische Festlegungen für das Monitoring

Das Monitoring ist wie beschrieben ein komplexes Gebilde aus Schutzgütern, Wirkpfaden und Indikatoren, die einen großen Systemraum abzubilden haben. Entsprechend braucht es verschiedene methodische Festlegungen, damit die Funktionalität gewährleistet werden kann. So folgt die Festlegung der Systemgrenze des Monitorings dem Territorialprinzip. Das heißt, es werden nur die von Deutschland ausgehenden Wirkungen betrachtet, alle Umweltfolgen durch Importe und Exporte von Energieträgern aufgrund der internationalen Verflechtungen des Energiesystems bleiben unberücksichtigt. Ausnahme an dieser Stelle ist das Schutzgut Ressourcen. Aufgabe des Monitorings ist es, die zukünftigen Entwicklungen zu verfolgen und zu bewerten. Für den Vergleich der Zeitreihen braucht es Referenzjahre. Es bieten sich die Jahre 1990 (Referenzjahr der Klimaberichterstattung) und das Jahr 2000 (Startpunkt der Energiewende durch Verabschiedung des EEG) an. Beide Jahre haben Vor- und Nachteile, wichtiger als die prozentuale Ausweisung ausgewählter Minderungen ist aber ohnehin die Betrachtung der Zeitreihen. Nur so kann bewertet werden ob eine spezifische Entwicklung Abbild eines Trends oder Ausdruck eines Effektes ist. Insofern sollen im Idealfall beide Jahre, 1990 und 2000 als Referenzjahre ausgewiesen werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten:

- Das Monitoring folgt - von wenigen begründeten Ausnahmen abgesehen - dem Territorialprinzip.
- Das Monitoring erfordert auf der numerischen Ebene der Indikatoren eine Zeitreihendarstellung für die Bewertung.
- Referenzjahr ist das Jahr 2000.

Die Umsetzung dieser methodischen Festlegungen bedarf in der Praxis gewisser Interpretationsspielräume, insbesondere dann, wenn auf Indikatoren aus der Literatur bzw. auf Indikatoren auf Basis bestehender Daten und Berichtspflichten zurückgegriffen wird.

7.3 Ableitung der Indikatoren

Es liegt im Wesen eines Forschungsvorhabens, dass gewisse Ansätze und Vorschläge im Sinne einer iterativen Bearbeitungsweise angepasst oder verworfen werden. Die Idee, eine umfassende Bilanzierung der meisten Indikatoren anhand einer einheitlichen Dateneingabe vorzunehmen wurde im Rahmen von Workshops diskutiert und verworfen. Insbesondere um für die Fragestellungen bei den Luftschadstoffen aber auch bei der Deposition und den Flächeninanspruchnahmen innerhalb des UBAs keine konkurrierenden Bilanzierungssysteme aufzubauen, die aufgrund unterschiedlicher Systemgrenzen, abweichender Emissionsfaktoren und ggf. anderer nicht weiter vereinheitlichter Faktoren zu unterschiedlichen Ergebnissen bei eigentlich ähnlichen Fragestellungen oder Sachverhalten kommen. Stattdessen wurde ein Ansatz bevorzugt, der bestehendes Datenmaterial neu und im Hinblick auf die Erfordernisse einer Abbildung der Umweltauswirkungen auf Konzepte zur Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie und weiterer Energieinfrastrukturen im Systemraum der Energiewende zusammenstellt und bewertbar macht.

Die Ableitung der Indikatoren zeigt ein gemischtes Bild, hinsichtlich der Fragen nach dem Systemraum, der Datenlage und der Treffsicherheit der Indikatoren. Gerade bei den Wirkungen, die stark in der öffentlichen Diskussion stehen (bei WEA: Landschaftsbild & Tötung von Vögeln und Fledermäusen) lassen sich aufgrund des Fehlens repräsentativer Daten nur Proxy-Indikatoren ableiten. Andererseits lassen sich so auch Wirkungen adressieren, die in der Öffentlichkeit weit weniger wahrgenommen werden, wie etwa die Reduktion der Kühlwasserentnahme und –einleitung und die damit verbundene verringerte Tötung von Wasserlebewesen.

Durch aktuelle Forschung adressierte Problemfelder, wie die hohe Flächeninanspruchnahme durch den Energiepflanzenanbau und der Eintrag von Ammoniak werden mittels der erarbeiteten Indikatoren in der Summe besser erkennbar und in der Zusammenschau mit den übrigen über Indikatoren beschriebenen Umweltauswirkungen auch besser bewertbar. Die Integration der Umweltauswirkungen durch Geräusch- und Lichtemissionen ist derzeit im Monitoring noch nicht zufriedenstellend gelöst. Die Quantifizierung der Geräuschemissionen - vor allem die der Windenergieanlagen - begründet noch erweiterten Forschungsbedarf. Für eine sachgerechte Bewertung potenzieller Umweltauswirkungen durch Lichtemissionen fehlen noch grundlegende Daten und Bewertungsmaßstäbe, so dass hier kein Indikator erarbeitet werden konnte.

7.4 Ergebnisse und Ausblick auf weitere Arbeiten

Die Ergebnisse zeigen, dass die für die Zeitreihenentwicklung der ausgewählten Indikatoren erforderlichen Daten mehrheitlich vorhanden sind und qualitative Aussagen zu den Umweltauswirkungen auf alle Schutzgüter getroffen werden können.

Bei der Ableitung von Aussagen ist zu beachten, dass nicht alle Wirkpfade die gleiche Qualität hinsichtlich der Systemraumabdeckung erzielen und auch nicht alle potenziellen Umweltauswirkungen über den Wirkpfad mit quantifizierbaren Indikatoren beschrieben werden konnten. Auch sind die Indikatoren hinsichtlich ihrer qualitativen Beurteilung zu differenzieren. Im Rückgriff auf die Ergebnisse der Defizitanalyse lässt sich festhalten, dass die Umweltauswirkungen über den Wirkpfad Luftschadstoffe valide und auch miteinander vergleichbar abgebildet werden können. Auch Emissionen in Boden und Wasser können ansatzweise mit einer vergleichbaren Qualität bewertet werden. Gleiches gilt für die Flächeninanspruchnahme und die Rohstoffnutzung, wobei hier bisher Zeitreihen zur Bewertung fehlen. Die Wirkungen auf die Schutzgüter des UVPg über die Wirkpfade Geräusch-, Licht und Wärmeemissionen sowie direkte Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen stehen dahinter zurück. Hier sind tendenziell eher Hinweise abzuleiten, ob und wo ggf. nachteilige Umweltauswirkungen zu erwarten sind.

Zusammenfassend lässt sich somit - im Sinne einer Bewertung der Umweltauswirkungen der Energiewende festhalten:

- ▶ Die Umweltauswirkungen auf die Schutzgüter des UVPG durch Emissionen in Luft sowie Boden und Wasser haben mit dem Voranschreiten der Energiewende seit dem Jahr 2000 mehrheitlich abgenommen.
- ▶ Flächenbelegungen haben mit dem Voranschreiten der Energiewende seit dem Jahr 2000 zugenommen, was zu einer Beeinträchtigung der Schutzgüter Fläche, Boden und auch Landschaft führt sowie in indirekter Weise in Form von Lebensraumverlusten auch auf das Schutzgut Tiere / Pflanzen / Biodiversität wirkt. Bei der Bewertung sind jedoch Einschränkungen aufgrund fehlender Zeitreihen zu beachten.
- ▶ Die Umweltauswirkungen auf die Schutzgüter des UVPG durch die Emissionen von Geräuschen und Wärme sind mit dem Voranschreiten der Energiewende seit dem Jahr 2000 bislang mehr oder weniger gleichgeblieben, können jedoch aufgrund der Unsicherheiten bei den Abgeleiteten Indikatoren nicht abschließend bewertet werden.
- ▶ Unklar ist die Bewertung der Umweltauswirkungen auf die Schutzgüter des UVPG aufgrund von Lichtemissionen, da hier bislang noch kein geeigneter Bewertungsmaßstab bzw. noch kein geeigneter Indikator gefunden bzw. entwickelt wurde.
- ▶ Durch das Fortschreiten der Energiewende werden im Vergleich zum Referenzjahr 2000 weniger nicht nachwachsende Ressourcen für das Energiesystem verbraucht. Dem müssen jedoch die verbauten Ressourcen gegenübergestellt werden. Für eine solche Analyse stehen die Modelle zur Verfügung, nur fehlen bislang die Daten zur Verrechnung. Insofern soll an dieser Stelle – trotz der grundsätzlich positiven Beurteilung der Integration des Themas Rohstoffe ins Monitoringmodell - keine abschließende Bewertung des Schutzguts Ressourcen vorgenommen werden.
- ▶ Eine Quantifizierung direkter Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen durch die Prozesse innerhalb des Systemraums der Energiewende gibt Hinweise auf ein seit dem Jahr 2000 möglicherweise gestiegenes Risiko von Beeinträchtigungen. Für eine endgültige Bewertung erschien die Qualität der Indikatoren aber als unzureichend.
- ▶ Das Risiko durch die zivile Nutzung der Kernkraft wird als gleichbleibend bewertet, die abgeleiteten Indikatoren lassen sich aber aufgrund der gegebenen qualitativen Einschränkungen nur bedingt bewerten.

Mit Hilfe des hier entwickelten Wirkpfadmodells, das auf Basis der numerischen Darstellung der Indikatoren die Belastung der Schutzgüter des UVPG bewertbar macht, lassen sich die Verlagerungen der Umweltauswirkungen durch den Fortschritt der Energiewende aufzeigen.

