

Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland

Modul U.a: Ökologische Evaluierung der Szenarien Referenzszenario, Basisszenario, Szenario Geringerer Ausbau der Übertragungsnetze, Szenario Alternative regionale EE-Verteilung und Restriktionsarmes Szenario

Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie



Projektteam

Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung: Christiane Bernath, Tobias Bossmann, Gerda Deac, Rainer Elsland, Tobias Fleiter, André Kühn, Benjamin Pfluger, Mario Ragwitz, Matthias Rehfeldt, Frank Sensfuß, Jan Steinbach

Consentec GmbH: Andreas Cronenberg, Alexander Ladermann, Christian Linke, Christoph Maurer, Bernd Tersteegen, Sebastian Willemsen,

IFEU: Bernd Franke, Benedikt Kauertz, Martin Pehnt, Nils Rettenmaier

Technische Universität Wien: Michael Hartner, Lukas Kranzl

M-Five: Wolfgang Schade

TEP Energy GmbH: Giacomo Catenazzi, Martin Jakob, Ulrich Reiter

Impressum

Benjamin Pfluger	Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) Breslauer Straße 48 76139 Karlsruhe Benjamin.Pfluger@isi.fraunhofer.de
Bernd Tersteegen	Consentec GmbH Grüner Weg 1 52070 Aachen tersteegen@consentec.de
Bernd Franke	ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH Wilckensstraße 3 D-69120 Heidelberg, Deutschland bernd.franke@ifeu.de
Hintergrundbild Deckblatt	© shutterstock.com/vs148
Veröffentlicht	Januar 2018

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Strategische Umweltprüfungen im Zusammenhang mit der Energiewende	3
3	Methodisches Vorgehen	7
3.1	Untersuchungsraum (Systemgrenze)	7
3.2	Datenfluss und Modellierung	8
4	Ökobilanz der Luftschadstoffe	11
4.1	Methodisches Vorgehen	11
4.2	Datengrundlage der Bilanzierung	12
4.3	Ergebnisse der Bilanzierung	14
4.3.1	THG-Emissionen.....	14
4.3.2	Versauerungspotenzial	17
4.3.3	Terrestrische Eutrophierung	19
4.3.4	Krebsrisiko	21
4.3.5	Belastung mit PM10-Feinstaub.....	24
4.3.6	Ozonbildungspotenzial.....	27
4.3.7	Zusammenfassung und Bewertung	29
5	Flächeninanspruchnahme	32
5.1	Methodisches Vorgehen	32
5.2	Inanspruchnahme landwirtschaftlicher Flächen durch Anbaubiomasse	33
5.3	Andere direkte Flächeninanspruchnahme	35
5.4	Indirekte Flächeninanspruchnahme in Deutschland	48

6	Inanspruchnahme von Oberflächengewässern	52
6.1	Methodisches Vorgehen.....	52
6.2	Bilanz für 2010.....	53
6.3	Bilanz für die Szenarien.....	56
7	Auswirkungen auf Tiere, Pflanzen und Biodiversität	58
7.1	Direkte Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen	58
7.2	Auswirkungen auf Lebensräume und Biodiversität	63
7.3	Minimierung der Auswirkungen in der Planung	66
8	Unfallrisiken.....	68
8.1	Risiko von Todesfällen innerhalb von 30 Tagen nach einem Ereignis.....	68
8.2	Risiko von Unfällen mit einer großen Zahl von Todesfällen	71
8.3	Risiko des Verlustes der Nutzbarkeit großer Landflächen	72
8.4	Risiko durch Transport und Lagerung von CO ₂	74
9	Auswirkungen auf das Landschaftsbild	77
9.1	Landschaftsveränderung durch den Ausbau des Übertragungsnetzes und von Hochspannungsfreileitungen.....	87
9.2	Landschaftsveränderung durch den Ausbau der Windkraftanlagen.....	90
9.3	Räumliche Verteilung der Landschaftsveränderungen.....	90
10	Zusammenfassende Bewertung.....	94
11	Auswirkungen der Szenarien auf die Schutzgüter des UVPG	103
11.1	Auswirkungen auf das Schutzgut Mensch.....	103
11.2	Auswirkungen auf das Schutzgut Tier, Pflanzen, Biodiversität	104
11.3	Auswirkungen auf das Schutzgut Boden.....	104

11.4	Auswirkungen auf das Schutzgut Wasser	105
11.5	Auswirkungen auf das Schutzgut Luft.....	105
11.6	Auswirkungen auf das Schutzgut Klima.....	105
11.7	Auswirkungen auf das Schutzgut Landschaft	106
11.8	Auswirkungen auf das Schutzgut Kultur- und sonstige Sachgüter.....	106
12	Literatur.....	108

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Systematik und Bilanzrahmen der Bewertung.....	8
Abbildung 2	Ablauf der ökologischen Bewertung	10
Abbildung 3	Treibhausgasemissionen in Mt CO ₂ -Äquivalente im Vergleich der Szenarien <i>Ref</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i>	15
Abbildung 4	Treibhausgasemissionen in Mt CO ₂ -Äquivalente im Vergleich der Szenarien <i>Basis</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i>	16
Abbildung 5	Versauerungspotenzial in Mt SO ₂ -Äquivalente im Vergleich der Szenarien <i>Referenz</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i>	18
Abbildung 6	Versauerungspotenzial in Mt SO ₂ -Äquivalente im Vergleich der Szenarien <i>Basis</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i>	19
Abbildung 7	Terrestrisches Eutrophierungspotenzial in Mt PO ₄ -Äquivalente im Vergleich der Szenarien <i>Ref</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i>	20
Abbildung 8	Terrestrisches Eutrophierungspotenzial in Mt PO ₄ -Äquivalente im Vergleich der Szenarien <i>Basis</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i>	20
Abbildung 9	Krebsrisikopotenzial in t Arsen-Äquivalente im Vergleich der Szenarien <i>Ref</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i>	23
Abbildung 10	Krebsrisikopotenzial in t Arsen-Äquivalente im Vergleich der Szenarien <i>Basis</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i>	23
Abbildung 11	Feinstaubpotenzial in Mt PM10-Äquivalente im Vergleich der Szenarien <i>Ref</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i>	26
Abbildung 12	Feinstaubpotenzial in Mt PM10-Äquivalente im Vergleich der Szenarien <i>Basis</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i>	26
Abbildung 13	Ozonbildungspotenzial in Mt Ethen-Äquivalente im Vergleich der Szenarien <i>Ref</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i>	28
Abbildung 14	Ozonbildungspotenzial in Mt Ethen-Äquivalente im Vergleich der Szenarien <i>Basis</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i>	28
Abbildung 15	Flächeninanspruchnahme durch Anbaubiomasse im Vergleich der Szenarien <i>Ref</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i>	34
Abbildung 16	Flächeninanspruchnahme durch Anbaubiomasse im Vergleich der Szenarien <i>Basis</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i>	34

Abbildung 17	Flächeninanspruchnahme durch Braunkohletagebau in Deutschland, 1991-2015	37
Abbildung 18	Flächeninanspruchnahme durch Braunkohletagebau in Deutschland im <i>Referenzszenario</i> , 2000-2050	37
Abbildung 19	Flächeninanspruchnahme durch Braunkohletagebau in Deutschland im <i>restriktionsarmen Szenario</i> , 2000-2050	38
Abbildung 20	Flächeninanspruchnahme durch Braunkohletagebau in Deutschland im <i>Basisszenario</i> , 2000-2050	38
Abbildung 21	Dachflächenbelegung in Deutschland im Vergleich der Szenarien <i>Ref</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i> , 2000-2050	46
Abbildung 22	Dachflächenbelegung in Deutschland im Vergleich der Szenarien <i>Basis</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i> , 2000-2050	46
Abbildung 23	Direkte Flächeninanspruchnahme in Deutschland (ohne Anbaubiomasse) im Vergleich der Szenarien <i>Ref</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i> , 2000-2050	47
Abbildung 24	Direkte Flächeninanspruchnahme in Deutschland (ohne Anbaubiomasse) im Vergleich der Szenarien <i>Basis</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i> , 2000-2050	47
Abbildung 25	Indirekte Flächeninanspruchnahme im Vergleich der Szenarien <i>Ref</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i>	51
Abbildung 26	Indirekte Flächeninanspruchnahme im Vergleich der Szenarien <i>Basis</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i>	51
Abbildung 27	Inanspruchnahme der Ressource Oberflächengewässer durch die Energieerzeugung in Deutschland, 2010 bis 2050 im Vergleich der Szenarien <i>Ref</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i>	57
Abbildung 28	Inanspruchnahme der Ressource Oberflächengewässer durch die Energieerzeugung in Deutschland, 2010 bis 2050 im Vergleich der Szenarien <i>Basis</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i>	57
Abbildung 29	Kumulierte Mortalität bei mittleren Überlebensraten von 90% und 80 % pro überwundenem Hindernis [Quelle: IKSR 2004]	59
Abbildung 30	Kollisionsraten von Vögeln (links) und Fledermäusen (rechts) mit Windkraftwerken; aus [Hötker 2006]	60
Abbildung 31	Ergebnisse der Bewertung der Maßnahmen im Netzentwicklungsplan 2012 für Schutzgüter Tiere, Pflanzen und biologische Vielfalt.....	67

Abbildung 32	Todesfallrisiko durch Energieverbrauch in Deutschland, 2010 bis 2050 im Vergleich der Szenarien <i>Ref</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i>	70
Abbildung 33	Todesfallrisiko durch Energieverbrauch in Deutschland, 2010 bis 2050 im Vergleich der Szenarien <i>Basis</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i>	70
Abbildung 34	Risiko von Unfällen mit einer großen Zahl von Todesfällen.....	72
Abbildung 35	CO ₂ -Leckage pro Jahr	76
Abbildung 36	Windkraftanlagen, installierte Kapazität im Vergleich der Szenarien <i>Ref</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i>	79
Abbildung 37	Windkraftanlagen, installierte Kapazität im Vergleich der Szenarien <i>Basis</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i>	80
Abbildung 38	PV-Freiflächenanlagen, installierte Kapazität im Vergleich der Szenarien <i>Ref</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i>	81
Abbildung 39	PV-Freiflächenanlagen, installierte Kapazität im Vergleich der Szenarien <i>Bais</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i>	82
Abbildung 40	PV-Aufdachanlagen im Vergleich der Szenarien <i>Ref</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i>	83
Abbildung 41	PV-Aufdachanlagen im Vergleich der Szenarien <i>Basis</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i>	84
Abbildung 42	Installierte Kapazität [MW] für PV-Aufdach, PV-Freifläche und Windkraft an Land in den 6 Modellierungs-Regionen; Ist-Zustand 2012 und Ausbau 2050 bei den Szenarien <i>Ref</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i>	85
Abbildung 43	Installierte Kapazität [MW] für PV-Aufdach, PV-Freifläche und Windkraft an Land in den 6 Modellierungs-Regionen; Ist-Zustand 2012 und Ausbau 2050 bei den Szenarien <i>Basis</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i>	86
Abbildung 44	Zahl der Windkraftanlagen 2012, ÜN-Trassen-km 2013 und Werte für 2050 in den 6 Modellierungs-Regionen für die Szenarien <i>Referenz</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i>	92
Abbildung 45	Zahl der Windkraftanlagen 2012, ÜN-Trassen-km 2013 und Werte für 2050 in den 6 Modellierungs-Regionen für die Szenarien <i>Basis</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i>	93

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Wirkzusammenhänge der untersuchten Hauptkriterien und der Schutzgüter nach UVPG (D = Direkte Wirkung, W = Wechselwirkung indirekt).....	6
Tabelle 2	Treibhauspotenzial der im Rahmen dieses Projekts berücksichtigten Stoffe	15
Tabelle 3	Versauerungspotenzial der im Rahmen dieses Projekts erhobenen Stoffe	17
Tabelle 4	Eutrophierungspotenzial der im Rahmen dieses Projekts berücksichtigten Stoffe	19
Tabelle 5	Krebsrisikopotenzial der im Rahmen dieses Projekts erhobenen Stoffe	22
Tabelle 6	PM10-Risikopotenzial von Luftschadstoffen.....	25
Tabelle 7	Ozonbildungspotenzial der im Rahmen dieses Projekts berücksichtigten Stoffe	27
Tabelle 8	Nettoergebnisse der Ökobilanz der Luftschadstoffe im Vergleich der Szenarien <i>Ref</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i>	29
Tabelle 9	Nettoergebnisse der Ökobilanz der Luftschadstoffe im Vergleich der Szenarien <i>Basis</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i>	30
Tabelle 10	Ökobilanz der Luftschadstoffe – Minderung gegenüber 2010 im Vergleich der Szenarien <i>Ref</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i>	30
Tabelle 11	Ökobilanz der Luftschadstoffe – Minderung gegenüber 2010 im Vergleich der Szenarien <i>Basis</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i>	31
Tabelle 12	Flächeninanspruchnahme durch Braunkohletagebau in Deutschland im Vergleich der Szenarien <i>Ref</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i>	39
Tabelle 13	Flächeninanspruchnahme durch Braunkohletagebau in Deutschland im Vergleich der Szenarien <i>Basis</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i>	39
Tabelle 14	Flächeninanspruchnahme durch AKW und fossile Kraftwerke in Deutschland im Vergleich der Szenarien <i>Ref</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i>	42
Tabelle 15	Flächeninanspruchnahme durch AKW und fossile Kraftwerke in Deutschland im Vergleich der Szenarien <i>Basis</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i>	42

Tabelle 16	Direkte Flächeninanspruchnahme durch PV-Freiflächenanlagen in Deutschland im Vergleich der Szenarien <i>Ref</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i>	43
Tabelle 17	Direkte Flächeninanspruchnahme durch PV-Freiflächenanlagen in Deutschland im Vergleich der Szenarien <i>Basis</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i>	43
Tabelle 18	Direkte Flächeninanspruchnahme durch Windkraftanlagen an Land in Deutschland im Vergleich der Szenarien <i>Ref</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i>	44
Tabelle 19	Direkte Flächeninanspruchnahme durch Windkraftanlagen an Land in Deutschland im Vergleich der Szenarien <i>Basis</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i>	44
Tabelle 20	Indirekte Flächeninanspruchnahme [ha] durch Windkraftanlagen in Deutschland im Vergleich der Szenarien <i>Ref</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i>	48
Tabelle 21	Indirekte Flächeninanspruchnahme [ha] durch Windkraftanlagen in Deutschland im Vergleich der Szenarien <i>Basis</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i>	48
Tabelle 22	Indirekte Flächeninanspruchnahme durch Übertragungsnetze in Deutschland im Vergleich der Szenarien <i>Referenz</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i>	49
Tabelle 23	Indirekte Flächeninanspruchnahme durch Übertragungsnetze in Deutschland im Vergleich der Szenarien <i>Basis</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i>	50
Tabelle 24	Turbinendurchfluss und Jahresstromerzeugung bei Laufwasserkraftwerken in Baden-Württemberg im Jahr 2010.....	53
Tabelle 25	Kenndaten für Wärmekraftwerke in Deutschland, 2010	54
Tabelle 26	Inanspruchnahme der Ressource Wasser durch die Energieerzeugung in Deutschland im Jahr 2010.....	56
Tabelle 27	Verluste an Fischen durch Kühlwassernutzung im Bereich der deutschen Küsten einschließlich Ästuare	60
Tabelle 28	Rotorflächen der installierten Windkraftanlagen an Land (Mio. m ²) im Vergleich der Szenarien <i>Ref</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i>	61
Tabelle 29	Rotorflächen der installierten Windkraftanlagen an Land (Mio. m ²) im Vergleich der Szenarien <i>Basis</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i>	61

Tabelle 30	Installierte Leistung von Windkraftanlagen in GW (in Klammern der Anteil Waldstandorte in Prozent) sowie die Zahl der Anlagen im Wald im Vergleich der Szenarien <i>Ref</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i>	61
Tabelle 31	Installierte Leistung von Windkraftanlagen in GW (in Klammern der Anteil Waldstandorte in Prozent) sowie die Zahl der Anlagen im Wald im Vergleich der Szenarien <i>Basis</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i>	62
Tabelle 32	Auswirkungen auf Lebensräume und Biodiversität	64
Tabelle 33	Direkte Todesfälle (Sterblichkeit 30 Tage nach Unfall) durch Energieverbrauch im Deutschland 2010	69
Tabelle 34	Umgesiedelte Personen und als nicht bewohnbar deklarierte Flächen bei schweren AKW-Unfällen	73
Tabelle 35	Risiko der langfristigen Flächenkontamination bei 40 Jahre Betrieb von 25 AKW mit je 1,3 GW _{el} [GRS 1981].....	74
Tabelle 36	Risiko der Umsiedlung von Personen bei 40 Jahre Betrieb von 25 AKW mit je 1,3 GW _e [GRS 1981].....	74
Tabelle 37	Auswirkungen auf das Landschaftsbild in Deutschland im Vergleich der Szenarien <i>Ref</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i>	77
Tabelle 38	Auswirkungen auf das Landschaftsbild in Deutschland im Vergleich der Szenarien <i>Basis</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i>	78
Tabelle 39	Trassen-, Stromkreislängen sowie Flächenwirkung des Übertragungsnetzes 2013 in den Szenarien <i>Ref</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i> für 2050	88
Tabelle 40	Trassen-, Stromkreislängen sowie Flächenwirkung des Übertragungsnetzes 2013 in den Szenarien <i>Basis</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i> für 2050.....	89
Tabelle 41	Kenngroßen für die Landschaftsveränderung durch Onshore-Windkraftanlagen im Vergleich der Szenarien <i>Ref</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i>	90
Tabelle 42	Kenngroßen für die Landschaftsveränderung durch Onshore-Windkraftanlagen im Vergleich der Szenarien <i>Basis</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i>	91
Tabelle 43	Ausgewählte Kriterien für die zusammenfassende Bewertung: Indikatoren und Zahlenwerte für die Szenarien <i>Referenz</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i>	99

Tabelle 44	Ausgewählte Kriterien für die zusammenfassende Bewertung: Indikatoren und Zahlenwerte für die Szenarien <i>Basis</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i>	100
Tabelle 45	Ausgewählte Kriterien für die zusammenfassende Bewertung: Veränderung in den Szenarien <i>Referenz</i> , <i>RAS</i> und <i>Basis</i> relativ zum Jahr 2010 (bei CCS relativ zu RAS im Jahr 2050).....	101
Tabelle 46	Ausgewählte Kriterien für die zusammenfassende Bewertung: Veränderung in den Szenarien <i>Basis</i> , <i>geNA</i> und <i>Regio</i> relativ zum Jahr 2010 (bei CCS relativ zu RAS im Jahr 2050).....	102

1 Einleitung

Das vorliegende Dokument stellt das Berichtsmodul U.a des Projekts „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“ dar. In Modul U werden die Ergebnisse der Umweltbewertung des Projekts zusammengefasst. Der Bericht baut auf den folgenden Modulen auf:

- Modul 1: Hintergrund, Szenarioarchitektur und übergeordnete Rahmenparameter
- Modul 2: Modelle und Modellverbund
- Modul 3: Referenzszenario und Basisszenario
- Modul 4: Szenario Geringerer Ausbau der Übertragungsnetze
- Modul 5: Szenario Alternative regionale EE-Verteilung
- Modul 6: Restriktionsarmes Szenario

In diesem Bericht werden die ökologischen Wirkungen der vorstehenden Szenarien untersucht. Im Einzelnen werden bei der Umweltbewertung jeweils drei Szenarien verglichen:

Ref – Basis – RAS

- Das *Referenzszenario (Ref)*, das ein „Auslaufen“ der Energiewende unterstellt, um einen Bezugspunkt für Modellergebnisse und Kostenvergleich mit den Zielszenarien zu bilden,
- das *Basisszenario (Basis)*, in welchem eine recht freie kostenminimierende Erreichung der energie- und klimapolitischen Ziele (Reduktion der THG-Emission um 80%) angestrebt wird, und
- das *restriktionsarme Szenario (RAS)*, in dem CCS als Technologie nicht nur in der Industrie, sondern auch in der Stromerzeugung zur Verfügung steht und der Ausbau der erneuerbaren Energien im Vergleich zum Basisszenario noch weniger technologischen Vorgaben unterliegt (keine Vorgabe eines Mindestzubaues von Wind auf See auf mindestens 15 GW bzw. von PV auf mindestens 52 GW, wovon im Basisszenario ein relativ hoher Anteil als Dachanlagen auszuführen ist).

Basis – geNa – Regio

- Das *Referenzszenario (Ref)* wie oben beschrieben,
- das *Szenario Geringerer Ausbau der Übertragungsnetze (geNA)*, in dem gegenüber dem Basisszenario der Ausbau des Übertragungsnetzes um rund 21.000 Stromkreiskilometer geringer ausfällt,
- das *Szenario Alternative regionale EE-Verteilung (Regio)*, in dem im Vergleich zum Basisszenario der Ausbau der Windenergie an Land gleichmäßiger über Deutschland verteilt wird.

Umweltwirkungen sind in der Systemoptimierung nicht als Kostenfaktor bewertet, sondern werden in diesem Modul qualitativ und quantitativ bewertet, um diese bei Ent-

scheidungen berücksichtigen zu können. Dabei können einige Wirkungen quantifiziert und ggf. auch ergänzend monetarisiert werden, was bei anderen jedoch aufgrund methodischer Probleme nicht möglich ist. Daher ist es auch sinnvoll, diese separat auszuweisen.

2 Strategische Umweltprüfungen im Zusammenhang mit der Energiewende

Der Erneuerbare Energien (EE)-Ausbau bei gleichzeitigem Rückbau fossiler und nuklearer Stromerzeugung ist mit positiven und negativen Auswirkungen auf Umwelt und Naturschutz verbunden. Dabei ist die Wirksamkeit von Einzelmaßnahmen (z.B. Ausbau von Windkraft, PV, Geothermie, Speicherkraftwerken, Neubau, Rückbau und veränderte Betriebsweise fossiler Kraftwerke, Rückbau nuklearer Kraftwerke, Erzeugung und Umwandlung von Biomasse, Ausbau von Netzen) im Einzelnen zu prüfen und zu bewerten.

Zur Orientierung wird das Verfahren der Strategischen Umweltprüfung (SUP) angewandt und hierbei der SUP-Leitfaden des Bundesumweltministeriums aus dem Jahr 2010 zugrunde gelegt [BMU 2010]. Bei einer SUP ist zu ermitteln, ob und welche Auswirkungen die Durchführung des Plans oder Programms und der Alternativen auf Schutzgüter des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) haben:

- Menschen, einschließlich der menschlichen Gesundheit, Tiere, Pflanzen und die biologische Vielfalt,
- Boden, Wasser, Luft, Klima und Landschaft,
- Kultur und sonstige Sachgüter sowie
- die Wechselwirkungen zwischen den vorgenannten Schutzgütern.

Der Schutzgutansatz ist derzeit das umfassendste Umweltdimensionenkonzept. Neben der menschlichen Gesundheit und naturschutzrechtlichen Aspekten sind in diesem Konzept auch die Belange des Boden-, Gewässer- und Klimaschutzes integriert. Darüber hinaus sind mit den Schutzgütern Landschaft sowie Kultur- und sonstige Sachgüter Aspekte berücksichtigt, die den Rahmen der streng naturwissenschaftlich begründeten Bewertbarkeit verlassen. Da jedoch insbesondere die Beeinträchtigung des Landschaftsbildes durch Maßnahmen der Energiewende in der öffentlichen Debatte einen großen Raum einnimmt, erscheint es notwendig, diesen Aspekt 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 wird im Rahmen der Bewertung um den Aspekt „Ressourcen“ im Sinne von „Rohstoffen“ erweitert. Denn während die Ressourcen Boden (auch im Sinne von Fläche), Wasser, biologische Vielfalt und Ökosystemleistung im Schutzgutansatz enthalten sind, fehlen die natürlichen Rohstoffe, vor allem die nicht-erneuerbaren energetischen und nicht-energetischen Ressourcen im Schutzgutansatz des UVPG (vgl. Positionspapier „Ressourcenschutzrecht“ des Umweltbundesamtes vom Dezember 2013, [UBA 2013a]).

Die Betroffenheit der jeweiligen Schutzgüter wird anhand eines definierten Kriterienkataloges ermittelt, der die Umweltauswirkungen der Energiewende möglichst in ihrer vollen Breite abdecken soll. Die Diskussion der Beeinträchtigung der einzelnen Schutzgüter macht sich an einzelnen Kriterien nebst definierten Unterkriterien fest, die im Folgenden kurz beschrieben werden:

1. **Klimaschutz**, beschrieben durch die Menge an Treibhausgasemissionen im betrachteten Jahr im jeweiligen Szenario
2. **Luftqualität in Deutschland**, beschrieben durch die Unterkriterien:
 - a. Emissionen von Stoffen mit bodennaher Ozonbildung (Sommersmog), ausgedrückt in Ethen-Äquivalent im betrachteten Jahr im jeweiligen Szenario
 - b. Emissionen an krebserregenden Luftschadstoffen, ausgedrückt als Arsen-Äquivalent im betrachteten Jahr im jeweiligen Szenario
 - c. Feinstaubemissionen im betrachteten Jahr im jeweiligen Szenario
3. **Wasserqualität in Deutschland**, beschrieben durch die Unterkriterien:
 - a. Wasserentnahme aus deutschen Flüssen zum Zwecke der Kühlung im betrachteten Jahr im jeweiligen Szenario. Die Wasserentnahme ist dabei auch Indikator für die Schädigung von Wasserlebewesen durch die Entnahme von Kühlwasser.
 - b. Erwärmung deutscher Flüsse durch Kühlwassereinleitungen nach Entnahme und Nutzung im betrachteten Jahr im jeweiligen Szenario. Die Auswirkungen auf die Gewässerökologie in Form von Wärmeeintrag sind neben der direkten thermischen Schädigung von Organismen vor allem auch in der geänderten Sauerstoffzusammensetzung des erwärmten Wassers zu sehen.
4. **Flächenbeanspruchung in Deutschland**, beschrieben durch die Unterkriterien:
 - a. Direkte Flächeninanspruchnahme im betrachteten Jahr im jeweiligen Szenario im Sinne von zusätzlich überbauten Flächen für Anlagen der Energieerzeugung und Energietransporte
 - b. Indirekte Flächeninanspruchnahme im betrachteten Jahr im jeweiligen Szenario aufgrund von Abstandsflächen mit Nutzungsrestriktionen
 - c. Flächen für Anbaubiomasse im betrachteten Jahr im jeweiligen Szenario
5. **Flächenbeanspruchung im Ausland**, beschrieben durch die Unterkriterien:
 - a. Flächenbeanspruchung durch Nettostromimport im betrachteten Jahr im jeweiligen Szenario äquivalent zum Flächenbedarf der Stromerzeugung in Deutschland aufgrund von Überlegungen zur Bewertungssymmetrie
 - b. Import nicht erneuerbarer Energieträger im betrachteten Jahr im jeweiligen Szenario als Indikator für die Flächenbeanspruchung zum Abbau fossiler Energieträger in Drittländern