Ähnliche Befunde wurden in Teilen bereits publiziert, wie die Auswertung der Literatur zeigt. Der Unterschied liegt in der methodischen Herleitung des Modells und der damit verbundenen Auswahl und qualitativen Beurteilung der Indikatoren sowie deren konsequenter Anwendung bei der Bewertung der Schutzgüter. Somit kann auch eine qualitative Differenzierung zwischen den Indikatoren vorgenommen werden, die eine zusätzliche Bewertungsebene erlaubt (Aussa-

gen auf gesicherter Basis, Hinweise aufgrund eingeschränkt belastbarer Indikatoren, Indikationen auf Basis von Proxy-Indikatoren).

Durch den Schutzgutansatz wird eine neue auch für die Praxis verständliche Bewertungsebene integriert. Mit Hilfe des Wirkpfadmodells lassen sich zudem die Einflussfaktoren auf die Belastung der jeweiligen Schutzgüter besser visualisieren und vergleichen. Das Wissen um die Einflussfaktoren ist notwendig, wenn es um die Gestaltung von Maßnahmen geht, die dem Monitoring im Sinne eines vorsorgenden Umweltschutzes folgen werden.

Nach der methodischen Definition des Modells auf Basis der Schutzgüter des UVPG und der Wirkpfade sowie der fachlichen Ableitung der Indikatoren zur repräsentativen Beschreibung der Wirkpfade und der praktischen Erprobung des Instrumentes werden zur Absicherung und Verstetigung der Ergebnisse folgende Arbeiten vorgeschlagen:

- ▶ Konsequente Evaluation und, wo nötig und möglich, Erhöhung der Treffsicherheit der vorgeschlagenen Indikatoren.
- ▶ Normierung der Datenerhebung und Datenaktualisierung (Handbuch).
- ▶ Ausarbeitung weiterer Indikatoren wie in Kapitel 6.5 beschrieben.
- ▶ Bewertung der Konsequenzen – insbesondere von Vorsorgemaßnahmen bei erkannten Wirkungen.
- ▶ Kommunikation der Ergebnisse – entweder in Teilen durch die Integration ausgewählter Ergebnisse im Monitoringbericht der Energiewende „Energie der Zukunft“ oder in Gänze durch ein anderes Berichtsformat.

7.5 Offene Punkte und weiterer Forschungsbedarf

In Reflexion der erreichten Ergebnisse muss festgehalten werden, dass das im Rahmen der Literaturanalyse identifizierte Problem der unsystematischen Auswahl an Indikatoren zur Abbildung der Umweltauswirkungen der Energiewende nur bedingt gelöst werden konnte. Zwar ist aufgrund der methodischen Arbeiten in diesem Forschungsvorhaben eine Beurteilung der definierten Indikatoren möglich, so dass die Ergebnisse eingeordnet werden können, doch bleiben auch damit grundsätzliche Probleme ungelöst:

- ▶ Die in den unterschiedlichen Wirkpfaden (und teilweise auch in den Indikatoren) betrachteten Systemräume sind nicht vollständig deckungsgleich. So werden bspw. die internationalen Energieträgervorketten in der Mehrheit der Wirkpfade nicht betrachtet. Dieses Ungleichgewicht entsteht letztendlich auch durch die verwendeten Datengrundlagen, die zur Quantifizierung der Indikatoren herangezogen wurden.
- ▶ Die potenziellen Umweltauswirkungen bestimmter Technologien (bspw. Oberflächen- und Tiefengeothermie) werden, wenn überhaupt nur rudimentär abgebildet. Die potenziellen Umweltauswirkungen anderer Technologien wie bspw. Windenergieanlagen und Biogasanlagen werden hingegen über verschiedene Indikatoren sehr umfassend abgebildet. Hier entsteht ein Ungleichgewicht, das bereits im Rahmen der Literaturanalyse bemängelt wurde.

- Ausgewählte Umweltwirkungen können nur als Wirkpotenziale (z.B. Deposition eutrophierender Stoffe) oder gar nur über Proxy-Indikatoren (z.B. für Organismenverluste) quantifiziert werden.

Dies führt dazu, dass die Indikatoren für sich betrachtet in ihren Denkmodellen zwar stimmig und schlüssig abgeleitet werden können, in der Betrachtung schon auf der Ebene der Wirkpfade festgestellt werden muss, dass hier qualitative Abstufungen bestehen (z.B. Wirkpfad Luftschadstoffe vs. Wirkpfad Geräusch-, Licht-, Wärmeemissionen).

Des Weiteren ist aus Sicht des Forschungsnehmers zu bemängeln, dass ein Monitoring gemäß dem in diesem Forschungsvorhaben entwickelten Modell stets nur die Zeitreihe bewerten kann (Veränderung gegenüber dem Referenzjahr und Veränderung gegenüber den Vorjahren). Das führt dazu, dass Verbrauchsschwankungen im Energiesystem unter Umständen auf die Indikatoren durchschlagen. Ein Referenzmodell im Sinne einer Kontrastfolie zur Bewertung der aktuellen Umweltauswirkungen des Energiesystems im Vergleich mit einem Energiesystem, das sich gegenüber dem Referenzjahr nicht weiterentwickelt hat (quasi eine Welt ohne Energiewende) ist so nicht möglich.

Eine mögliche Lösung für die hier benannten Probleme wäre, dass Umweltmonitoring der Energiewende statt auf dem in diesem Vorhaben durchdeklinierten Indikator-basierten Ansatz auf Basis einer Ökobilanz der Energiewende gem. ISO 14040ff durchzuführen. Die Vorteile einer Ökobilanz wären insbesondere der für alle betrachteten Umweltauswirkungen klar definierte Systemraum, der bspw. dem in Kapitel 3.3.2 definierten Modell entsprechen könnte. Sinnvoll wäre es sicherlich, den benötigten Dateninput für die Berechnung so zu definieren, dass die Werte der AGEB Energiebilanz inkl. der Satellitenbilanz direkt als Aktivitätsdaten genutzt werden können. Für alle im System inkludierten Prozesse würden spezifische Prozessdaten erhoben und im Rahmen der Sachbilanz transparent dokumentiert. Die Ergebnisse der Berechnung würden in einem ersten Schritt als Input/Output-Inventar vorliegen, das dann mit Hilfe definierter Kategorien der Wirkungsabschätzung bewertet werden könnte. Bei der Auswahl der Kategorien der Wirkungsabschätzung wäre sicherzustellen, dass nicht nur „klassische“ Luftschadstoffe betrachtet werden, sondern auch Aussagen zum Ressourcen- und zum Flächenverbrauch bzw. zur Flächenbelegung abgeleitet werden können. Ebenso erscheint es möglich, den im Rahmen dieses Forschungsvorhaben entwickelten Indikator der Lärmbelastungspotenzialflächen in die ökobilanzielle Auswertung zu integrieren.

Mit dem Vorhaben zum Flächenrucksack (FKZ 3717 31 105) und dem SYSEET Vorhaben (Systemvergleich speicherbarer Energieträger aus erneuerbaren Energien (Liebich et al. unveröffentlicht)) sowie dem im UBA derzeit intern laufenden Vorhaben zur Aktualisierung der Leitlinien zur Bewertung von Ökobilanzergebnissen sind erste relevante Anknüpfungspunkte für eine Ökobilanz der Energiewende bereits vorhanden. Neben diesen offensichtlichen Vorteilen müssen aber auch die Nachteile des Ökobilanzansatzes klar benannt werden. So sind ökobilanzielle Ergebnisse stets nur Umweltwirkungspotenziale. Zudem können – wie auch im entwickelten Indikatorenmodell – keine lokalen Gegebenheiten berücksichtigt werden, ebenso lassen die errechneten Wirkpotenziale keine Rückschlüsse auf lokale Auswirkungen zu. Zudem entsteht mit einer Ökobilanz eine weitere konkurrierende Berechnung, deren Ergebnisse mit den sonstigen bestehenden Berichtspflichten (bspw. NFR aber auch der Treibhausgasbilanzierung der erneuerbaren Energieträger) in Einklang zu bringen wäre.

Doch auch eine per Ökobilanz erzeugte Bewertung der Umweltauswirkungen der Energiewende kann, wie auch das hier durchgeführte Vorhaben, schlussendlich keine zufrieden stellende Antwort auf den Grundkonflikt finden, wie reduzierte Umweltbelastungen des Energiesystems zu bewerten sind, wenn definierte Umweltqualitätsziele nicht erreicht werden. Die Integration bestehender Umweltqualitätsziele wie bspw. die der WRRL oder der DNS als weitere nachgelagerte Bewertungsschwelle für die Ergebnisfindung konnte nicht operationalisiert werden, da es nicht möglich war, diese Ziele auf das innerhalb der Energiewende zu betrachtende Energiesystem einzugrenzen. Hier sind insbesondere die politischen Entscheidungsträger gefordert, zukünftig bei der Gestaltung und Definition von Umweltqualitätszielen aktiv die Optionen von sektorspezifischen Zielhorizonten - die eine Bewertbarkeit der umgesetzten Maßnahmen ermöglichen - zu prüfen.