- c. Flächenbeanspruchung für importierte Anbaubiomasse im betrachteten Jahr im jeweiligen Szenario
6. **Flora und Fauna in Deutschland**, beschrieben durch die Unterkriterien:
- a. Nährstoffeinträge in Ökosysteme durch luftgetragene Schadstoffe, ausgedrückt als terrestrische Eutrophierung im betrachteten Jahr im jeweiligen Szenario
 - b. Säureeinträge in Ökosysteme durch luftgetragene Schadstoffe, ausgedrückt als Versauerung im betrachteten Jahr im jeweiligen Szenario
 - c. Schäden an aquatischen Lebensgemeinschaften durch Wasserentnahme und Abwärme im betrachteten Jahr im jeweiligen Szenario
 - d. Schäden der Fauna durch Rotorflächen von Windkraftanlagen im betrachteten Jahr im jeweiligen Szenario
 - e. Zerschneidung von Biotopen durch direkte und indirekte Flächeninanspruchnahme bzw. Anbauflächen für Biomasse im betrachteten Jahr im jeweiligen Szenario
7. **Landschaftsbild in Deutschland**, beschrieben durch die Unterkriterien:
- a. Zahl der Windkraftanlagen an Land im betrachteten Jahr im jeweiligen Szenario im Sinne von sichtbaren Masten und somit ggf. gestörten Sichtbeziehungen
 - b. Gesamtleistung und Rotorfläche der Windkraftanlagen an Land im betrachteten Jahr im jeweiligen Szenario als Indikator als Grad der visuellen Beeinträchtigung
 - c. Leistung der Dachflächen-PV im betrachteten Jahr im jeweiligen Szenario als Messgröße für die Größe der Anlagen auf den Dächern und somit den Grad der visuellen Beeinträchtigung
 - d. Fläche für Freiflächen-PV-Anlagen im betrachteten Jahr im jeweiligen Szenario als Messgröße für die Größe der Anlagen und somit den Grad der visuellen Beeinträchtigung
 - e. Oberirdische Hochspannungstrassen (differenziert nach Spannungsebenen) in km im betrachteten Jahr im jeweiligen Szenario
 - f. Braunkohlebetriebsflächen im betrachteten Jahr im jeweiligen Szenario im Sinne von Beeinträchtigungen des Landschaftsbildes durch offene Abbaugruben
 - g. Braunkohletagebau, alle Flächen im betrachteten Jahr im jeweiligen Szenario als Indikator für die Beeinträchtigung des natürlichen Landschaftsbildes durch langfristig überformte Gebiete
8. **Risiko**, beschrieben durch die Unterkriterien:
- a. Unfallrisiko durch deutsche AKW im betrachteten Jahr im jeweiligen Szenario

- b. Unfallrisiko weltweit (Todesfälle innerhalb von 30 Tagen) im betrachteten Jahr im jeweiligen Szenario
- c. Erdölkontamination bei Förderung und Transport im betrachteten Jahr im jeweiligen Szenario insbesondere durch Pipelineleckagen (v.a. im Ausland)
- d. CCS-Pipeline-Risiko in Deutschland im betrachteten Jahr im jeweiligen Szenario insbesondere durch Pipelineleckagen

Die Betroffenheit der Schutzgüter nach UVPG erfolgt entweder direkt oder über indirekte Wirkungszusammenhänge (Wechselwirkungen). Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Wirkzusammenhänge der untersuchten Hauptkriterien. In der zusammenfassenden Bewertung der Ergebnisse werden erst die Veränderungen zum Referenzjahr 2010 für alle oben aufgelisteten Unterkriterien relativ in Form von Prozentwerten ausgedrückt. Die Bewertung der prognostizierten Auswirkungen auf die Schutzgüter des UVPG erfolgt dann in Form einer verbal argumentativen Auseinandersetzung.

Tabelle 1 Wirkzusammenhänge der untersuchten Hauptkriterien und der Schutzgüter nach UVPG (D = Direkte Wirkung, W = Wechselwirkung indirekt)

	Klimaschutz	Luftqualität in Deutschland	Wasserqualität in Deutschland	Flächenbeanspruchung in Deutschland	Flächenbeanspruchung im Ausland	Flora und Fauna in Deutschland	Landschaftsbild in Deutschland	Risiko
Mensch	W	D		W	W		W	D
Tier, Pflanzen, Biodiversität	W	D	D	D	D	D		
Boden		D		D	D			
Wasser		D	D	W	W			D
Luft		D						
Klima	D							
Landschaftsbild				D	D		D	
Kultur- und sonstige Sachgüter	W	D		D	D		W	

3 Methodisches Vorgehen

Ziel der Untersuchung ist die Beantwortung der Frage:

- Welche Umweltauswirkungen hat die Energieversorgung Deutschlands im jeweiligen Bezugsjahr im Vergleich der untersuchten Szenarien sowie im Vergleich zur Situation im Jahr 2010?

Der im Folgenden skizzierte Untersuchungsrahmen hat folgende Ziele:

- Die Auswirkung der Änderungen der Energieversorgung Deutschlands bis 2050 soll für alle im UVPG genannten Schutzgüter bewertet werden.
- Die Darstellung soll soweit möglich anhand quantitativer Kriterien erfolgen, mit denen die Vergleichbarkeit der Maßnahmen möglich wird (z.B. Inanspruchnahme von Naturraum, eutrophierende Wirkung von Schadstoffemissionen in die Luft).

Bei der Bewertung muss zwischen den **direkten Auswirkungen** durch Emissionen am Standort der Anlagen selbst und den **indirekten Auswirkungen** (z.B. die Klimarelevanz der Emissionen oder der Beitrag zur Versauerung der Böden) unterschieden werden. Für diese Aufgabe bedarf es eines Instrumentes, das in der Lage ist, komplex zusammenhängende Systeme zu bewerten. Das einzige Umweltbewertungsinstrument, das derzeit hierzu in der Lage ist, ist die Methode der **Ökobilanz**. Sie ist das erste Handwerkszeug, das in einem internationalen Rahmen wissenschaftlich entwickelt und in ihren Grundsätzen genormt wurde [DIN/EN/ISO 14040ff]. Eine methodisch einwandfreie Handhabung in Einklang mit den dort formulierten Konventionen vermindert das Risiko einer fehlerhaften Anwendung.

3.1 Untersuchungsraum (Systemgrenze)

Im Rahmen der SUP werden alle Umweltfolgen berücksichtigt, die sich durch den Energieverbrauch in Verkehr, Industrie, Raumwärme und Warmwasser, Strombereitstellung sowie durch CCS in Deutschland ergeben.

Die Vorketten für die Energieträgerbereitstellung, soweit diese in Deutschland lokalisiert sind, werden bei der Modellierung in Deutschland dem Sektor Industrie zugeordnet. In der Umweltbewertung werden Vorketten im Ausland separat berücksichtigt. Der Bedarf an nicht in Deutschland geförderten oder hergestellten Energieträgern und Rohstoffen wird auf Basis von Zahlen der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) für das Jahr 2014 abgeleitet [AGEB 2015]. Für die Prognosezahlen wird ein gleichbleibender Importanteil unterstellt. Bzgl. der energetisch genutzten Biomasse werden die in Modul 1, Kapitel 5 festgelegten Importanteile verwendet.

Darüber hinaus werden die Umweltfolgen berücksichtigt, die sich aus dem notwendigen Zubau an Infrastrukturmaßnahmen, einschließlich der Netze, für die Energieversorgung ergeben. Die flächenbezogenen Umweltlasten aus der bereits bestehenden Infrastruktur werden im Vergleich herangezogen.

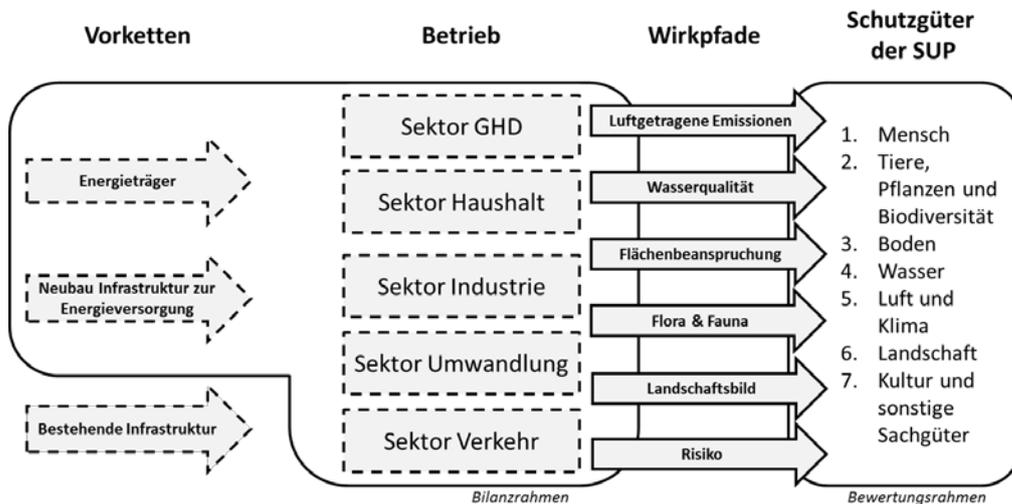


Abbildung 1 Systematik und Bilanzrahmen der Bewertung

Insbesondere die Ableitung zukünftiger Umweltwirkungen im globalen Kontext durch den Import von Energieträgern bzw. Stromimporte stellt an die Bewertung besondere methodische Herausforderungen, die im Vergleich mit der Bewertung für Deutschland nur mit Abstrichen an die Detailtiefe und Genauigkeit umgesetzt werden können. Die entsprechenden Limitierungen betreffen insbesondere den Flächenbedarf für die Anbaubiomasse, der ohne tiefere Kenntnis der zukünftig importierten Energieträger aus Anbaubiomasse und deren genauen Wertschöpfungsketten nur mit großen Unsicherheiten abgeschätzt werden kann. Im Rahmen der Bewertung wird daher auch für die importierte Biomasse der Flächenverbrauchsfaktor für Deutschland unterstellt. Weiterhin sind für importierte Energieträger und Rohstoffe aufgrund mangelnder Verfügbarkeit von Daten keine Effizienz- und bzw. oder Suffizienzmaßnahmen in der Bewertung berücksichtigt.

3.2 Datenfluss und Modellierung

Eine der größten Herausforderungen im Rahmen der SUP ist die Transformation der Ergebnisse der Szenarien in ein Format, welches die Bewertung der Umweltfolgen zulässt. Im Rahmen der Studie erfolgt dies mithilfe verschiedener Modelle und Instrumente, die in der fachlichen Praxis auf eine breite Akzeptanz stoßen.

Im Detail sieht der Datenfluss wie folgt aus:

- Aus der Energiebereitstellung für die Sektoren Verkehr, Industrie, Raumwärme und Warmwasser, Strombereitstellung sowie ggf. durch den Einsatz von CCS ergibt sich ein Katalog an Maßnahmen.
- Im Rahmen der Gestaltung der Szenarien wird ermittelt, welche Maßnahme wie zum Einsatz kommt. Daraus ergibt sich die Höhe des Energieträgereinsatzes und der notwendigen infrastruktureitigen Zubaumaßnahmen.
- Die damit verbundenen Umweltfolgen werden mittels verschiedener Modelle quantifiziert:
 1. Life Cycle Assessment (LCA, auch Ökobilanz genannt) als die rechnerische Summation aller Aufwendungen im Rahmen der Genese, Produktion und Förderung der Energieträger sowie die Emissionen bei der Nutzung (i.d.R. Verbrennung)
 2. Fachliche Expertise zu Fragen der Organismenschädigung und Risikoabschätzung
 3. Quantifizierung von Raumkonkurrenzen
- Die Ergebnisse dieser Quantifizierung adressieren die drei Wirkpfade innerhalb des SUP-Modells:
 1. Luftgetragene Emissionen
 2. Emissionen ins Wasser
 3. Flächeninanspruchnahme / Ressourcennutzung
- Auf Basis dieser Ergebnisse lassen sich die Umweltfolgen qualifizieren und deren Auswirkungen auf die Schutzgüter des SUP darstellen. Einer besonderen Berücksichtigung bedürfen dabei die möglicherweise auftretenden Wechselwirkungen sowie die Umweltfolgen, die sich durch nicht sachgemäßen Betrieb bzw. Unfälle ergeben können.

Abbildung 2 zeigt eine detaillierte Übersicht der Berechnungsmodelle bzw. Eingangsdaten der ökologischen Bewertung der Szenarien sowie die unterschiedlichen für die Bewertung herangezogenen Kriterien.