8 Quellenverzeichnis

50Hertz, 2012. Freileitung oder Erdkabel Hintergrundinformationen Verantwortungsvoller Netzausbau, 50Hertz Transmission GmbH. Available at: <http://www.50hertz.com/de/file/Erdkabel-Freileitung.pdf> [Zugriff 08.09.2016]

50Hertz, kein Datum. <http://www.50hertz.com/Portals/3/Content/Dokumente/Netzausbau/Freileitung-vs-Kabel/10-Systemige-Kabeltrasse-Bau-Und-Fertigstellung.pdf> (Zugriff 14.07.2014)

AAE 2010. Agentur für erneuerbare Energien. Erneuerbare Energien Deutschland 2020. http://www.mo-portal.de/websites/photovoltaik/ee_potenzialatlas_2020.pdf [Zugriff 11.09.2014]

AGEB, 2020. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, versch. Jahre. Daten und Fakten - Bilanzen 1990 - 2017. Dateien im Excel-Format <https://ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2017.html> [Zugriff 07.02.2020]

AGEB, 2020a. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen. Bruttostromerzeugung in Deutschland nach Energieträgern. https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb-strerz2019_18122019.xlsx [Zugriff 28.04.2020]

Angerer, G., Buchholz, P., Gutzmer, J., Hagelüken, C., Herzig, P., Littke, R., Thauer, R. K., Wellmer, F.-W., 2016. Rohstoffe für die Energieversorgung der Zukunft. Geologie - Märkte - Umwelteinflüsse. https://www.akademienunion.de/fileadmin/redaktion/user_upload/Publikationen/Stellungnahmen/Analyse_Rohstoffe_final.pdf [Zugriff 07.02.2020]

Augustin, S., Hedtkamp, S. & Schütze, G., 2008. Der "gute ökologische Zustand" naturnaher terrestrischer Ökosysteme - ein Indikator für Biodiversität? Tagungsband zum Workshop in Dessau 19./20.9.2007, Umweltbundesamt. Available at: <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3508.pdf> [Zugriff 09.09.2016].

Balla, S., Wulfert, K. & Peters, H.-J., 2009. Leitfaden zur Strategischen Umweltprüfung, Umweltbundesamt. Available at: <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3746.pdf> [Zugriff 09.09.2016].

BDEW, 2018. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. Fakten und Argumente. Berlin, 27. April 2018. https://www.bdew.de/media/documents/20180427_Fakten-Argumente-Kraftwerkspark-Deutschland.pdf. Zugriff 29.06.2020

Becker, A. 2020. FNR - Anbauzahlen 1994-2010.xlsx; E-Mail von Arno Becker (Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe, FNR) an Bernd Franke (ifeu) vom 24.03.2020

BGR, 2019. BGR Energiestudien – Daten und Entwicklungen der deutschen und globalen Energieversorgung https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Produkte/Energiestudien/energiestudien_inhalt.html [Zugriff am 02.07.2020].

Blew et al., 2018. Wirksamkeit von Maßnahmen gegen Vogelkollisionen an Windenergieanlagen. Bundesamt für Naturschutz. BfN-Skripten 518. <https://www.bfn.de/fileadmin/BfN/service/Dokumente/skripten/Skript518.pdf> (Zugriff 20.04.2020)

BMJV, 2015. Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG), Deutschland: Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz. Available at: <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/uvpg/gesamt.pdf> [Zugriff 23.09.2016].

BMUB 2014. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Verzeichnis radioaktiver Abfälle. Bestand zum 31. Dezember 2013 und Prognose. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Atomenergie/verzeichnis_radioaktiver_abfaelle_bf.pdf [Zugriff 28.04.2020]

BMUB 2015. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Verzeichnis radioaktiver Abfälle. Bestand zum 31. Dezember 2014 und Prognose.

https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Nukleare_Sicherheit/verzeichnis_radioaktiver_abfaelle_bf.pdf [Zugriff 28.04.2020]

BMUB, 2016. Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II. Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen.

https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/progress_ii_broschuere_bf.pdf [letzter Zugriff 20.04.2020]

BMUB 2018. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Verzeichnis radioaktiver Abfälle. Bestand zum 31. Dezember 2017 und Prognose.

https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Nukleare_Sicherheit/verzeichnis_radioaktiver_abfaelle_bf.pdf [Zugriff 28.04.2020]

BMVBS, 2010: BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG Abteilung Straßenbau Arbeitshilfe Vögel und Straßenverkehr Ausgabe 2010 Ergebnis des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens FE 02.286/2007/LRB „Entwicklung eines Handlungsleitfadens für Vermeidung und Kompensation verkehrsbedingter Wirkungen auf die Avifauna“ der Bundesanstalt für Straßenwesen. Abgerufen am 14.03.2020 unter: https://mil.brandenburg.de/media_fast/4055/Arbeitshilfe%20V%C3%B6gel%20und%20Stra%C3%9Fenverkehr%20Juli%202010.pdf [Zugriff 28.04.2020]

BMVBS 2013: BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAUWESEN UND STÄDTEBAU (Hrsg.) Untersuchung und Bewertung von straßenverkehrsbedingten Nährstoffeinträgen in empfindliche Biotope. Endbericht zum FE-Vorhaben 84.0102/2009 im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, verfasst von BALLA, S., UHL, R., SCHLUTOW, A., LORENTZ, H., FÖRSTER, M., BECKER, C., SCHEUSCHNER, TH., KIEBEL, A., HERZOG, W., DÜRING, I., LÜTTMANN, J., MÜLLER-PFANNENSTIEL, K.= Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1099, BMVBS Abteilung Straßenbau, Bonn. 362 S.

BMW i, 2012. Erster Monitoring-Bericht „Energie der Zukunft“ Kurzfassung, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMW i). Available at: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/erster-monitoring-bericht-energie-der-zukunft,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> [Zugriff 08.09.2016].

BMW i, 2014a. Die Energie der Zukunft - Erster Fortschrittsbericht zur Energiewende, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMW i). Available at: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/bmwi_de/fortschrittsbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=2 [Zugriff 08.09.2016].

BMW i, 2014b. Zweiter Monitoring-Bericht „Energie der Zukunft“, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMW i). Available at: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/zweiter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> [Zugriff 08.09.2016].

BMW i, 2015. Die Energie der Zukunft- Vierter Monitoring-Bericht zur Energiewende, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMW i). Available at: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/bmwi_de/fortschrittsbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=2 [Zugriff 10.10.2016].

BMW i, 2016a. Grünbuch Energieeffizienz - Diskussionspapier des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMW i). Available at: <http://www.bmwi.de/DE/Mediathek/publikationen,did=776452.html> [Zugriff 10.10.2016].

BMW i, 2016b. Strom 2030, Langfristige Trends – Aufgaben für die kommenden Jahre, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMW i). Available at:

<https://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/strom-2030,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> [Zugriff 10.10. 2016].

BMWi, 2016c. Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. <http://www.wasserkraft-deutschland.de/fileadmin/PDF/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2015.pdf>. [Zugriff 05.03.2020]

BMWi, 2018a. Sechster Monitoring-Bericht zur Energiewende, Berichtsjahr 2016, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Available at: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/sechster-monitoring-bericht-zur-energie-wende.pdf?__blob=publicationFile&v=18 [Zugriff 24.07.2018].

BMWi, 2018b. Erneuerbare Energie in Zahlen. https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Berichte/erneuerbare-energien-in-zahlen-2018.pdf?__blob=publicationFile&v=6. [Zugriff 05.03. 2020]

BMWi, 2020. Zahlen und Fakten Energiedaten. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/energiedaten-gesamt-xls.html> [Zugriff am 20.07.2020]

BMWi 2020b. Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland , https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html [Zugriff am 20.07.2020] Bringezu, S. & Schütz, H., 2013. Arbeitspapier AS 1.2/1.3, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. Available at: http://www.ressourcenpolitik.de/wp-content/uploads/2013/04/PolRess_ZB_AP1-1.2-3_Indikatoren-und-Ziele_final.pdf [Zugriff 06.08. 016].

Bringezu, S. et al., 2010. AP6 Indikatoren / Bottom-up-Modelle und Szenarien - Abschlussbericht des Arbeitspakets 6 des Projekts „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes), Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. Available at: http://ressourcen.wupperinst.org/downloads/MaRes_AP6_7_AbschlussBer.pdf [Zugriff 06.08.2016].

Bundesnetzagentur, 2012. Entwurf des Umweltberichts zum Bundesbedarfsplanentwurf 2012 zu Konsultation, Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen. Available at: http://data.netzausbau.de/2022/UB/Entwurf/Umweltbericht2012_Entwurf.pdf [Zugriff 09.09.2016].

Bundesnetzagentur, 2020. Monitoringbericht des Stromnetzausbaus, Vierte Quartal 2019. https://www.netzausbau.de/SharedDocs/Downloads/DE/Vorhaben/Monitoring/Monitoring_2019-Q4.pdf?__blob=publicationFile [Zugriff 25.05.2020]

Bundesregierung, 2002. Perspektiven für Deutschland - Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung, Die Bundesregierung. Available at: http://www.bundesregierung.de/Content/DE/_Anlagen/Nachhaltigkeit-wiederhergestellt/perspektiven-fuer-deutschland-langfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=3 [Zugriff 08.09.2016].

Bundesregierung, 2018. Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie - Aktualisierung 2018; Available at: <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975274/1546450/65089964ed4a2ab07ca8a4919e09e0af/2018-11-07-aktualisierung-dns-2018-data.pdf?download=1> [Zugriff 21.02.2020]

Bundesverband Windenergie, 2019. Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen. https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/02-technik-und-netze/09-rueckbau/BWE-Hintergrundpapier_Recycling_von_Windenergieanlagen_-_20191115.pdf [Zugriff 21.02.2020]

Bundesverband Windenergie, 2020. Installierte Windenergieleistung in Deutschland. <https://www.wind-energie.de/themen/zahlen-und-fak-ten/deutschland/#:~:text=325%20neue%20Onshore%2DWindenergieanlagen%20mit,Onshore%2DWindenergi>

[e%20betr%C3%A4gt%2053.912%20MW.&text=Davon%2027.200%20Menschen%20im%20Bereich,Menschen%20im%20Bereich%20Onshore%20Windenergie.](#) [Zugriff 25.05.2020]

Buyny, Š., Lauber, U. & Klink, S., 2009. Verbesserung von Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung - Weiterentwicklung des direkten Materialinputindikators - Endbericht, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden. Available at:

https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltoekonomischeGesamtrechnungen/RohstoffproduktivitaetEndbericht.pdf?__blob=publicationFile [Zugriff 08.09.2016].