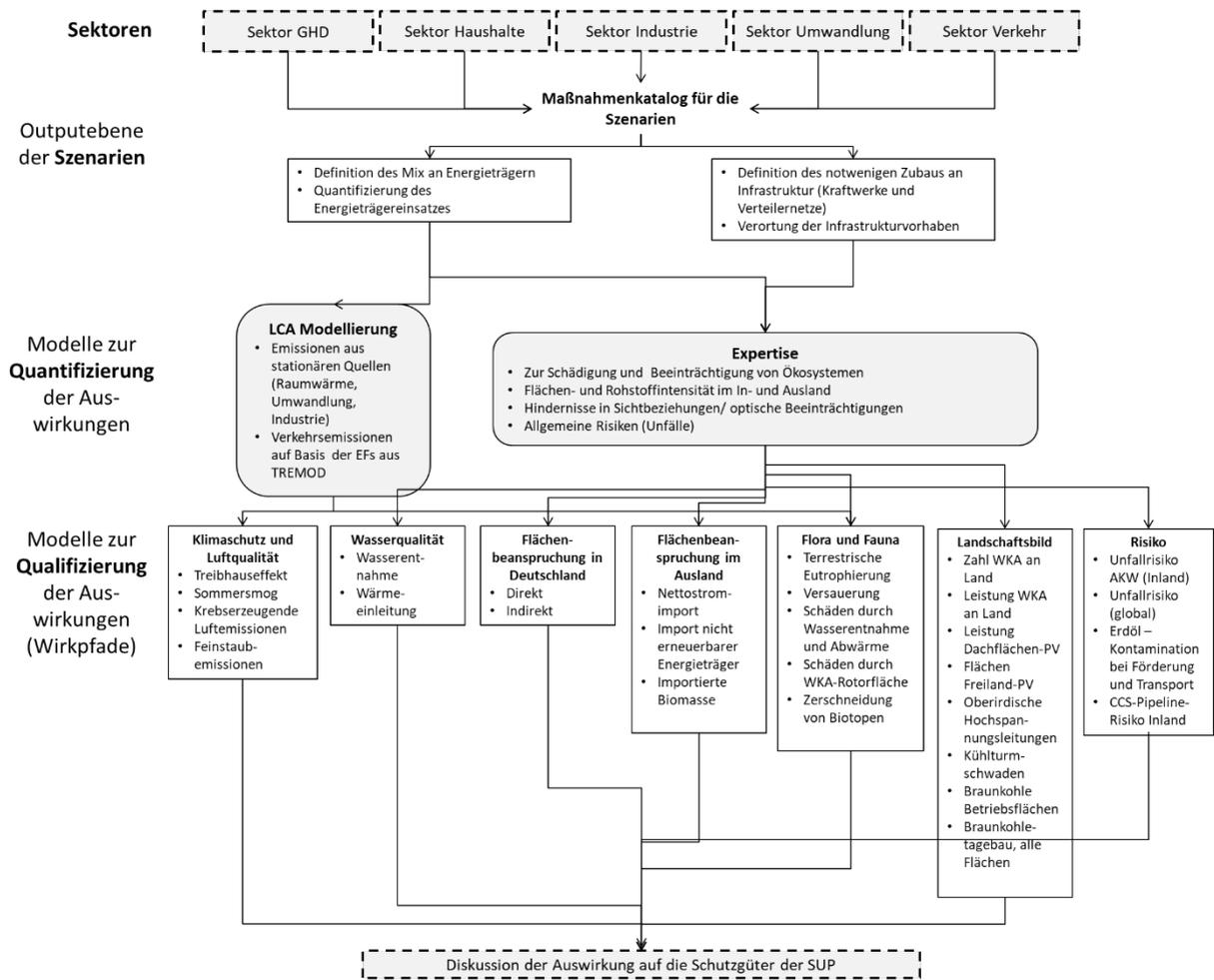


Abbildung 2 Ablauf der ökologischen Bewertung

4 Ökobilanz der Luftschadstoffe

4.1 Methodisches Vorgehen

Die Bewertung der Luftschadstoffe erfolgt mittels der Ökobilanzmethode. Sie ist das erste Handwerkszeug, das in einem internationalen Rahmen wissenschaftlich entwickelt und in ihren Grundsätzen genormt wurde. Eine methodisch einwandfreie Handhabung in Einklang mit den dort formulierten Konventionen vermindert das Risiko einer fehlerhaften Anwendung. 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 Ökobilanzen wurde der methodische Ablauf der Ökobilanz festgelegt.

Der **Bilanzraum** der ökologischen Bilanzierung umfasst den Weg aller Prozesse der Energieerzeugung bis hin zur Verteilung des Stroms und der Fernwärme bis zum Verbraucher mit entsprechenden Leitungs- und Umspannverlusten. Dabei werden sowohl die Kraftwerksprozesse mit den unterschiedlichen Energieträgern als auch die Bereitstellung der Energieträger und die Entsorgung entstehender Abfälle berücksichtigt.

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, die dadurch zu Stande kommen könnte, dass zu einer Kategorie sehr viele, zu einer anderen sehr wenige Informationen in der Sachbilanz erhalten wurden.

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 abgeleitet werden.

4.2 Datengrundlage der Bilanzierung

Generell ist zwischen den prozessbedingten Emissionen (hier: vornehmlich Feuerungsemissionen, also auch durch Energieeinsatz¹) und den Umweltwirkungen durch die Förderung bzw. den Anbau und die Aufbereitung der eingesetzten Energieträger zu unterscheiden. Für die Bilanzierung braucht es so genannte „Emissionsfaktoren“, mit denen die Umweltwirkungen (im vorliegenden Fall die Luftschadstoffe) auf Basis der jeweiligen Szenarioergebnisse errechnet werden können. Die Ergebnisse der Szenarien liegen im Format „eingesetzter Energieträger in TWh pro Anwendung“ vor. Somit gilt es, spezifische Emissionsfaktoren zu entwickeln, welche das Ausgabeformat in die entsprechenden Umweltwirkungen transformiert. Dabei sind die Parameter „technologischer Prozess“ und „Energieträger“ bedeutend für die Auswahl des richtigen Emissionsfaktors im Rahmen der Umweltbewertung. So ist bspw. die Angabe „Stromerzeugung“ und „Steinkohle“ hinreichend spezifisch, um den Emissionsfaktor „Steinkohlekraftwerk“ zur Anwendung zu bringen.

Bei der Ableitung der Emissionsfaktoren sind drei Klassen zu unterscheiden:

1. Prozessspezifische Emissionsfaktoren: Diese passen exakt für den technologischen Prozess und den eingesetzten Brennstoff (wie bspw. im Falle der Steinkohlekraftwerke). Prozessspezifische Emissionsfaktoren werden für die Bilanzierung der Luftemissionen in den Sektoren Umwandlung und Verkehr ausschließlich sowie in den Sektoren Industrie, Haushalt und GHD teilweise eingesetzt. Die prozessspezifischen Emissionsfaktoren für den Sektor Umwandlung entstammen

¹ Im Gegensatz zur Unterteilung der Emissionen im Industriesektor beinhalten die prozessbedingten Emissionen in der SUP auch den Energieeinsatz. Im Industriesektor wird dagegen zwischen energiebedingten und prozessbedingten Emissionen unterschieden. Bei letzteren ist der Einsatz, zumeist eine Verbrennung, von Energieträgern erforderlich, um bestimmte Prozesse, z.B. die Klinkerbrennung, durchführen zu können.

der ifeu-eigenen Strom- und Wärmemodellierung, die Emissionsfaktoren für den Verkehr sind der TREMOD-Datenbank² entnommen.

2. Anwendungsspezifische Emissionsfaktoren: Diese passen zwar für die Anwendung, sind aber nicht zwingend brennstoffspezifisch. So kommen bspw. in den Sektoren Haushalt und GHD anwendungsspezifische Emissionsfaktoren zum Einsatz, um die Emissionen aus der Heizung von Gebäuden abzubilden. Dabei wird nicht zwischen den einzelnen Brennstoffen unterschieden, wohl aber zwischen dem Einsatz flüssiger, gasförmiger oder fester Brennstoffe. Die Datenquelle für diese Emissionsfaktoren ist das „Emission inventory guidebook“ der EMEP/EEA aus dem Jahr 2013 [EEA 2013].
3. Brennstoffspezifische Emissionsfaktoren: Diese passen zwar für den eingesetzten Brennstoff aber nicht exakt für den technischen Prozess. An die Anwendung brennstoffspezifischer Emissionsfaktoren sind im Rahmen der Umweltbewertung hohe Anforderungen geknüpft, da schnell Fehlinterpretationen ausgelöst werden können. Brennstoffspezifische Emissionsfaktoren werden teilweise im Sektor Industrie eingesetzt, um die große Bandbreite industrieller Anwendungen abbilden zu können. Diese Emissionsfaktoren wurden auf Grundlage einzelner industrieller Feuerungsprozesse abgeleitet und reflektieren somit den gesetzlich geregelten Stand der Luftreinhaltung in Deutschland.

Die Daten zur Bewertung der Umweltwirkungen der Energievorketten sind in den meisten Fällen ganz oder in weiten Teilen der Literatur entnommen. Folgende Quellen finden im Rahmen der Umweltbewertung Anwendung:

- Fossile Energieträger: Die Daten zu den fossilen Energieträgern (Stein- und Braunkohle, Mineralöle, Erdgas und Uran) basieren auf den Daten des globalen Emissions-Modell integrierter Systeme (GEMIS)³, teilweise mit Adaptionen hinsichtlich der Herkunftsländer der Rohmaterialien oder der Verarbeitungsschritte im Ausland.
- Biogene Energieträger: Die Daten zu den biogenen Energieträgern sind im Wesentlichen dem „Bericht Aktualisierung der Eingangsdaten und Emissionsbilanzen wesentlicher biogener Energienutzungspfade (BioEm)“ [Fehrenbach 2016] entnommen.

2 TREMOD- Daten- und Rechenmodell: Schadstoffemissionen aus dem motorisierten Verkehr in Deutschland 1960 bis 2030
(https://www.ifeu.de/index.php?bereich=ver&seite=projekt_tremod)

3 <http://iinas.org/gemis-de.html>

4.3 Ergebnisse der Bilanzierung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Ökobilanz der Luftschadstoffe für die einzelnen Wirkungskategorien gezeigt und kurz erläutert.

4.3.1 THG-Emissionen

Diese, früher auch Treibhauseffekt genannte Wirkungskategorie steht für die negative Umweltwirkung der anthropogen bedingten Erwärmung der Erdatmosphäre und ist in entsprechenden Referenzen bereits eingehend beschrieben worden [IPCC 1995, IPCC 2001]. Bei der Berechnung von CO₂-Äquivalenten wird die Verweilzeit der Gase in der Troposphäre berücksichtigt. Daher stellt sich die Frage, welcher Zeitraum der Klimamodellrechnung für die Zwecke der Produkt-Ökobilanz verwendet werden soll. Es existieren Modellierungen für 20, 50 und 100 Jahre. Die Modellrechnungen für 20 Jahre beruhen auf der sichersten Prognosebasis. Das Umweltbundesamt empfiehlt die Modellierung auf der 100-Jahresbasis, da sie am ehesten die langfristigen Auswirkungen des Treibhauseffektes widerspiegelt. Sie wurde daher auch hier verwendet.

In den stofflich genutzten Pflanzen ist Kohlenstoff aus der Atmosphäre gebunden, der im Laufe der Zeit, sei es bei Verrottung oder Verbrennung, wieder freigesetzt wird. Diese CO₂-Emissionen werden per Konvention des IPCC *nicht* dem Treibhauseffekt zugerechnet, da hierbei genau so viel CO₂ freigesetzt wird, wie zuvor der Atmosphäre beim Wachstum der Pflanze entzogen wurde. Die zeitweilige Bindung von CO₂ in der Pflanze bzw. dem daraus produzierten Stoff ist in der Regel auf maximal einige Jahrzehnte beschränkt und erfordert aufgrund der langen Integrationszeiträume beim Treibhauseffekt keine Berücksichtigung. Selbstverständlich werden die CO₂-Emissionen, die während der landwirtschaftlichen Produktion etwa beim Maschineneinsatz oder für die Produktion von Düngemitteln durch den Einsatz fossiler Energieträger entstehen, auf den Lebensweg angerechnet.

In Tabelle 2 werden bei der Berechnung des Treibhauspotenzials relevante Substanzen mit den jeweiligen CO₂-Äquivalenzwerten (Global Warming Potenzial - GWP) aufgelistet. Abbildung 3 zeigt die Reduktion der Treibhausgasemissionen im Vergleich der Szenarien. Die Szenarienarchitektur ist von ihrer Gestaltung her beim *restriktionsarmen Szenario (RAS)* und *Basisszenario* auf einen definierten Zielkorridor der Reduktion der THG-Emissionen um mindestens 80% bis 2050 angelegt. Die 80% werden in beiden Szenarien auch unter Berücksichtigung der THG-Emissionen der außerdeutschen Energievorketten erreicht, im *Referenzszenario* jedoch verfehlt.

Tabelle 2 Treibhauspotenzial der im Rahmen dieses Projekts berücksichtigten Stoffe

Treibhausgas	CO ₂ -Äquivalente (GWP _i)
Kohlendioxid (CO ₂)	1
Methan (CH ₄)	25,75
Methan (CH ₄), regenerativ	25
Distickstoffmonoxid (N ₂ O)	298
Tetrachlormethan	1.400
Tetrafluormethan	7.390
Hexafluorethan	12.200

Quelle: [IPCC 2007]

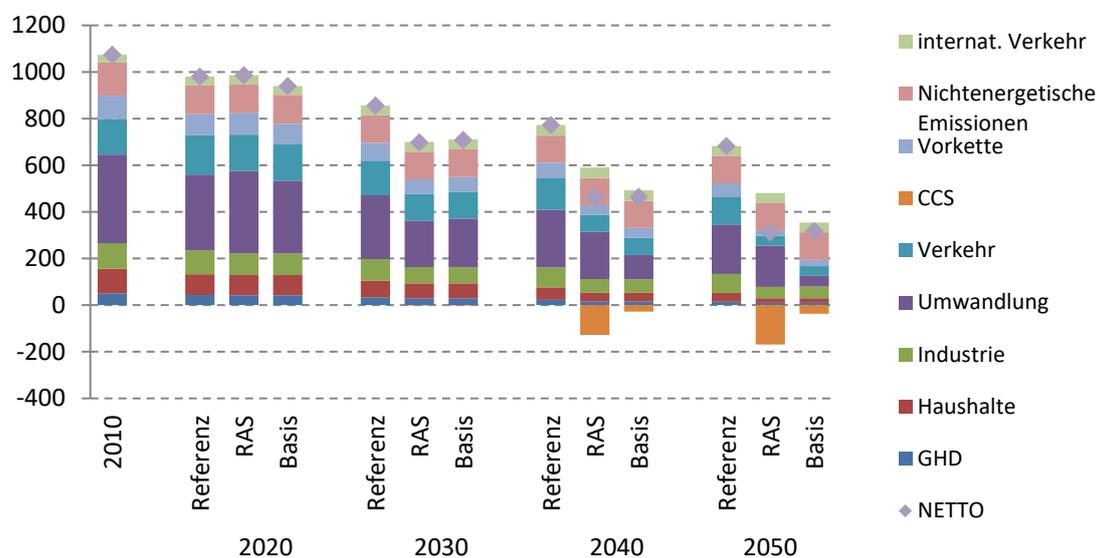


Abbildung 3 Treibhausgasemissionen in Mt CO₂-Äquivalente im Vergleich der Szenarien Ref, RAS und Basis

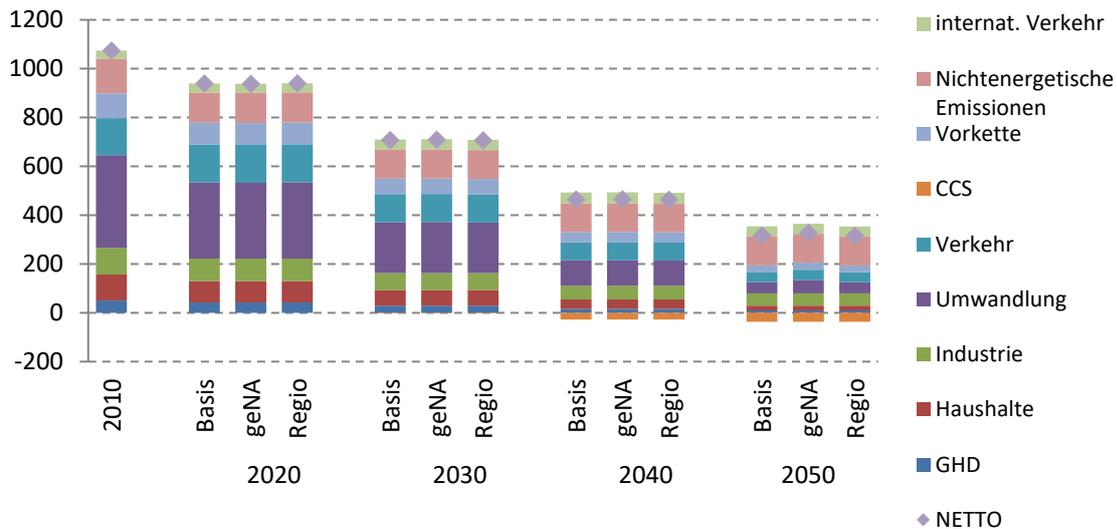


Abbildung 4 Treibhausgasemissionen in Mt CO₂-Äquivalente im Vergleich der Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*

Die Dekarbonisierung schreitet auch im *Referenzszenario* nach 2030 weiter fort, findet jedoch vor allem in den Sektoren Haushalt und GHD statt sowie in deutlich geringerem Maße auch in den Sektoren Umwandlung und Verkehr.