BWI 2020 Dritte Bundeswaldinventur (2012) Internetauftritt <https://bwi.info/> [Zugriff am 20.07.2020]

Consentec, 2017. Mündliche Mitteilung.

Daniel-Gromke, J.; Rensberg, N.; Denysenko, V.; Trommler, M.; Reinholz, T.; Völler, K.; Beil, M.; Beyrich, W. (2017). Anlagenbestand Biogas und Biomethan: Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland. (DBFZ-Report, 30). Leipzig: DBFZ. X, 75 S. ISBN: 978-3-946629-24-5.

Dehout et al., 2017. Dehoust, G. Manhart, A., Möck, A., Kießling, L., Vogt, R., Kämper, C., Giegrich, J., Auberger, A., Priester, M., Rechlin, A., Dolega, P., 2017: Erörterung ökologischer Grenzen der Primärrohstoffgewinnung und Entwicklung einer Methode zur Bewertung der ökologischen Rohstoffverfügbarkeit zur Weiterentwicklung des Kritikalitätskonzeptes (ÖkoRess I). UBA-Texte 87/2017

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/eroerterung-oekologischer-grenzen-der> [Zugriff 21.02.2020]

Destatis, 2010. Umweltökonomische Gesamtrechnungen (UGR), Qualitätsbericht. , Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.

https://www.destatis.de/DE/Methoden/Qualitaet/Qualitaetsberichte/Umwelt/ugr.pdf?__blob=publicationFile&v=3 [Zugriff 23.04.2020]

Destatis, 2015. Umweltnutzung und Wirtschaft - Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen; Teil 5: Flächennutzung, Umweltschutzmaßnahmen, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden. Available at: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltoekonomischeGesamtrechnungen/Querschnitt/UmweltnutzungundWirtschaftTabelle5850007157006Teil_5.pdf?__blob=publicationFile [Zugriff September 8, 2016].

Destatis, 2017. Pressemitteilung Nr. 408 vom 15.11.2017

[https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2017/11/PD17_408_126.html [Zugriff 21.02.2020]

Destatis, 2018: Umweltökonomische Gesamtrechnungen. Aufkommen und Verwendung in Rohstoffäquivalenten. Wiesbaden. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Materialfluesse-Energiefluesse/_inhalt.html#sprg238692 [letzter Zugriff 20.04.2020]

Destatis, 2020: Umweltökonomische Gesamtrechnungen. Gesamtwirtschaftliches Materialkonto. Wiesbaden. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Materialfluesse-Energiefluesse/_inhalt.html#sprg238692 [letzter Zugriff 20.04.2020]

Deutscher Bundestag, 2001. Erster Bericht der Enquete-Kommission Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung, Available at: <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/14/075/1407509.pdf> [Zugriff 08.09.2016].

Deutscher Bundestag, 2015. Indikatorenbericht 2014 zur Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt Inhaltsverzeichnis - Unterrichtung durch die Bundesregierung Indikatorenbericht, Available at: <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/18/039/1803995.pdf> [Zugriff 08.09.2016].

DIN, 2002. DIN 18005-1, Ausgabe Juli 2002: „Schallschutz im Städtebau, Teil 1: Grundlagen und Hinweise für die Planung“; DIN 18005-1 Beiblatt 1, Ausgabe Mai 1987: „Schallschutz im Städtebau; Berechnungsverfahren; Schalltechnische Orientierungswerte für die städtebauliche Planung“.

Dittrich, M. et al., 2013. Aktualisierung von nationalen und internationalen Ressourcenkennzahlen, Umweltbundesamt. Available at: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aktualisierung-von-nationalen-internationalen> [Zugriff 09.09-2016].

Dittrich, M., Gerhardt, N., Schoer, K., Dünnebeil, F., Becker, S., Oehsen, A.v., Koeppen, S., Vogt, R., Frischmuth, F., Fehrenbach, H., Biemann, K., Limberger, S., Ewers, B., Auberger, A. (2020a-e, noch unveröffentlicht): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenEe (GreenLate... usw.). Climate Change 01 - 05/ 2020. Dessau-Roßlau. A: GreenEe, B: GreenLate, C: GreenMe, D: GreenLife, E: GreenSupreme. UBA-Texte, Climate Change 01/2020 - 05/2020. Dessau-Rosslau.

Dittrich et al. 2018. Dittrich, M., Schoer, K., Kämper, -c., Ludmann, S., Ewers, B., Giegrich, J., Sartorius, C., Hummen, T., Marscheider-Weidemann, F., 2018. Strukturelle und produktionstechnische Determinanten der Ressourceneffizienz: Untersuchung von Pfadabhängigkeiten, strukturellen Effekten und technischen Potenzialen auf die zukünftige Entwicklung der Rohstoffproduktivität (DeteRess). UBA-Texte 29/2018 https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-04-11_texte_29-2018_deteress.pdf [Zugriff 21.02.2020]

Domke, F. et al., 2013. Ressourcenschutzrecht, Umweltbundesamt. Available at: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/positionspapier-ressourcenschutzrecht> [Zugriff 08.09.2016].

Dumont, U., Anderer, P. & Schwevers, U., 2012. Methoden zur Untersuchung von Fischwanderungen und der Schädigung von Fischen an Wasserkraftstandorten, Umweltbundesamt. Available at: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4286.pdf> [Zugriff 08.09.2016].

EC, 2014. Report on Critical Raw Materials for the EU, Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials, European Commission. Available at: <https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/eip-raw-materials/en/community/document/critical-raw-materials-eu-report-ad-hoc-working-group-defining-critical-raw> [Zugriff 08.09.2016].

Ecoinvent 3.5: <https://www.ecoinvent.org/database/database.html> [Accessed February 17, 2020]

EEA, 2016. European Environment Agency. Air quality in Europe — 2016 report. https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2016/at_download/file [Zugriff 17.02.2020]

EEA, 2017. European Environment Agency. Air quality in Europe — 2017 report. https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2017/at_download/file [Zugriff 17.02.2020]

EEA, 2018. European Environment Agency. Air quality in Europe — 2018 report. https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2018/at_download/file [Zugriff 17.02.2020]

EEA, 2019. European Environment Agency. Air quality in Europe — 2019 report. https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2019/at_download/file [Zugriff 17.02.2020]

Eggeling & Schneider in Bauer et al. 2018. Auswirkungen der Grundwasserbeschaffenheit auf Bau und betrieb oberflächennaher Geothermieranlagen in Handbuch Oberflächennahe Geothermie herausgegeben von Mathias Bauer, Willi Freeden, Hans Jacobi, Thomas Neu. 2018. Heidelberg

EK, 2011. Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen - Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa https://www.bmlfuw.gv.at/dam/jcr:237f50de-7e06-445e-ba2c-355491bc4b9d/Roadmap%20Ressourcen%20com2011_571_de.pdf [Zugriff 01.06. 2017]

Energieatlas Bayern, 2014a.

http://www.energieatlas.bayern.de/thema_energie/stromnetz/uebertragung/freileitungen.html (Zugriff 14.07.2019)

Eurostat, 2018: Economy-wide material flow accounts. Handbook, 2018 edition.

<https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3859598/9117556/KS-GQ-18-006-EN-N.pdf/b621b8ce-2792-47ff-9d10-067d2b8aac4b> [Zugriff 28.04.2020]

FNR 2020. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2019. Anbau und Verwendung nachwachsender Rohstoffe in Deutschland. Stand: März 2019. <https://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22004416.pdf> [Zugriff 28.04.2020]

Fachagentur Windenergie, 2019. Entwicklung der Windenergie im Wald - Ausbau, planerische Vorgaben und Empfehlungen für Windenergiestandorte auf Waldflächen in den Bundesländern. 4. Auflage. https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Windenergie_im_Wald/FA-Wind_Analyse_Wind_im_Wald_4._Auflage_2019.pdf. [Zugriff 05.03.2019]

Fehrenbach, H., Grahl, B., Giegrich, J., Busch, M., 2015. Hemeroby as an impact category indicator for the integration of land use into life cycle (impact) assessment; DOI 10.1007/s11367-015-0955-y; 2015a

FPG 2020. Fukushima Prefectural Government. Transition of evacuation designated zones. <https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal-english/en03-08.html> [Zugriff 25.05.2020]

Franke, B. et al., 2018. Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland - Modul U.a: Ökologische Evaluierung der Szenarien Referenzszenario, Basisszenario, Szenario Geringer Ausbau der Übertragungsnetze, Szenario Alternative regionale EE-Verteilung und Restriktionsarmes Szenario, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Available at: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-u-a-oekologische-evaluierung-der-szenarien.pdf?__blob=publicationFile&v=4 [Zugriff 19.06.2018].

Fraunhofer IEE, 2019. Windenergie Report Deutschland 2018. Available at: http://windmonitor.iee.fraunhofer.de/opencms/export/sites/windmonitor/img/Windmonitor-2018/WERD_2018.pdf [Zugriff 20.02.2020]

Friedrich, R. et al, 2004. NewExt. New Elements for the Assessment of External Costs from Energy Technologies. Final Report. NG1-CT2000-00129. Stuttgart 2004 http://www.ier.uni-stuttgart.de/forschung/projektwebsites/newext/newext_final.pdf [Zugriff 26.07.2018]

Fritsche, U., Rausch, L. & Simon, K.-H., 1989. Umweltwirkungsanalyse von Energiesystemen: Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), Öko-Institut, Büro Darmstadt; Wissenschaftliches Zentrum III an der Gesamthochschule Kassel. Available at: http://www.energieverbraucher.de/files_db/dl_mg_1087308507.pdf [Zugriff 12.09.2016].

Füllner, G., 1997. Notwendigkeit der Begrenzung der lichten Stabrechenweite vor Turbinen von Wasserkraftanlagen auf 20 mm, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Referat Fischerei. Available at: https://www.landwirtschaft.sachsen.de/landwirtschaft/download/Begruendung_20mm_Feinrechen_an_WKA.pdf [Zugriff 09.09.2016].

GDV 2019. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. Wildunfälle im Zwei-Minuten-Takt. Medieninformationen. <https://www.gdv.de/de/medien/aktuell/wildunfaelle-im-zwei-minuten-takt-51516> [Zugriff 28.05.2020]

Gniffke, P., 2016. Luftschadstoff-Emissionen in Deutschland. Available at: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luftbelastung/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland> [Zugriff 12.09.2016].

GreenDELTA, 2015. LCIA methods, Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories. Version 1.5.4, 16 March. <https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2015/11/LCIA-METHODS-v.1.5.4.pdf> [Zugriff 27.02.2020]

Griebler, C., Kellermann, C., C., S., Hegler, F., Kuntz, D., & Walker-Hertkorn, S. (2015). Auswirkungen thermischer Veränderungen infolge der Nutzung oberflächennaher Geothermie auf die Beschaffenheit des Grundwassers und seiner Lebensgemeinschaften. – Empfehlungen für eine umweltverträgliche Nutzung. - Umwelt Bundesamt, Dessau-Roßlau/GRS, 1981. Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS). Deutsche Risikostudie Kernkraftwerk. Fachband 8, Unfallfolgenrechnung und Risikoergebnisse. TÜV Rheinland 1981

GRS, 1986. Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 1986. Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke - Phase B, Der Bundesminister für Forschung und Technologie.

https://www.grs.de/sites/default/files/pdf/Dt._Risikostudie_Kernkraftwerke_Phase_B.pdf [Zugriff 20.04.2020].

Gusev et al. 2019. Assessment of transboundary pollution by toxic substances: Heavy metals and POPs EMEP Status Report 2/2019. http://en.msceast.org/reports/2_2019.pdf [Zugriff 28.04.2020]

Haller, M. et al., 2015. Überblick über vorliegende Szenarienarbeiten für den Klimaschutz in Deutschland bis 2050 - Arbeitspaket 1.1 im Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Wissenschaftliche Unterstützung, Öko-Institut e.V., Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung, IREES GmbH (Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien). Available at: <http://www.oeko.de/publikationen/p-details/ueberblick-ueber-vorliegende-szenarienarbeiten-fuer-den-klimaschutz-in-deutschland-bis-2050-ueberarbei/> [Zugriff 12.11.2016].

Häußermann et al. 2019. Stickstoff-Flächenbilanzen für Deutschland mit Regionalgliederung Bundesländer und Kreise – Jahre 1995 bis 2017. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Texte 131/2019

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-10-28_texte_131-2019_stickstofflaechenbilanz.pdf [Zugriff 08.02.2020]

Herden, C. et al., 2009. Naturschutzfachliche Bewertungsmethoden von Freilandphotovoltaikanlagen, Bundesamt für Naturschutz (BfN). Available at: http://www.energiewende-naturvertraeglich.de/fileadmin/Dateien/Dokumente/themen/Solarparks/Herden_2009_PV-FFA_Bewertung.pdf [Zugriff 26.09.2016]

Hey, C. et al., 2011. Wege zur 100 % erneuerbaren Stromversorgung - Sondergutachten, Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) Prof. Available at: http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2011_07_SG_Wege_zur_100_Prozent_erneuerbaren_Stromversorgung.html [Zugriff 12.09.2016].

Hintzsche 2019. E-Mail von M. Hintzsche (UBA-Fachgebiet I 2.4) an B. Kauertz (ifeu) vom 29.10.2019

Hirschberg, S., Spiekerman, G. & Dones, R., 1998. Severe Accidents in the Energy Sector – First Edition; Project GaBE: Comprehensive Assessment of Energy Systems, Paul Scherrer Institut, Villigen. Available at: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/30/045/30045581.pdf [Zugriff 09.09.2016].

Hoffmann, A., 2005. Nutzungen und Belastungen an der Unteren Wupper und ihre Wirkung auf die biologischen Qualitätselemente. In Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Handlungsbedarf und Abwägungskriterien bei der Umsetzung der EU-WRRL am Beispiel der Kühlwassernutzung der Unteren Wupper. Wupperverband, pp. 161–185. Available at: [http://www.wupperverband.de/internet/mediendb.nsf/gfx/MED_RSCE-8J8ATV_2920EB/\\$file/abschlussbericht_kuehlwassernutzung_he3.pdf](http://www.wupperverband.de/internet/mediendb.nsf/gfx/MED_RSCE-8J8ATV_2920EB/$file/abschlussbericht_kuehlwassernutzung_he3.pdf) [Zugriff 08.09.2016].

Holzner, M., 2000. Untersuchungen über die Schädigung von Fischen bei der Passage des Mainkraftwerks Detelbach. Technische Universität München. Available at: <https://mediatum.ub.tum.de/?id=603570> [Zugriff 09.09.2016].

Hoppe, W. (Hrsg.), 2002. Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG): Kommentar. Köln, Berlin, Bonn, München. Heymanns Verlag.

Hoppe, W. et al., 2004. Öffentliches Baurecht: Bauplanungsrecht mit seinen Bezügen zum Raumordnungsrecht, Bauordnungsrecht. München. Verlag C. H. Beck oHG.

Hötter, H., 2006. Auswirkungen des „Repowering“ von Windkraftanlagen auf Vögel und Fledermäuse. Michael-Otto-Institut im NABU, Forschungs- und Bildungszentrum für feuchtgebiete und Vogelschutz. Available at: <https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/energie/wind/2.pdf> [Zugriff 09.09.2016].

IASS, 2017. Gefahr für Gesundheit und Klima: Kurzlebige klimawirksame Schadstoffe, Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS), Available at: http://www.iass-potsdam.de/sites/default/files/files/online_iass_aktualisierte_themenbrochuere_slcsp_0.pdf [Zugriff 31.07.2018]

IBP/ ifeu/TUB (o.J.). LC.biodiv.IA – Biodiversitäts-Wirkungsabschätzung in Lebenszyklusanalysen – Life Cycle Biodiversity Impact Assessment; FKZ 3517 81 1800; durchgeführt durch Fraunhofer-Institut für Gebäudephysik, ifeu und TU Berlin; Projektende 2020.

IE, 2015. Leipziger Institut für Energie. Marktanalyse – Windenergie an Land. Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Hamburg 18.02.2015, Available at: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/studie-windenergie-an-land.pdf?__blob=publicationFile&v=3 [Zugriff 26.07.2018]

IEA, 2020. World Energy Statistics 2020. International Energy Agency, Paris [gebührenpflichtige Datenbank] [Zugriff 15.03.2020]

ifeu/Integrall (o.J.). Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen - Ermittlung und Verifizierung von Datenquellen und Datengrundlagen für die Berechnung der Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen für Ökobilanzen und die vereinfachte Umweltbewertung (VERUM); laufendes Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamts; FKZ 3717 31 105 0; Veröffentlichung voraussichtlich 2021.

IIR, 2020. German Informative Inventory Report, Chapter 1.7 - General Uncertainty Evaluation, available at: <https://iir-de.wikidot.com/general-uncertainty-evaluation> (Zugriff am 20.05.2020)

IKSR, 2004. Auswirkungen von Wasserkraftanlagen in den Rheinzufüssen auf den Wanderfischabstieg - 70. Plenarsitzung 8./9. Juli 2004, Bern, Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR). Available at: http://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/Fachberichte/fb_140_de.pdf [Zugriff 09.09.2016].

IPBES, 2019. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Díaz, Sandra et al. (eds.). IPBES secretariat. Bonn <https://ipbes.net/global-assessment> [Accessed April 30, 2020].

Irmer, U. et al., 2014. Wasserwirtschaft in Deutschland Teil 1 Grundlagen, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Available at: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/wasserwirtschaft-in-deutschland-0> [Zugriff 12.09.2016].

Jacoby, C., 2000. Die Strategische Umweltprüfung (SUP) in der Raumplanung: Instrumente, Methoden und Rechtsgrundlagen für die Bewertung von Standortalternativen in der Stadt- und Regionalplanung. Berlin. Erich Schmidt Verlag.

Kaiser, R. et al., 2012. Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) - Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Available at: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/progress_broschuere_de_bf.pdf [Zugriff 09.09.2016].

Keuneke, R. & Dumont, U., 2010. Vergleich von Prognosemodellen zur Berechnung der Turbinen bedingten Fischmortalität. Wasser-Wirtschaft, 100(9), pp.39–42.

Klobasa, M. & Sensfuß, F., 2015. CO₂-Minderung im Stromsektor durch den Einsatz erneuerbarer Energien in den Jahren 2012 und 2013 - Europäische Modellierung der Substitutionsbeziehungen unter Berücksichtigung des deutschen Stromaußenhandels, Umweltbundesamt. Available at:

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_11_2016_co2_minderung_im_stromsektor_durch_den_einsatz_erneuerbarer_energien_0.pdf [Zugriff 10.10.2016].

Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe, 2016. Abschlussbericht "Verantwortung für die Zukunft" - Drs./268. Berlin. 30.08.2016

https://www.bundestag.de/endlager-archiv/blob/434430/bb37b21b8e1e7e049ace5db6b2f949b2/drs_268-data.pdf [Zugriff 27.02.2020]

Kowarik, I., 1999. Natürlichkeit, Naturnähe und Hemerobie als Bewertungskriterien. Handbuch Naturschutz Und Landschaftspflege, 1–18.

Kowarik, I., 2014. Natürlichkeit, Naturnähe und Hemerobie als Bewertungskriterien. Handbuch Naturschutz Und Landschaftspflege. <https://doi.org/10.1002/9783527678471.hbnl1999029> [Accessed February 27, 2020]

Jalas, J., 1955. Hemerobie und hemerochrome Pflanzenarten. Ein terminologischer Reformversuch. – Acta Soc. Flora Fauna Fennica 72 : S. 1-15

Lange, J. 2009. Abwärmelast Rhein, Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND). Available at: http://www.bund-rlp.de/uploads/media/bund_waerme_lang_bild.pdf [Zugriff 09.09.2016].