Im *Basisszenario* und im *restriktionsarmen Szenario (RAS)* tragen alle Sektoren zur Dekarbonisierung bei, insbesondere jedoch der Sektor Umwandlung (bis zu 87% Minderung der THG Emissionen bis 2050). Die Reduktionen in den Sektoren Industrie, GHD und Haushalt bleiben im Rahmen des Gesamtdurchschnittes (80% Minderung), der Verkehrssektor dekarbonisiert lediglich um 77%.

Der Anteil der THG-Emissionen durch Energievorketten im Ausland reduziert sich in Abhängigkeit mit dem Einsatz fossiler Energieträger in den Szenarien. Übrig bleiben vor allen Dingen Emissionen aus der Gas- und Mineralölvorkette. Die THG-Emissionen aus dem Import zumeist flüssiger Biomasse betragen weniger als 5% der Summe der THG-Emissionen der Energievorketten.

Die in Abbildung 4 gezeigten Ergebnisse für die Szenarien *gehemmter Netzausbau* und *Regionalszenario* zeigen nur minimale Änderungen im Vergleich zum *Basisszenario*. Dieses sind primär durch den Sektor Umwandlung hervorgerufen und werden – wenn überhaupt – vor allen in den späteren Stützjahren (2050) sichtbar.

4.3.2 Versauerungspotenzial

Eine Versauerung kann sowohl bei terrestrischen als auch bei aquatischen Systemen eintreten. Verantwortlich sind die Emissionen säurebildender Substanzen.

Der in [CML 1992, Klöpffer & Renner 1995] beschriebene ausgewählte Wirkungsindikator Säurebildungspotenzial wird als adäquat dafür angesehen. Damit sind keine spezifischen Eigenschaften der belasteten Land- und Gewässersysteme vonnöten. Die Abschätzung des Säurebildungspotenzials erfolgt üblicherweise in der Maßeinheit der SO₂-Äquivalente. In Tabelle 3 sind die in dieser Studie erfassten Schadstoffe mit ihren Versauerungspotenzialen, engl. „Acidification Potenzial (AP)“, in Form von SO₂-Äquivalenten aufgelistet.

Tabelle 3 Versauerungspotenzial der im Rahmen dieses Projekts erhobenen Stoffe

Schadstoffe	SO ₂ -Äquivalente (AP _i) in kg SO ₂ -äquiv./kg
Schwefeldioxid (SO ₂)	1
Stickoxide (NO _x)	0,7
Chlorwasserstoff (HCl)	0,88
Schwefelwasserstoff (H ₂ S)	1,88
Fluorwasserstoff (HF)	1,6
Cyanwasserstoff (HCN)	1,6
Ammoniak (NH ₃)	1,88
Salpetersäure (HNO ₃)	0,51
Stickstoffmonoxid (NO)	1,07
Phosphorsäure (H ₃ PO ₄)	0,98
Schwefeltrioxid (SO ₃)	0,8
Schwefelsäure (H ₂ SO ₄)	0,65

Quelle: [Hauschild und Wenzel 1998] in [CML 2010]

Für die Entwicklung der Versauerungspotenzial-Emissionen (Abbildung 5 und Abbildung 6) im Vergleich mit den Ergebnissen der THG-Emissionen fallen drei Dinge auf:

1. Im *restriktionsarmen Szenario (RAS)* profitieren die Sektoren Industrie und Umwandlung stark von den THG-Reduktionspotenzialen der CCS-Technologien bei weiter hohen Emissionen von SO₂ und NO_x. Im Verkehrssektor sinken die versauernd wirkenden Emissionen überwiegend durch die Reduktion des Treibstoffbedarfs und weniger durch die nur in geringem Maße verschärften Anforderungen an die Abgasreinigung.

2. Die maximale Reduktion der versauernden Emissionen wird im *Basisszenario* 2050 mit 73% erreicht. Im *RAS* und *Referenzszenario* liegen die Emissionen auch 2050 weit darüber, was insbesondere an den Emissionen aus dem Sektor Umwandlung liegt (im *RAS* werden die Klimaziele u.a. mittels CCS-Technologie erreicht, die für das *Basisszenario* im Sektor Umwandlung nicht zugelassen ist).
3. Der Anteil der Umweltwirkungen aus der außerdeutschen Energievorkette ist deutlich größer als bei den THG-Emissionen. Auch hier ist es wieder die Gasvorkette, die 2050 auch im *Basisszenario* noch für fast 50% der Beiträge verantwortlich ist.

Im Vergleich des *Basisszenarios* mit den Szenarien *gehemmter Netzausbau* und *Regionalszenario* sind wieder nur sehr geringe Änderungen sichtbar. Es fällt auf, dass der gehemmte Netzausbau sich bis 2020 minimal positiv auf die Gesamtsumme der versauernden Emissionen auswirkt, dieser Befund sich jedoch bis zum Jahre 2050 dreht und in diesem Szenario dann die höchsten spezifischen Gesamtemissionen festgestellt werden können. Jedoch sind die Unterschiede wie bereits erwähnt nur sehr gering. Die Änderungen am Gesamtergebnis resultieren aus dem Sektor der internationalen Energievorketten.

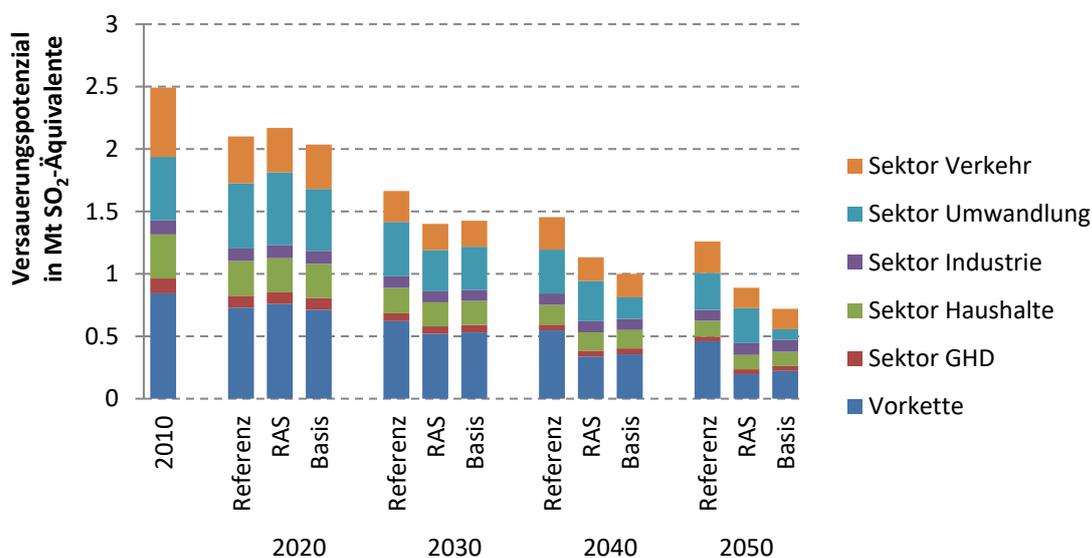


Abbildung 5 Versauerungspotenzial in Mt SO₂-Äquivalente im Vergleich der Szenarien *Referenz*, *RAS* und *Basis*

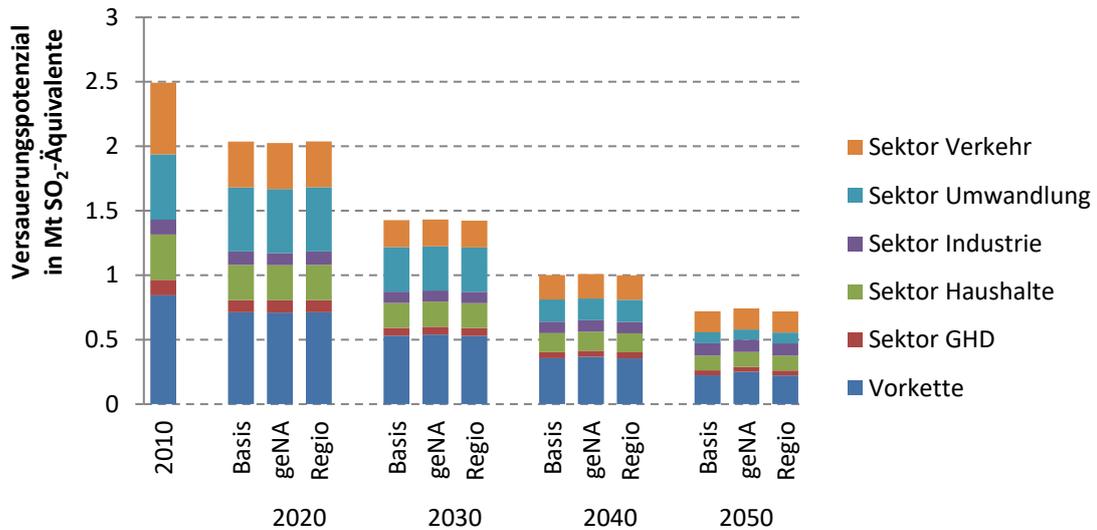


Abbildung 6 Versauerungspotenzial in Mt SO₂-Äquivalente im Vergleich der Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*

4.3.3 Terrestrische Eutrophierung

Die Eutrophierung steht für eine Nährstoffzufuhr im Übermaß. Dabei wird vereinfachend davon ausgegangen, dass alle luftseitig emittierten Nährstoffe eine Überdüngung des Bodens darstellen. Zur Berechnung der unerwünschten Nährstoffzufuhr wird der Indikator Eutrophierungspotenzial (EP) gewählt und dieser Indikator in der Maßeinheit Phosphatäquivalente [CML 1992, Klöpffer & Renner 1995] angegeben. In Tabelle 4 sind die im Rahmen dieses Projektes betrachteten verschiedenen Schadstoffe bzw. Nährstoffe mit ihrem jeweiligen Charakterisierungsfaktor aufgeführt.

Tabelle 4 Eutrophierungspotenzial der im Rahmen dieses Projekts berücksichtigten Stoffe

Schadstoffe	PO ₄ ³⁻ Äquivalente (EP _i) in kg PO ₄ ³⁻ Äquiv./kg
<i>Eutrophierungspotenzial (Boden)</i>	
Stickstoffoxide (NO _x als NO ₂)	0,13
Ammoniak (NH ₃)	0,35
Distickstoffmonoxid (N ₂ O)	0,27

Quelle: [Heijungs et al. 1992] in [CML 2010]

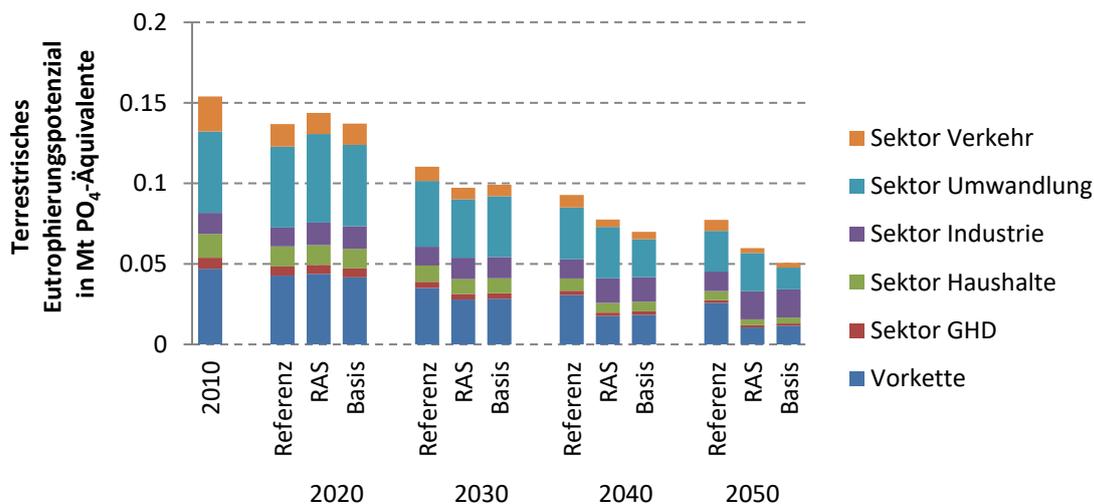


Abbildung 7 Terrestrisches Eutrophierungspotenzial in Mt PO₄-Äquivalente im Vergleich der Szenarien *Ref*, *RAS* und *Basis*