LANUV (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen) (2012): Abschneidekriterien zur Festlegung des Untersuchungsgebiets. Vermerk vom 18. Juni 2012

Liebich, A., Fröhlich, T., Münter, D., Fehrenbach, H., Giegrich, J., Koeppen, S., Dünnebeil, F., Knoer, W., Bie-mann, K., Simon, S., Maier, S., Albrecht, F., Pregger, T., Schilings, C., Morser, M., Reißner, R., Hosseiny, S., Jungmeier, G., Beermann, M., Frieden, D., Bird, N. (noch unveröffentlicht): Systemvergleich speicherbarer Energieträger aus erneuerbaren Energien (SYSEET), Abschlussbericht.

LLUR, 2013. Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein. Empfehlungen zur Berücksichtigung der tierökologischen Belange beim Leitungsbau auf der Höchstspannungsebene. Flintbek. Januar 2013.

http://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/E/ingriffsregelung/Downloads/Empfehlungen.pdf?__blob=publicationFile&v=1 [Zugriff 26.07.2018]

Lödl et al., 2010. Abschätzung des Photovoltaik-Potentials auf Dachflächen in Deutschland. 11. Symposiumm Energieinnovation. 10.-12.02.2019 Graz/Austria. <https://mediatum.ub.tum.de/doc/969497/969497.pdf>. [Zugriff 02.06.107]

Löschel, A. et al., 2012. Stellungnahme zum ersten Monitoring-Bericht der Bundesregierung für das Berichtsjahr 2011, "Energie der Zukunft" Kommission zum Monitoring-Prozess.

<http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/M-O/monitoringbericht-stellungnahme-lang,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> [Zugriff 09.09.2016].

Löschel, A. et al., 2014a. Stellungnahme zum ersten Fortschritts-Bericht der Bundesregierung für das Berichtsjahr 2013, "Energie der Zukunft" Kommission zum Monitoring-Prozess. Available at:

<http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/M-O/monitoringbericht-energie-der-zukunft-stellungnahme-2013,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> [Zugriff 09.09.2016].

Löschel, A. et al., 2014b. Stellungnahme zum zweiten Monitoring-Bericht der Bundesregierung für das Berichtsjahr 2012, "Energie der Zukunft" Kommission zum Monitoring-Prozess. Available at:

<http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/M-O/monitoringbericht-energie-der-zukunft-stellungnahme-zusammenfassung,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> [Zugriff 09.09.2016].

Löschel, A. et al., 2015. Stellungnahme zum vierten Monitoring-Bericht der Bundesregierung für das Berichtsjahr 2014, "Energie der Zukunft" Kommission zum Monitoring-Prozess. Available at:

<https://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/M-O/monitoringbericht-energie-der-zukunft-stellungnahme-2014,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> [Zugriff 18.10.2016].

Lutz, C., Lehr, U. & Ulrich, P., 2013. Gesamtwirtschaftliche Effekte energie- und klimapolitischer Maßnahmen der Jahre 1995 bis 2012, Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforshung mbH Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Available at: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Gutachten/gesamtwirtschaftliche-effekte-effizienz.pdf;jsessionid=6D67DDFD7534CA61F9CEF9E177C0EEEC?__blob=publicationFile&v=3 [Zugriff 09.09.2016].

Maes, J., Braat, L., Jax, K., Hutchins, M., Furman, E., Termanseno, M. et al., 2011. A spatial assessment of ecosystem services in Europe: methods, case studies and policy analysis - phase 1. PEER Report No 3. Ispra: Partnership for European Environmental Research
https://www.ufz.de/export/data/2/99145_Maes_et_al._2011_A_spatial_assessment_of_ecosy.pdf [Zugriff 20.02.2020]

Manhart, A., Vogt, R., Priester, M., Dehoust, G., 2019. Environmental Criticality of Raw Materials. Outcomes of the OekoRess II Project. Presentation 19.02.2019, Berlin (unveröffentlicht)

Marquardt, K., 2004. Ökologische Wirkungen von großen Photovoltaik- Freiflächenanlagen (Vortrag zur XIII. Internationalen Naturschutztagung "Zoologischer und botanischer Artenschutz in Mitteleuropa", Bad Blankenburg, 29. 10. 2004, leicht verändert, Institut für Wirtschaftsökologie, Bad Steben. Available at: <http://www.iwoe.de/VortragPhotovoltaik/VorVolttext1.html> [Zugriff 09.09.2016].

Marscheider-Weidemann, F., Langkau, S., Hummen, T., Erdmann, L., Tercero Espinoza, L., Angerer, G. Marwede, M., Benecke, S., 2016. Rohstoffe für Zukunftstechnologien. DERA Rohstoffinformationen 28. Berlin.

Meinel, G., Schumacher, U. & Behnisch, M., 2012. Flächennutzungsmonitoring IV - Genauere Daten, informierte Akteure, praktisches Handeln. In IÖR Schriften Band 60. Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V. (IÖR). Available at: https://www.ioer.de/fileadmin/internet/IOER_schriften/IOER_Schrift_Band_60.pdf [Zugriff 09.09.2016].

Memmler, M., Lauf, T., Wolf, K., Schneide, S., 2017. Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger – Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2016, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Available at: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-10-26_climate-change_23-2017_emissionsbilanz-ee-2016.pdf [Zugriff 31.07.2018]

Miethaner und Bauer, 2018. Windkraft Schonach GmbH, Windpark Falkenhöhe, UVP-Bericht. Freiburg, 16.05.2018. https://www.uvp-verbund.de/documents/ingrid-group_ige-iplug-bw/78E3D1E2-DAC1-43A4-B4A9-45EEDA2AFDAB/20180516_UVP-Bericht_Falkenhoehe.pdf [Zugriff 28.02.2020]

Mudgal, S. et al., 2012. Assessment of resource efficiency indicators and targets - Annex Report, European Commission, DG Environment.

NABU, 2016. Energiewende Naturverträglich. Available at: <http://www.energiewende-naturvertraeglich.de/index.html> [Zugriff 12.09.2016].

Naturschutz und Erneuerbare, 2017a. EE-Szenarien aus Naturschutzsicht. BfN Förderprojekt "Vernetzung der F+E-Vorhaben zur naturschutz-fachlichen Begleitung der Energiewende." Available at <https://www.natur-und-erneuerbare.de/projektdatenbank/projekte/ee-szenarien-aus-naturschutzsicht/> [Zugriff 22.05.2017].

Naturschutz und Erneuerbare, 2017b. Landschaftsbild und Stromnetze. BfN Förderprojekt "Vernetzung der F+E-Vorhaben zur naturschutz-fachlichen Begleitung der Energiewende." <https://www.natur-und-erneuerbare.de/projektdatenbank/projekte/landschaftsbild-und-stromnetze/> [Zugriff 22.05.2017].

Naturschutz und Erneuerbare, 2017c. Erneuerbare im naturschutzfachlichen Monitoring. BfN Förderprojekt "Vernetzung der F+E-Vorhaben zur naturschutz-fachlichen Begleitung der Energiewende." <https://www.natur-und-erneuerbare.de/projektdatenbank/projekte/erneuerbare-im-naturschutzfachlichen-monitoring/>

und-erneuerbare.de/projektdatenbank/projekte/erneuerbare-im-naturschutzfachlichen-monitoring/ [Zugriff 22.05.2017].

Naumann, S. & Heimerl, S., 2013. Fischschutz und Fischabstieg im Dialog – Forum „Fischschutz und Fischabstieg“. WasserWirtschaft, 103(9), pp.30–35.

NIRAS A/S, 2012. STRATEGISK MILJØVURDERING I FORBINDELSE MED UDBUD I OMRÅDET VEST FOR 6° 15' Ø MED HENBLIK PÅ EFTER- FORSKNING OG INDVINDING AF OLIE OG GAS, OG UDBUD AF OMRÅDER MED HENBLIK PÅ INJEKTION AF CO₂ I EKSISTERENDE FELTER, NIRAS A/S. Available at: https://www.regjeringen.no/contentassets/fc7f4034c4cc4b74a8cfaf62904c9d8e/scoping_report_januar_2012.pdf [Zugriff 12.09.2016].

Notus, 2018. Notus Energy Plan GmbH&Co KG. Schallgutachten zur Ermittlung der zu erwartenden Schallimmissionen von sechs Windenergieanlagen nach Interimsverfahren. Standort Hohenseefeld II, Landkreis Teltow-Fläming (Brandenburg), Bericht-Nr. NEP-Schall 001-2018 Rev. 1. Potsdam 07.05.2018 https://www.uvp-verbund.de/documents/ingrid-group_ige-iplug-bb/40A8A277-F17B-4A28-9124-BE26CE961604/6_Schallprognose.pdf [Zugriff 15.03.2020]

OECD, 2004. OECD Workshop on Material Flows and related Indicators - Chair's Summary, Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Working Group on Environmental Information and Outlooks. Available at: <http://www.oecd.org/env/indicators-modelling-outlooks/oecdworkonmaterialflowsandresourceproductivity.htm> [Zugriff 09.09.2016].

Otto, S.A. & Zahn, S., 2008. Temperatur- und Sauerstoff-Toleranz ausgewählter Wanderfischarten der Elbe, Literaturrecherche, Institut für Binnenfischerei e.V. Potsdam-Sacrow. Available at: <http://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/2012/15605/pdf/08FischO2toleranz.pdf> [Zugriff 09.09.2016].

Penn-Bressel, G., 2013. Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche und Ansätze zur Ermittlung der temporären Flächenbelegung durch Transporte. In Flächennutzungsmonitoring V - Methodik, Analyseergebnisse, Flächenmanagement - IÖR Schriften Band 61. Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V. (IÖR), pp. 21–31. Available at: https://www.ioer.de/fileadmin/internet/IOER_schriften/IOER_Schrift_Band_61_kl_neu_alles.pdf [Zugriff 09.09.2016].

Pennekamp, S., Gräff, H.-J. & Salzer, J., 2014. Umweltbericht für das „Integrierte Energie - und Klimaschutzkonzept Baden- Württemberg (IEKK)“, Infrastruktur Professor Böhm und Partner im Auftrag und in inhaltlicher Abstimmung mit Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. Available at: https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/4_Klima/Klimaschutz/IEKK/SUP_IEKK_BW_Umweltbericht.pdf [Zugriff 08.09.2016].

Peters, W. & Weingarten, E., 2014. Umweltbelange und raumbezogene Erfordernisse bei der Planung des Ausbaus des Höchstspannungs-Übertragungsnetzes.-1. Gesamtdokumentation, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Available at: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/umweltbelange-raumbezogene-erfordernisse-bei-der> [Zugriff 18.10.2016].

Peters, W. et al., 2014. Untersuchung von speziellen Hemmnissen im Zusammenhang mit der Umweltbewertung in der Planung und Genehmigung der Windenergienutzung an Land und Erarbeitung von Lösungsansätzen- SCHLUSSBERICHT, Umweltbundesamt. Available at: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_23_2013_planung_und_genehmigung_der_windenergienutzung_0.pdf [Zugriff 18.10.2016].

Peters, W. et al., 2015. Räumlich differenzierte Flächenpotentiale für erneuerbare Energien in Deutschland. BMVI-Online-Publikation, 2015(8). Available at:

http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVI/BMVIOnline/2015/BMVI_Online_08_15.html?nn=395966 [Zugriff 08.09.2016].

Pfluger, B. et al., 2017. Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland - Modul 3: Referenzszenario, Basisszenario, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Available at: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-3-referenzszenario-und-basisszenario.pdf?__blob=publicationFile&v=4 [Zugriff 28.10.2019].

Prognos et al., 2019. prognos, Fraunhofer IFAM, Öko-Institut, BHKW-Infozentrum, Stiftung Umweltenergie-recht. Evaluierung der Kraft-Wärme-Kopplung. Analysen zur Entwicklung der Kraft-Wärme-Kopplung in einem Energiesystem mit hohem Anteil erneuerbarer Energien. Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Berlin, 25.04.2019.
https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/evaluierung-der-kraft-waerme-kopplung.pdf?__blob=publicationFile&v=6 [Zugriff 04.11.2019]

Quentin J., 2020. Fachagentur Windenergie an Land e.V. E-Mail an B. Franke (ifeu) vom 29.06.2020

RP Karlsruhe, 2009. Regierungspräsidium Karlsruhe. Schreiben an GKM Grosskraftwerk Manheim AG vom 03.08.2009. <https://de.slideshare.net/metropolsolar/rpk543-gkm-entscheidung-wasserrecht> [Zugriff 28.04.2020]

Reißmann, D., 2019. Flächenrucksäcke für Güter & Dienstleistungen in Umweltbewertungen - Eine Methodenentwicklung; Vortrag auf dem 11. Dresdner Flächennutzungssymposium; 9. April 2019;
http://11dfns.ioer.info/fileadmin/user_upload/11dfns/pdf/vortraege/11.DFNS2019%20Reissmann_bereinigt.pdf [Accessed April 2020]

Rockström Johan Rockström, Will Steffen, Kevin Noone, Åsa Persson, F. Stuart Chapin, Eric F. Lambin, Timothy M. Lenton, Marten Scheffer, Carl Folke, Hans Joachim Schellnhuber, Björn Nykvist, Cynthia A. de Wit, Terry Hughes, Sander van der Leeuw, Henning Rodhe, Sverker Sörlin, Peter K. Snyder, Robert Costanza, Uno Svedin, Malin Falkenmark, Louise Karlberg, Robert W. Corell, Victoria J. Fabry, James Hansen, Brian Walker, Diana Liverman, Katherine Richardson, Paul Crutzen, Jonathan A. Foley, 2009: A safe operating space for humanity. In Nature, 461, 472-475.

Runge, K. et al., 2012. Umweltauswirkungen unterschiedlicher Netzkomponenten, OECOS GmbH. Available at: https://www.netzausbau.de/SharedDocs/Downloads/DE/2022/UB/GutachtenRunge.pdf?__blob=publicationFile [Zugriff 19.05.2017].

Scharf, W., 2001. Gewässerbewertung – Gewässerbewirtschaftung. In 4. Symposium Flussgebietsmanagement beim Wupperverband. Wupperverband, pp. 32–41. Available at: [https://www.wupperverband.de/internet/mediendb.nsf/gfx/MED_HVAL-8H2E7W_38A83B/\\$file/4_Symp_FGM_2001_2.pdf](https://www.wupperverband.de/internet/mediendb.nsf/gfx/MED_HVAL-8H2E7W_38A83B/$file/4_Symp_FGM_2001_2.pdf) [Zugriff 09.09.2016].

Schilli, C. et al., 2011. Auswertung der Veränderungen des Bodenzustands für Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) und Validierung räumlicher Trends unter Einbeziehung anderer Messnetze - Teil B: Datenauswertung und Weiterentwicklung des Monitorings, Umweltbundesamt. Available at: <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4233.pdf> [Zugriff 09.09.2016].

Schlomann, B., Reuter, M., Eichhammer, W.; Ziesing, H.-J., 2016. Methoden- und Indikatorenentwicklung für Kenndaten zum Klimaschutz im Energiebereich, Umweltbundesamt, Available at: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_12_2016_methoden_und_indikatorenentwicklung_fuer_kenndaten_zum_klimaschutz.pdf [Zugriff 31.07.2018]

Schmale, J., Grass, A. (2014) Ruß in Deutschland: Hintergrundinformationen für Entscheidungsträger, DUH, Available at:

http://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Verkehr/Russ/Russpapier-Teil1_IASS_DUH_final.pdf [Zugriff 31.07.2018]

Schmidt, M., 2014. Zu den Schutzziele der Ressourceneffizienz. Umweltwirtschaftsforum, 22(2), pp.147–152.

Schmidt, R., 2001. Einführung in das Umweltrecht 6. Auflage, München 2001

Schmitt, M. et al., 2006. Flächeninanspruchnahme privilegiert zulässiger Vorhaben im Außenbereich, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR). Available at:

http://www.bbr.bund.de/BBSR/DE/Raumentwicklung/EnergieKlimaschutzpolitik/Projekte/Archiv/Flaecheninanspruchnahme/Bericht.pdf;jsessionid=22FAF79FBD28F6CF174434072151B798.live21302?__blob=publicationFile&v=1

[Zugriff 09.09.2016].

Schmitz, S. & Paulini, I., 1999. Bewertung in Ökobilanzen - Methode des Umweltbundesamtes zur Normierung von Wirkungsindikatoren, Ordnung (Rangbildung) von Wirkungskategorien und zur Auswertung nach ISO 14042 und 14043 (Version '99), Umweltbundesamt. Available at:

<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3619.pdf> [Zugriff 09.09.2016].

Schöll, F., 2009. Das Makrozoobenthos des Rheins 2006/2007 - Rhein-Messprogramm Biologie 2006/2007 Teil II-D, Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR). Available at:

http://www.iksr.org/uploads/media/Bericht_172_d_01.pdf [Zugriff 09.09.2016].

Schrödter, W. et al., 2004. Umweltbericht in der Bauleitplanung: Arbeitshilfe zu den Auswirkungen des EAG Bau 2004 auf die Aufstellung von Bauleitplänen. Bonn. Deutsches Volksheimstättenwerk GmbH.

Schulze, F., Peters, W. & Dijks, S., 2014. Einrichtung, Aufgaben und Themen eines Kompetenzzentrums für Naturschutz und Energiewende - Machbarkeitsstudie -, Naturschutzbund Deutschland e. V. (NABU). Available at:

https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/energie/140128-nabu-machbarkeitsstudie_kompetenzzentrum_final.pdf [Zugriff 18.10.2016].

Siedentop, S., Heiland, S. & Lehmann, I., 2007. Regionale Schlüsselindikatoren nachhaltiger Flächennutzung für die Fortschrittsberichte der Nationalen Nachhaltigkeitsstrategie – Flächenziele, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). Available at:

<http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/Forschungen/2007/Heft130.html?nn=395966> [Zugriff 09.09.2016].

Sprengel [1997]. Sprengel G. Verluste an Organismen im Bereich der deutschen Küsten von Nord und Ostsee einschließlich der Ästuar durch die Entnahme von Wasser für großtechnische Kühlsysteme. Umweltbundesamt Berlin. 1997. Forschungsbericht 20204258, UBA-FB 99-055

Stadt Freiburg, 2017. Sachlicher Teilflächennutzungsplan Windkraft. Umweltbericht. Freiburg, 28.07.2017

<https://www.freiburg.de/pb/1018894.html> [Zugriff 28.02.2020]

Statista, 2020. Landwirtschaftliche Nutzfläche in Deutschland in den Jahren 1949 bis 2019.