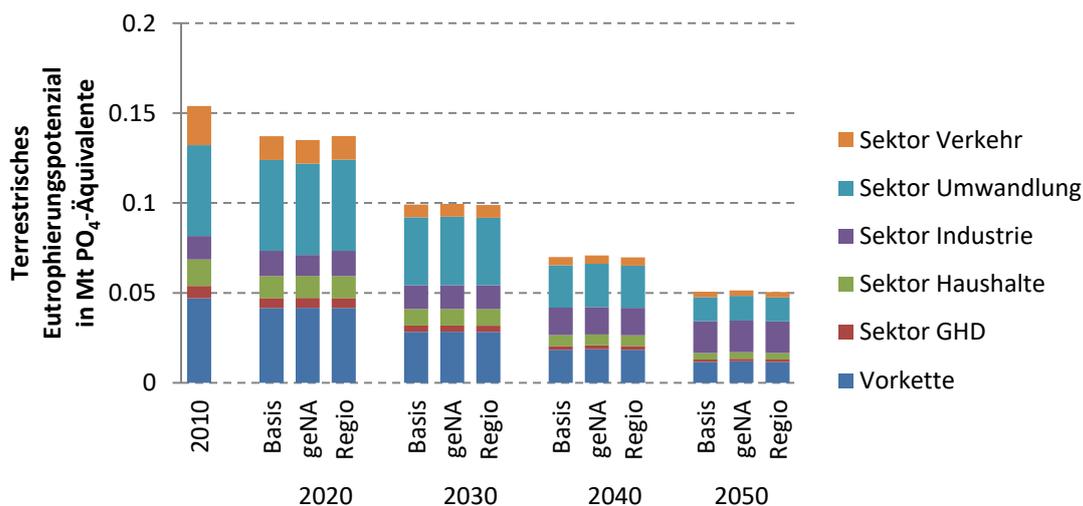


Abbildung 8 Terrestrisches Eutrophierungspotenzial in Mt PO₄-Äquivalente im Vergleich der Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*

Für die Nährstoffzufuhr in den Boden wird der Beitrag zum Eutrophierungspotenzial durch Summenbildung aus dem Produkt der emittierten Menge der einzelnen Schadstoffe und dem jeweiligen EP berechnet.

Hinsichtlich der Ergebnisse der terrestrischen Eutrophierung dominieren vor allem die Beiträge aus den Sektoren Umwandlung, Energievorketten im Ausland und Industrie. Ähnlich wie bei den anderen Nicht-THG-Emissionen werden folgende Dinge deutlich:

- Bei den eutrophierenden Emissionen wird bis 2050 keine 80%ige Minderung äquivalent zu den THG-Emissionen erreicht.
- Im Falle der terrestrischen Eutrophierung unterscheiden sich die Beiträge zwischen *RAS* und *Basisszenario* im Jahre 2050 deutlich, was auf die geringere Reduktion der verbrennungsbedingten Luftemissionen im Sektor Umwandlung zurückzuführen ist, da im *RAS* im Gegensatz zum Basisszenario CCS im Umwandlungssektor zugelassen ist.
- Der Befund im Szenarienvergleich *Basisszenario* vs. *gehemmter Netzausbau* und *Regionalszenario* zeigt das bereits bekannte Bild. Die Änderungen gegenüber dem *Basisszenario* sind immer nur Nuancen und betreffen vor allem die Sektoren Umwandlung und Energievorkette.

4.3.4 Krebsrisiko

Die Schadstofffrachten der Verbrennungsprozesse werden in der Ökobilanz nicht in Bezug zu einer konkreten räumlichen Einheit gesetzt. Die Emissionen sind daher nicht mit einer konkreten Expositionsbetrachtung verbunden. Die klassischen Instrumente zur toxikologischen Bewertung wie z.B. die Risikoanalyse oder die Umweltverträglichkeitsuntersuchung sind somit nicht unmittelbar innerhalb einer Ökobilanz anwendbar.

Eine methodische Vorgehensweise, die Vielfalt an toxikologischen Wirkungen, die von einzelnen toxischen Stoffen ausgeht, zu beschreiben und zusammenzufassen, ist bisher nicht allgemein akzeptiert. Grundsätzlich stellt sich die Frage, ob ein Ansatz mit dem Anspruch, die gesamte Breite der Toxikologie belastbar abzudecken, überhaupt realisierbar ist. Pragmatischerweise differenzieren wir deshalb in dieser Studie zunächst zwischen Schadstoffen mit und solchen ohne Schwellenkonzentrationen. Schadstoffe mit Schwellenkonzentration werden direkt aus der Sachbilanz ohne weitere Aggregation der Kategorie „Humantoxizität“ zugeordnet. Für Schadstoffe mit Wirkungen, die ohne Schwellenkonzentration auftreten können, wird ein Ansatz zur Wirkungscharakterisierung angewendet, der im Rahmen von Forschungsvorhaben mit vergleichbaren Fragestellungen entwickelt wurde [IFEU 2006; UBA 1999]. Insbesondere *kanzerogene Wirkungen*, die von den entsprechenden Stoffen auch bei geringster Konzentration ausgelöst werden können, eignen sich zu einer vereinheitlichten Darstellung. Damit spielt es keine Rolle, in welchem Maße die freigesetzten Stoffe verdünnt werden. Bedingung ist lediglich, dass ein Expositionsweg für den Menschen gegeben ist, was z.B. im Falle der Freisetzung von kanzerogenen Luftschadstoffen grundsätzlich immer der Fall ist.

Eine methodische Vereinfachung für die Aggregation kanzerogener Schadstoffemissionen ist durch die Verfügbarkeit sogenannter Einheitsrisikowerte (*unit risk*) gegeben. Diese Werte werden u.a. durch die US-Umweltbehörde EPA herausgegeben und re-

gelmäßig überarbeitet. Mit ihnen lassen sich einerseits Risiken konkreter Expositionen mit Luftschadstoffen bestimmen oder aber, wie hier vereinfacht, die Vielzahl kanzerogener Schadstoffe zu einem summarischen Wert zusammenfassen und somit ähnlich den CO₂- oder SO₂-Äquivalenten auf einen Einzelstoffindex beziehen. Im vorliegenden Fall wird hierzu das Halbmetall Arsen gewählt, da es einerseits zu den erwiesenermaßen krebserzeugenden Substanzen zählt und andererseits sowohl über die Atemwege als auch die Nahrungsaufnahme wirksam ist. In der nachfolgenden Tabelle wird für jeden der in der Sachbilanz erhobenen Schadstoffe der Arsenäquivalenzwert aufgeführt. Dabei werden die Einheitsrisikowerte nach IRIS [IRIS 2017] zugrunde gelegt.

Wie Versauerung und Eutrophierung stellt die Summe emittierter Arsen-Äquivalente ein Wirkungspotenzial ohne direkten lokalen Bezug dar. Ein individuelles Krebsrisiko ist daraus nicht ableitbar. Dies würde ein hochkomplexes Expositionsmodell erfordern. Ebenso kann zurzeit kein Modell vorgeschlagen werden, das die verschiedenen Expositionspfade der kanzerogenen Substanzen nachvollzieht. Damit sind zunächst nur die möglichen Gesundheitsgefahren durch diese Stoffe über den Luftpfad berücksichtigt. Der Beitrag zum kanzerogenen Potenzial (CRP) wird durch Summenbildung aus dem Produkt der emittierten Menge der einzelnen Schadstoffe und deren jeweiligem kanzerogenen Potenzial berechnet (vgl. Tabelle 5).

Tabelle 5 Krebsrisikopotenzial der im Rahmen dieses Projekts erhobenen Stoffe

Schadstoff	Kanzerogenes Potenzial (CRPi) [kg Arsen-Äquivalent/kg]
Arsen (As)	1
Benzo(a)pyren (BaP)	20,9
Benzol	0,0019
Cadmium (Cd)	0,42
Chrom als Cr-VI	2,79
Dioxine als TE	10.500
Nickel (Ni)	0,056

Quelle: [IRIS 2017]

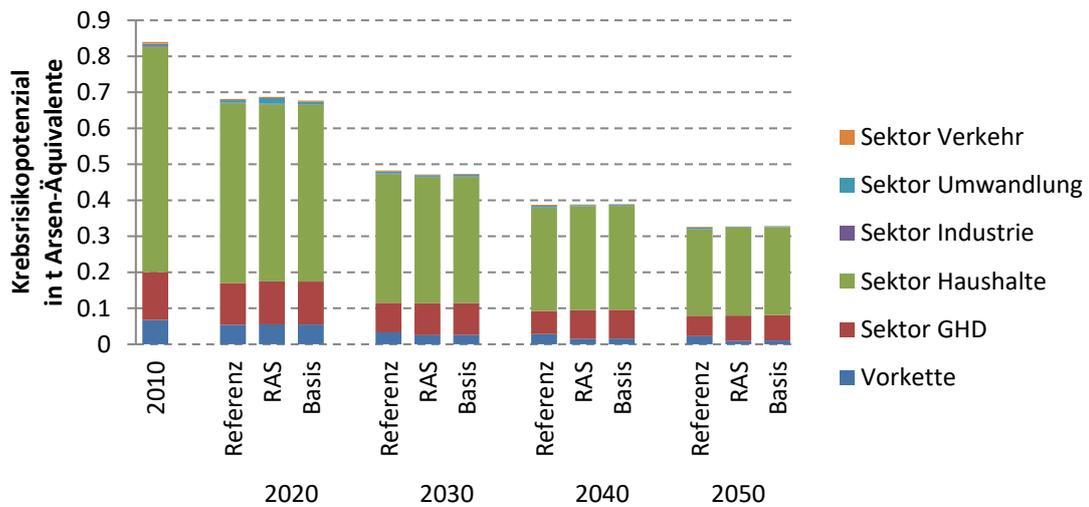


Abbildung 9 Krebsrisikopotenzial in t Arsen-Äquivalente im Vergleich der Szenarien *Ref*, *RAS* und *Basis*

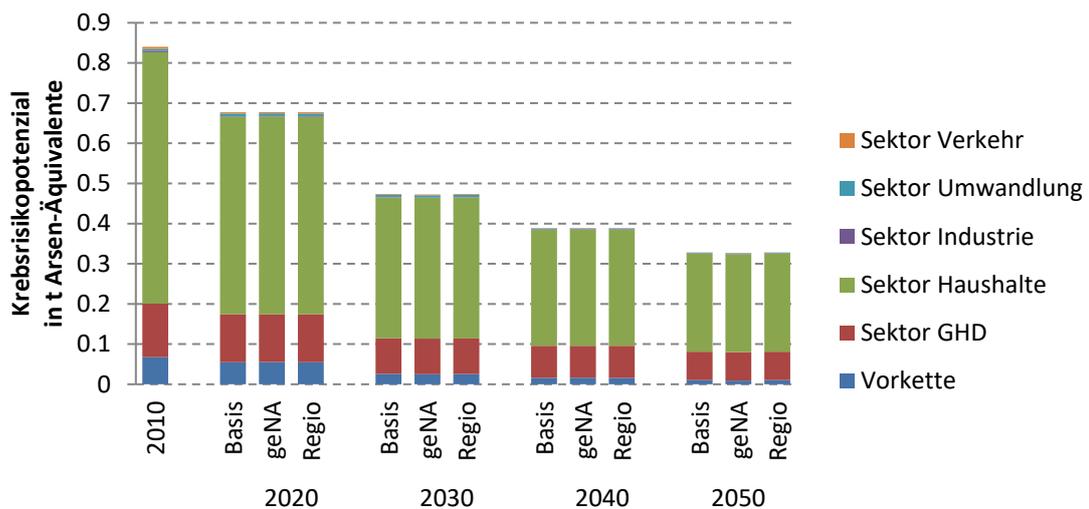


Abbildung 10 Krebsrisikopotenzial in t Arsen-Äquivalente im Vergleich der Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*

Der Blick auf die sektoralen Ergebnisse der Wirkungskategorie Krebsrisikopotenzial zeigt die Dominanz der Emissionen aus den Sektoren Haushalte und GHD. Verantwortlich sind hier die Emissionen aus den Kleinf Feuerungsanlagen.

Dabei ist der Luftschadstoff Benzo(a)pyren die relevante Einzelsubstanz bei den Emissionen aus Feuerungsanlagen für feste und flüssige Brennstoffe. Bei den Feuerungsanlagen für gasförmige Brennstoffe sind es hingegen direkte Arsenemissionen. Insbesondere die Nutzung der festen Biomasse in Öfen trägt in den Jahren ab 2030 noch

zur Ergebnissituation bei. Da diese in den drei verschiedenen Szenarien in einem ähnlich hohen Anteil zu der Energiebereitstellung in den Sektoren Haushalte und GHD beiträgt, fallen auch die Unterschiede zwischen den Szenarien ab 2030 nur sehr gering aus. Dieser Effekt wird noch dadurch verstärkt, dass die Sektoren Umwandlung, Industrie und Verkehr aufgrund der bereits bestehenden gesetzlichen Regelungen zur Luftreinhaltung (bspw. Bundes-Immissionsschutzgesetz) nur in sehr geringem Maße zum Krebsrisikopotenzial beitragen. Die Beiträge der Energieträgervorketten im Ausland werden dominiert von den Belastungen der Steinkohleförderung und gehen daher im *RAS* und *Basisszenario* ab 2030 deutlich zurück.

Änderungen in den Szenarien *gehemmter Netzausbau* und *Regionalszenario* gegenüber dem *Basisszenario* sind in der Wirkungskategorie Krebsrisikopotenzial fast nicht ersichtlich, da die Sektoren Umwandlung und Energieträgervorkette hier nur einen stark untergeordnete Rolle spielen.

4.3.5 Belastung mit PM10-Feinstaub

Als PM10-Feinstaub wird die Fraktion des Staubs bezeichnet, deren Partikel einen aerodynamischen Durchmesser $< 10 \mu\text{m}$ (sog. PM 10) aufweisen. Eine Reihe von internationalen Studien erfasst den Zusammenhang der Partikelbelastung und der Mortalität bzw. Morbidität. Im Ergebnis zeigte sich, dass bei Erhöhung der Immissionskonzentration von PM10 die Mortalität infolge von Atemwegs- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen stark zunimmt. Neue Studien international anerkannter Organisationen - aktuell der WHO - haben ein hohes Mortalitätsrisiko durch Feinstäube bestätigt.

In Langzeitstudien werden Sterberaten und Beeinträchtigungen der Gesundheit sowie die Luftverschmutzung über einen möglichst langen Zeitraum beobachtet. Dabei wird eine möglichst große Population untersucht. Es zeigte sich in einigen Studien eine Zunahme der Todesfälle durch Atemwegs- sowie Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Die Faktoren zum relativen Risiko weisen eine große Bandbreite auf. Nach dem aktuellsten Bericht der WHO [WHO 2005] ergibt sich der Zahlenwert des relativen Risikos zu $1,03/10 \mu\text{g PM10/m}^3$ (Bandbreite $1,01/10 \mu\text{g PM10/m}^3$ bis $1,055/10 \mu\text{g PM10/m}^3$). Das bedeutet, dass bei einer um $10 \mu\text{g/m}^3$ höheren Belastung der Außenluft mit PM10 das Risiko für Todesfälle durch Atemwegs- sowie Herz-Kreislauf-Erkrankungen um den Faktor 1,03 bzw. um 3% ansteigt.

Die großräumige PM10-Belastung der Außenluft wird durch direkte Staubemissionen und Sekundärpartikel verursacht, die sich aus Vorläufersubstanzen wie NO_2 , SO_2 , NH_3 und NMVOC bilden. So verbindet sich z.B. SO_2 in der Luft mit NH_3 und H_2O zu partikel-förmigem $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Die Zuordnung erfolgt mit sog. *aerosol formation factors*, die in

der Berichterstattung der EU angewendet und auch von der WHO als Indikator für die Luftqualität empfohlen werden [WHO 2005]. Die in Tabelle 6 aufgeführten Faktoren wurden aus den Arbeiten von [De Leeuw 2002] abgeleitet und werden von diesem als repräsentativ für die Bedingungen in Europa eingestuft. Sie setzen sich zusammen aus dem Anteil der Vorläufersubstanz, der in Aerosolform umgewandelt wird, und aus einem Massenkorrekturfaktor, der die Umwandlung des gasförmigen Schadstoffs in den Aerosolanteil beschreibt ($\text{SO}_2 \rightarrow \text{SO}_4$; $\text{NO}_2 \rightarrow \text{NO}_3$; $\text{NH}_3 \rightarrow \text{NH}_4$). Für PM10 beträgt der Faktor 1. Für NMVOC ist die Zuordnung schwierig und verlangt die Kenntnis der Einzelverbindungen. Der von [Heldstab et al. 2003] für die NMVOC-Emissionen in der Schweiz abgeleitete Mittelwert des PM10-Potenzials beträgt 0,012.

Tabelle 6 PM10-Risikopotenzial von Luftschadstoffen

Partikel PM10 und Vorläufersubstanzen	PM10-Äquivalente in kg PM10-Äq./kg
Partikel PM10	1
Partikel aus Dieselemissionen	1
Sekundäraerosolbildner	
NO _x (als NO ₂)	0,88
SO ₂	0,54
NH ₃	0,64
NMVOC	0,012

Quelle: [De Leeuw 2002]; [Heldstab et al. 2003]

Ansonsten gelten die gleichen Einschränkungen und Bedenken, wie beim Krebsrisikopotenzial beschrieben. PM10-Äquivalente stellen ein Wirkungspotenzial ohne direkten lokalen Bezug dar. Ein individuelles Mortalitätsrisiko ist daraus nicht ableitbar. Es sind zunächst nur die möglichen Gesundheitsgefahren durch PM10 berücksichtigt.

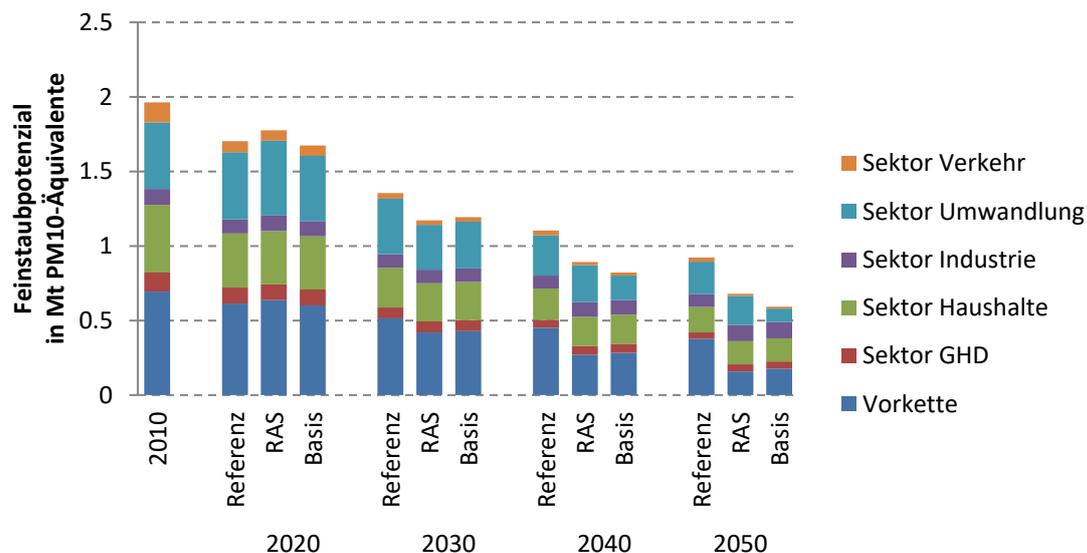


Abbildung 11 Feinstaubpotenzial in Mt PM10-Äquivalente im Vergleich der Szenarien *Ref*, *RAS* und *Basis*

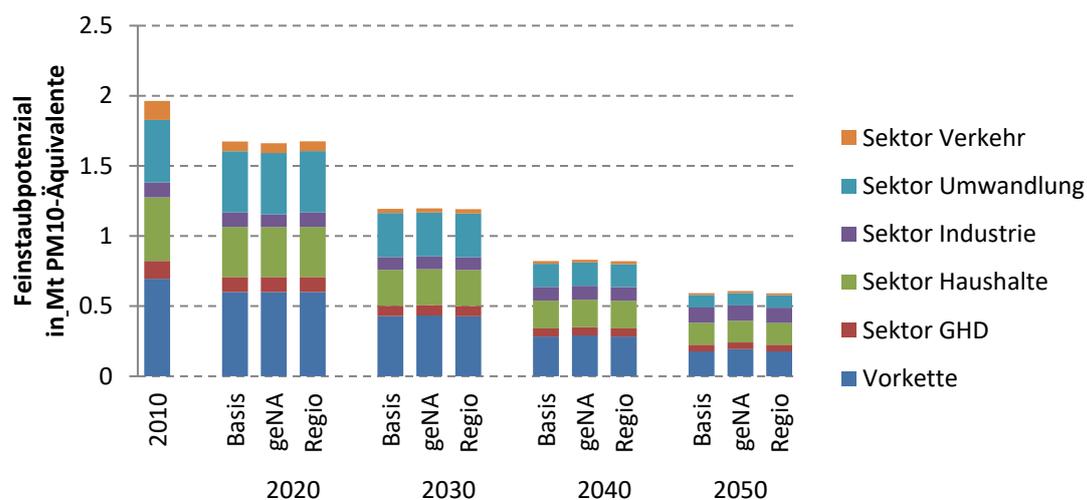


Abbildung 12 Feinstaubpotenzial in Mt PM10-Äquivalente im Vergleich der Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*

Die Änderungen zwischen dem *Basisszenario* und den Szenarien *gehemmter Netzausbau* und *Regionalszenario* fallen auch für die Wirkungskategorie Feinstaubäquivalente nur sehr gering aus. Erneut zeigt das Szenario *gehemmter Netzausbau* ab dem Jahr 2014 geringfügig höhere Gesamtergebnisse, was in diesem Fall nur an der Energievorkette liegt.

4.3.6 Ozonbildungspotenzial

Aufgrund der komplexen Reaktionsvorgänge bei der Bildung von bodennahem Ozon (Photosmog oder Sommersmog) ist die Modellierung der Zusammenhänge zwischen Emissionen ungesättigter Kohlenwasserstoffe und Stickoxiden äußerst schwierig. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens des UBA [UBA 1999] wurde ein Berechnungsmodell entwickelt, das auch im Rahmen der Ökobilanz der Luftschadstoffe zur Anwendung kommt. In Tabelle 7 sind die Gase mit ihren photochemischen Ozonbildungspotenzialen (POCP) aufgelistet, die im Rahmen dieser Ökobilanz erhoben werden konnten.

Tabelle 7 Ozonbildungspotenzial der im Rahmen dieses Projekts berücksichtigten Stoffe

Schadgas	POCP [kg Ethen-Äquivalente]
Ethen	1
Methan	0,006
Formaldehyd	0,519
Kohlenmonoxid	0,027
Benzen	0,218
Acetylen	0,085
Ethanol	0,399
Ethylbenzen	0,73
Ethylacetat	0,209
Hexan	0,482
Toluen	0,637
Xylen	1,108
Aldehyd, unspezifiziert	0,563
Butan	0,352
Buten	1,079
Ethan	0,123
Heptan	0,494
Propen	1,123
MTBE	0,175
Acetaldehyd	0,641
Methanol	0,14
Styren	0,142
Dichlorethen	0,447
Ethenglycol	0,373
Hydrocarbone:	
NMVOC aus Dieselemissionen **	0,7
NMVOC (Durchschnitt)*	1,0
VOC*	1,0

Quelle: [CML 2010], *[IFEU 2008], **[UBA 199UN]

Die Ergebnisse in Abbildung 13 zeigen die erheblichen Beiträge der Emissionen ozonbildender Stoffe bei den Vorketten und der Sektoren im Referenzszenario. In der Wirkungskategorie Ozonbildungspotenzial ist das aus den anderen Kategorien bekannte Ergebnismuster für den Vergleich der Szenarien *Basisszenario*, *gehemmter Netzausbau* und *Regionalszenario* erneut zu sehen, diesmal in leicht verstärkter Form, da die Energievorkette eine stärkere Rolle spielt (Abbildung 14).

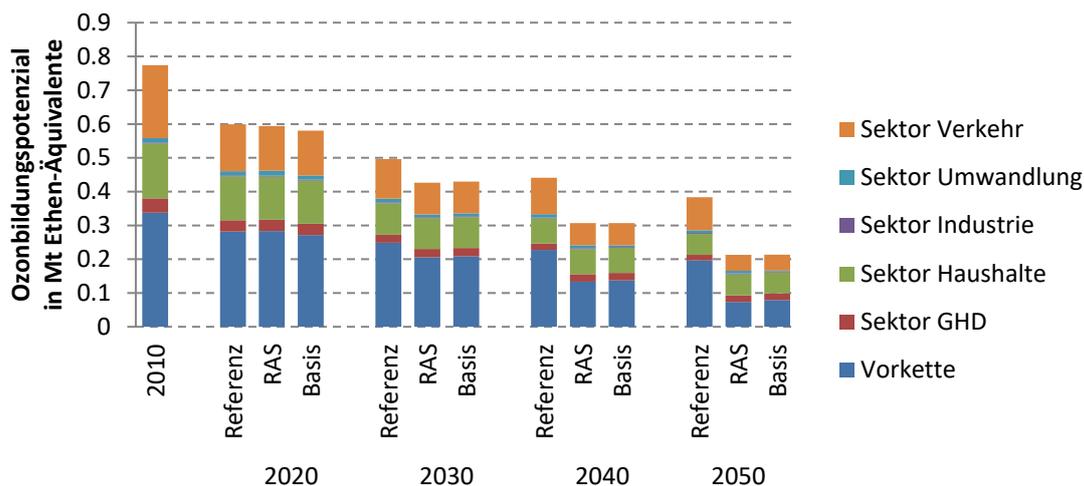


Abbildung 13 Ozonbildungspotenzial in Mt Ethen-Äquivalente im Vergleich der Szenarien *Ref*, *RAS* und *Basis*

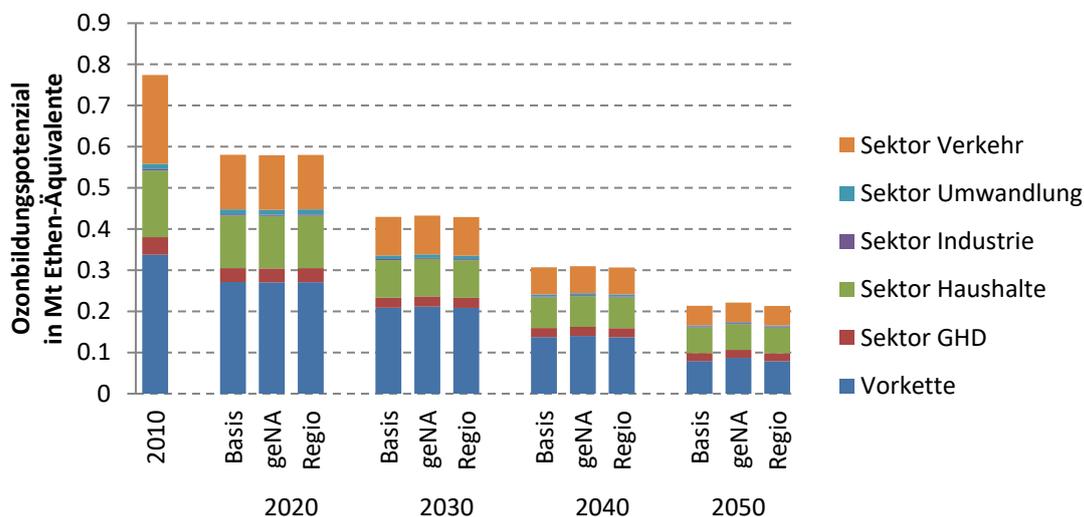


Abbildung 14 Ozonbildungspotenzial in Mt Ethen-Äquivalente im Vergleich der Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*

4.3.7 Zusammenfassung und Bewertung

Die Grundtendenz über alle betrachteten Luftschadstoffe ist, dass die Emissionen bis zum Jahr 2050 in allen untersuchten Szenarien deutlich zurückgehen; im Falle der Nicht-THG-Emissionen für alle Szenarien bis 2050 um mindestens 50%. Im Falle der THG-Emissionen sind die zu erreichenden Minderungen für das *RAS* und das *Basis*szenario vorgegeben und werden selbst unter Berücksichtigung der Luftschadstoffe, die sich durch die Förderung und Aufbereitung bzw. den Anbau der importierten Energieträger ergeben, erreicht.