<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/206250/umfrage/landwirtschaftliche-nutzflaeche-in-deutschland/>. [Zugriff 28.02.2020]

Kohlenstatistik, 2017. Statistik der Kohlenwirtschaft e.V., 2017; Daten im Excelformat auf

<http://www.kohlenstatistik.de/19-0-Braunkohle.html>: http://www.kohlenstatistik.de/files/foerder_1.xlsx;
http://www.kohlenstatistik.de/files/rekult_2.xlsx, [Zugriff June 2, 2017]

Kohlenstatistik, 2020. Statistik der Kohlenwirtschaft e.V., 2020; Landinanspruchnahme, Rekultivierung; Daten im Excelformat auf

https://kohlenstatistik.de/downloads/?wpv_aux_current_post_id=15&wpv_view_count=557-TCPID15 [Accessed February 2, 2020]

Statistisches Bundesamt, 2003, 2007, 2009, 2013, 2016, 2018. Fachserie 19, Reihe 2.2: [Zugriff 02.02. 2020]
 2003. https://www.destatis.de/GPStatistik/servlets/MCRFileNodeServlet/DEHeft_derivate_00008100/2190220019004.pdf (Daten für 2001);
 2007. https://www.destatis.de/GPStatistik/servlets/MCRFileNodeServlet/DEHeft_derivate_00008101/2190220049004.pdf (Daten für 2004);
 2009. https://www.destatis.de/GPStatistik/servlets/MCRFileNodeServlet/DEHeft_derivate_00008102/2190220079004.pdf (Daten für 2007)
 2013. https://www.destatis.de/GPStatistik/servlets/MCRFileNodeServlet/DEHeft_derivate_00012248/2190220109004.pdf (Daten für 2010)
 2016. https://www.destatis.de/GPStatistik/servlets/MCRFileNodeServlet/DEHeft_derivate_00027202/2190220139004_korr24102016.pdf (Daten für 2013)
 2018. https://www.destatis.de/GPStatistik/servlets/MCRFileNodeServlet/DEHeft_derivate_00037986/2190220169004.pdf (Daten für 2016)

Statistisches Bundesamt, 2016. Flächennutzung.
<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/Flaechennutzung/Tabellen/Bodenflaeche.html>. [Zugriff 02.06. 2017]

Statistisches Bundesamt, 2018. Umweltökonomische Gesamtrechnungen, Aufkommen und Verwendung in Rohstoffäquivalenten. Lange Reihen 2000 bis 2014). https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Materialfluesse-Energiefluesse/Publikationen/Downloads-Material-und-Energiefluesse/rohstoffaequivalente-lange-reihe-5853102149005.xlsx?__blob=publicationFile [Zugriff 19.02.2020]

Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S., Fetzer, I., Bennett, E.M., Biggs, R., Carpenter, S.R., de Vries, W., de Wit, C.A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G.M., Persson, L.M., Ramanathan, V., Reyers, B., Sörlin, S., 2015: Planetary Boundaries: Guiding human development on a changing planet. Science (Express, online) [DOI: 10.1126/science.1259855]

Steger, S. / Fekkek, M. / Bringezu, S., 2011. Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen. Meilensteinbericht des Arbeitspaketes 2.3 des Projekts "Materialeffizienz und Ressourcenschonung" (MaRes). Wuppertal.

Sukopp, H. (1972): Wandel von Flora und Vegetation in Mitteleuropa unter dem Einfluß des Menschen. Berichte über Landwirtschaft 50 S. 112-139

TEEB DE, 2012. Der Wert der Natur für Wirtschaft und Gesellschaft – Eine Einführung. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Leipzig. 2012

TEEB, 2010: The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations. Hrsg.: Pushpam Kumar. Earthscan, London; <http://www.teebweb.org/our-publications/teeb-study-reports/ecological-and-economic-foundations/> [Zugriff 20.02.2020]

Thierfeldt, S. und Schartmann, F., 2009. Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen. Erfahrungen und Perspektiven - 3. Neu bearbeitete Auflage. Aachen. https://www.ptka.kit.edu/ptka-alt/downloads/ptka-wte-e/WTE-E-Entsorgungsforschung-Broschuere_Stilllegung-und-Rueckbau_BRENK.pdf [Zugriff 21.02.2020]

Thünen 2020. Direktlink zur Datentabelle
https://www.thuenen.de/media/institute/wf/HM_div._Statistik_Dateien/Dateien_-_Bilanzen_-_Tabellen/Wald/Einschlagrueckrechnung/de_tab_Einschlagrueckrechnung_Einschlag_und_Verwendung.xlsx
 Verwendet: Tabellenreiter "Rohholzverwendung", Spalte K (davon energetische Nutzung, Total) [Zgriff am 20.07.2020]

TÜV Nord Systems, 2007. Gutachten Errichtung und Betrieb eines 800 MW Steinkohlekraftwerkes in Wilhelmshaven, Rüstersieler Groden Nord – Geräuschprognose, TÜV Nord Systems, Essen 2007

UBA, 2012. Glossar zum Ressourcenschutz.

<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4242.pdf> [letzter Zugriff 20.04.2020]

UBA, 2013. Ressourcenschutzrecht.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/ressourcenschutzrecht_07.01.2014.pdf [letzter Zugriff 20.04.2020]

UBA, 2016. Umweltbundesamt. Wasser als Ressource. Available at:

<https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser-als-ressource#strap1> [Zugriff 09.09.2016].

UBA 2018. Umweltbundesamt. PRTR-Schadstoffe in thru.de auf einen Blick, Available at:

<https://www.thru.de/thrude/auswertung/top-thema/automatisches-archiv/prtr-schadstoffe-in-thrude-auf-einen-blick/> [Zugriff 31.07. 2018]

UBA, 2019. Umweltbundesamt. Transformationsprozess zum Treibhausgasneutralen und Ressourcenschonenden Deutschland. Climate Change 36/2019. Dessau-Rosslau. <https://www.umweltbundesamt.de/rescue> [Zugriff 20.02.2020]

UBA 2019a. Umweltbundesamt. UBA Methodenkonvention 3.0 (Stand 02/2019) zur Ermittlung von Umweltkosten. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-02-11_methodenkonvention-3-0_kostensaetze_korr.pdf [Zugriff 20.02.2020]

UBA, 2019b. Technische Maßnahmen zur Minderung akzeptanzhemmender Faktoren der Windenergienutzung an Land. Dessau-Rosslau.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/190611_uba_hg_windenergie_bf.pdf [Zugriff 14.03.2020]

UBA, 2019c. Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2019 - Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2017

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-05-28_cc_23-2019_nir-2019_0.pdf [Zugriff 14.03.2020]

UBA 2019d. Biogasanlagen -Sicherheitstechnische Aspekte und Umweltauswirkungen

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/2019_04_10_uba_hg_biogasanlagen_bf_300dpi.pdf [Zugriff 14.03.2020]

UBA 2019e. Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2018

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-11-07_cc-37-2019_emissionsbilanz-erneuerbarer-energien_2018.pdf [Zugriff 14.03.2020]

UBA 2020. Umweltbundesamt. Detaillierte Inventartabellen im New Format for Reporting (NFR). ANNEX 1:

National sector emissions: Main pollutants, particulate matter, heavy metals and persistent organic pollutants. Available at:

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2019-03-15_nfr-tabellen_0.zip [Zugriff 14.02.2020]

Viebahn, P. et al., 2014. KRESSE - Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems. Abschlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. Available at:

<https://epub.wupperinst.org/frontdoor/index/index/docId/5419> [Zugriff 09.09.2016].

Viebahn, P., Arnold, K., Friege, J., Krüger, C., Nebel, A., Samadi, S., Soukup, O., Ritthoff, M., Teubler, J., Wiesen, K., 2016. KRESSE - Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems. Abschlussbericht 0325324 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

(BMWi). https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/5419/file/5419_KRESSE.pdf [Zugriff 07.02.2020]

Walz, U., Koldrack, N. & Bill, R., 2014. Flächeninanspruchnahme für erneuerbare Energien in Deutschland - Datengrundlage und erste Ergebnisse. In Flächennutzungsmonitoring VI Innenentwicklung – Prognose – Datenschutz Gotthard Meinel, Ulrich Schumacher, Martin Behnisch (Hrsg.) Flächennutzungsmonitoring VI Innenentwicklung – Prognose – Datenschutz IÖR Schriften Band 65 · 2014 IÖR Schriften Band 65. Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V. (IÖR). Available at: <http://slub.qucosa.de/api/qucosa:7538/attachment/ATT-0/> [Zugriff 09.09.2016].

WHO 2018. LEITLINIEN FÜR UMGEBUNGSLÄRM für die Europäische Region ZUSAMMENFASSUNG 2018 unter http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0011/383924/noise-guidelines-exec-sum-ger.pdf?ua=1 [Zugriff 28.04.2020]

Wiesen, K., Teubler, J., Rohn, H., 2013. Resource Use of Wind Farms in the German North Sea - the Example of Alpha Ventus and Bard Offshore I. In: Resources, 2, 504 - 516.

Wiesen, K., Teubler, J., Saurat, M., Wirges, M., Steger, S., Suski, P., 2016. Sachverständigengutachten Ressourcenrucksäcke im Energiebereich.

Wikipedia, 2020. Daten zu Chernobyl und Fukushima. http://en.wikipedia.org/wiki/Chernobyl_Exclusion_Zone; https://en.wikipedia.org/wiki/Japanese_reaction_to_Fukushima_Daiichi_nuclear_disaster [Zugriff 20.04.2020]

Winter S., 2012. Forest naturalness assessment as a component of biodiversity monitoring and conservation management. Forestry. 1. April 2012;85(2):293–304

Wurzel, A. et al., 2013. Anforderungen an den Um- und Ausbau des Höchstspannungsstromnetzes – aus der Sicht von Naturschutz und Kulturlandschaftspflege, Deutscher Rat für Landespflge (DRL). Available at: http://www.landespflge.de/schriften/DRL_SR84.pdf [Zugriff 10.10.2016].

ZSW et al., 2014. Vorbereitung und Begleitung der Erstellung des Erfahrungsberichts 2014 gemäß § 65 EEG, Vorhaben II c, solare Strahlungsenergie, wissenschaftlicher Bericht im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, Juli 2014 <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/XYZ/zwischenbericht-vorhaben-2c,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> [Zugriff 02.06.2017]