Der Beitrag der Energievorketten hat bei der Mehrzahl der untersuchten Wirkungskategorien ergebnisrelevanten Charakter (Ausnahmen: THG-Emissionen und Krebsrisiko). Die grafische Auswertung zeigt aber auch, dass der Anteil der durch die Energievorketten hervorgerufenen Umweltwirkungen bis zum Jahre 2050 deutlich zurückgeht, sowohl absolut als auch – mit Ausnahme der THG-Emissionen – der relative Anteil am Gesamtergebnis. Im Falle der THG-Emissionen steigt der Anteil der Emissionen der Vorkette von 11% im Jahr 2010 auf 14% im *RAS* und 15% im *Basis*szenario. Im Falle des *Referenz*szenarios jedoch sinkt der Anteil der THG-Emissionen aus der Vorkette auf 9%, weil die direkten Emissionen aus der Feuerung auf einem deutlich höheren Niveau bleiben.

Tabelle 8 Nettoergebnisse der Ökobilanz der Luftschadstoffe im Vergleich der Szenarien *Ref*, *RAS* und *Basis*

Kategorie	Einheit	2010	2020			2030			2040			2050		
			Ref	RAS	Basis	Ref	RAS	Basis	Ref	RAS	Basis	Ref	RAS	Basis
Klimawandel	in MT CO ₂ -Äq.	1.074	980	986	940	856	698	708	773	462	465	682	312	317
Sommersmog	in t Ethen-Äq.	774	600	594	580	497	426	430	441	307	307	383	213	213
Versauerung	in t SO ₂ -Äq.	2.493	2.101	2.169	2.037	1.664	1.400	1.427	1.454	1.133	1.001	1.260	888	720
terrestrische Eutrophierung	in t PO ₄ -Äq.	154	137	144	137	110	97	99	93	78	70	77	60	51
Humantoxizität Arsen-Äq.	in kg AS-Äq.	840	682	687	677	483	472	473	387	388	389	327	327	328
Humantoxizität Feinstaub	in t PM ₁₀ -Äq.	1.963	1.703	1.776	1.674	1.355	1.172	1.194	1.103	893	822	923	679	593

Ergebnisunterschiede zwischen dem *RAS* und dem *Basis*szenario werden im Jahr 2050 vor allem in den Wirkungskategorien sichtbar, in denen der Sektor Umwandlung einen relevanten Einfluss auf das Gesamtergebnis hat. Dadurch, dass im *Basis*szenario die CCS-Technologie für den Strom- und Wärmesektor ausgeschlossen ist, werden andere, in der Regel emissionsärmere Umwandlungstechnologien genutzt. Daher zeigt das *RAS* in der Mehrzahl der untersuchten Wirkungskategorien zumindest in den Jahren ab 2040 oftmals höhere Ergebnisse als das *Basis*szenario.

Tabelle 9 Nettoergebnisse der Ökobilanz der Luftschadstoffe im Vergleich der Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*

Kategorie	Einheit	2010	2020			2030			2040			2050		
			Basis	geNA	Regio	Basis	geNA	Regio	Basis	geNA	Regio	Basis	geNA	Regio
Klimawandel	in MT CO ₂ -Äq.	1.074	940	938	940	708	709	707	465	465	463	317	328	
Sommersmog	in t Ethen-Äq.	774	580	579	580	430	433	429	307	310	307	213	221	213
Versauerung	in t SO ₂ -Äq.	2.493	2.037	2.025	2.038	1.427	1.432	1.424	1.001	1.008	998	720	743	719
terrestrische Eutrophierung	in t PO ₄ -Äq.	154	137	135	137	99	99	99	70	71	70	51	51	51
Humantoxizität Arsen-Äq.	in kg AS-Äq.	840	677	678	677	473	473	473	389	389	389	328	327	328
Humantoxizität Feinstaub	in t PM ₁₀ -Äq.	1.963	1.674	1.662	1.675	1.194	1.198	1.191	822	831	820	593	607	592

Der Vergleich der Ergebnisse der Szenarien *Basis*, *geNa* und *Regio* zeigt in der Ökobilanz der Luftschadstoffe nur sehr geringe Unterschiede, die auch erst in den späteren Stützjahren (ab 2040 bzw. erst 2050) wahrnehmbar werden. Insbesondere das Szenario zum *gehemmten Netzausbau* zeigt leicht höhere Gesamtemissionen als die beiden anderen Szenarien. Die Unterschiede resultieren aus den Sektoren Umwandlung und der Vorkette der außerdeutschen Energieträger. Ein detaillierterer vergleichender Blick in die Ergebnisse der Szenarien und die Grundlagen der Berechnung zeigt, dass diese Ergebnisfindung insbesondere von einem etwas verstärkten Einsatz von Erdgas im Szenario *gehemmten Netzausbau* in den späteren Stützjahren getrieben wird.

Tabelle 10 Ökobilanz der Luftschadstoffe – Minderung gegenüber 2010 im Vergleich der Szenarien *Ref*, *RAS* und *Basis*

Kategorie	2020			2030			2040			2050		
	Ref	RAS	Basis									
Klimawandel	-9%	-8%	-13%	-20%	-35%	-34%	-28%	-57%	-57%	-36%	-71%	-70%
Sommersmog	-23%	-23%	-25%	-36%	-45%	-44%	-43%	-60%	-60%	-50%	-72%	-72%
Versauerung	-16%	-13%	-18%	-33%	-44%	-43%	-42%	-55%	-60%	-49%	-64%	-71%
terrestrische Eutrophierung	-11%	-7%	-11%	-28%	-37%	-36%	-40%	-50%	-55%	-50%	-61%	-67%
Humantoxizität Arsen-Äq.	-19%	-18%	-19%	-43%	-44%	-44%	-54%	-54%	-54%	-61%	-61%	-61%
Humantoxizität Feinstaub	-13%	-10%	-15%	-31%	-40%	-39%	-44%	-55%	-58%	-53%	-65%	-70%

Abschließend lässt sich festhalten, dass die Ergebnisse aller Szenarien umweltseitige Verbesserungen durch die Reduktion von Luftschadstoffen erwarten lassen. Sowohl im nationalen Umfeld als auch für den „Rucksack“ an Emissionen, der durch den Import von Energieträgern entsteht. Mit Bezug auf die Ergebnisse der Wirkungskategorie Krebsrisiko muss – unter Abwägung der Unsicherheiten in den Emissionsfaktoren – an dieser Stelle klar die Empfehlung ausgesprochen werden, die Abgasreinigungstechnik

bei Kleinfeuerungsanlagen für feste Biomasse in den kommenden Jahrzehnten zu verbessern bzw. den Austausch alter Anlagen zu forcieren.

Tabelle 11 Ökobilanz der Luftschadstoffe – Minderung gegenüber 2010 im Vergleich der Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*

Kategorie	2020			2030			2040			2050		
	Basis	geNA	Regio									
Klimawandel	-13%	-13%	-12%	-34%	-34%	-34%	-57%	-57%	-57%	-70%	-69%	-71%
Sommersmog	-25%	-25%	-25%	-44%	-44%	-45%	-60%	-60%	-60%	-72%	-71%	-72%
Versauerung	-18%	-19%	-18%	-43%	-43%	-43%	-60%	-60%	-60%	-71%	-70%	-71%
terrestrische Eutrophierung	-11%	-12%	-11%	-36%	-35%	-36%	-55%	-54%	-55%	-67%	-67%	-67%
Humantoxizität Arsen-Äq.	-19%	-19%	-19%	-44%	-44%	-44%	-54%	-54%	-54%	-61%	-61%	-61%
Humantoxizität Feinstaub	-15%	-15%	-15%	-39%	-39%	-39%	-58%	-58%	-58%	-70%	-69%	-70%

5 Flächeninanspruchnahme

5.1 Methodisches Vorgehen

Durch die Nutzung von Energieträgern werden Flächen in unterschiedlicher Weise genutzt (z.B. Anbau von Biomasse, Bau von PV-Freiflächenanlagen) oder auch für andere Nutzungen verfügbar gemacht (z.B. Rückbau von Kraftwerken). Die Beanspruchung der Ressource Fläche ist deshalb als ein wesentliches Kriterium im Rahmen der ökologischen Bewertung einzubeziehen.

Fläche kann im Zusammenhang der wirkungsorientierten Bewertung als eine endliche Ressource verstanden werden. Doch ist es nicht hilfreich, Fläche nur als eine zur freien Verfügung stehende Menge zu verstehen. Fläche steht in direktem Bezug zu einem ökologisch bewertbaren Zustand dieser Fläche. Wird der ökologische Bestand einer Fläche berücksichtigt, so sind darunter alle flächenbezogenen Umweltbelastungen zu verstehen, wie z.B. die Verringerung der biologischen Diversität, Landerosion, Beeinträchtigung der Landschaft usw. Es erscheint angebracht, mit dem Begriff "Naturraum" alle darin enthaltenen natürlichen Zusammenhänge zu verstehen und zu beschreiben – im Gegensatz zum Begriff der Fläche. Bei der Flächeninanspruchnahme durch Energieträger ist der Grad der Nutzungseinschränkung zu bewerten. So kann der Bau von Windkraftanlagen zu Versiegelung (Fundament) und zu temporären oder dauerhaften Rodungen führen (bei Waldstandorten); zudem ist die Fläche zu berücksichtigen, auf der keine weiteren (baulichen) Nutzungen stattfinden können.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden die folgenden Typen von Flächeninanspruchnahmen definiert und quantifiziert:

Inanspruchnahme landwirtschaftlicher Flächen

- Anbaubiomasse im Inland
- Anbaubiomasse im Ausland

Andere direkte Flächeninanspruchnahme

- Braunkohletagebau
- Kraftwerksgelände (AKW, sonstige)
- Wasserkraftwerke inkl. Pumpspeicher
- Freiflächen-PV-Anlagen
- Windkraftanlagen: versiegelte Flächen
- Leitungstrassen: versiegelte Flächen

Indirekte Flächeninanspruchnahme

- Abstandsflächen durch Windkraftanlagen
- Abstandsflächen durch Übertragungsnetz, oberirdisch (Freileitung)

- Abstandsflächen durch Übertragungsnetz, unterirdisch (Erdkabel)
- Abstandsflächen durch Verteilnetz, unterirdisch

5.2 Inanspruchnahme landwirtschaftlicher Flächen durch Anbaubiomasse

Die Flächeninanspruchnahme durch Nutzung von Anbaubiomasse im Ausland wurde auf Basis der Daten in Modul 1, Kapitel 5 ermittelt. Das Brennstoffpotenzial durch Nutzung von Rest- und Abfallstoffen steigt von 677 PJ/a im Jahr 2020 bis auf 724 PJ/a im Jahr 2050.

Die energetische Nutzung von Biomasse hat in Deutschland im Jahr 2010 etwa 2 Mio. ha landwirtschaftliche Fläche belegt. Für die zukünftige Flächenbelegung in Deutschland wurde für die drei betrachteten Szenarien ein Maximalwert von 2,6 Mio. ha vorgegeben, mit einem Energieertrag, der bis 2050 auf 379 PJ/a ansteigt. Je nach Szenario ist dabei ein erheblicher Importanteil von Anbaubiomasse zu berücksichtigen. Die Biomasseimporte im Rahmen dieser Studie werden auf maximal 30% des heimischen Biomassepotenzials begrenzt.

Die Ergebnisse der Szenarien werden in Abbildung 15 und Abbildung 16 verglichen. Im *Referenzszenario* wird ab 2040 das inländische Anbaupotenzial nicht voll benötigt; bis zum Jahr 2050 reduziert sich die Anbaufläche auf 0,7 Mio. ha. In allen anderen Szenarien wird das inländische Anbaupotenzial voll ausgeschöpft und zudem Importbiomasse benötigt. Wenn für letztere die gleichen Ertragszahlen wie für Anbaubiomasse in Deutschland zugrunde gelegt werden, wird im *Basisszenario* das Maximum im Jahr 2020 mit 3,3 Mio. ha landwirtschaftlicher Fläche im Ausland erreicht und ist damit 60% größer als die inländische Flächeninanspruchnahme. Die Flächeninanspruchnahme im Ausland sinkt im *Basisszenario* bis 2050 auf 1,6 Mio. ha. Obwohl der energetische Gesamteinsatz von Biomasse im *Basisszenario* von 342 TWh im Jahr 2020 auf 371 TWh im Jahr 2050 ansteigt, kann der Flächenbedarf durch Effizienzsteigerung somit mehr als kompensiert werden. In der Summe erreicht der Flächenbedarf durch Anbaubiomasse im *Basisszenario* das Maximum von 5,6 Mio. ha und sinkt bis 2050 auf 4,2 Mio. ha.

Im *restriktionsarmen Szenario* übersteigt der Flächenbedarf im Jahr 2020 den des *Basisszenarios* geringfügig und erreicht 3,7 Mio. ha im Jahr 2050. Die Flächeninanspruchnahme durch energetische Anbaubiomasse im *geNA-Szenario* und *Regionalszenario* unterscheiden sich nur geringfügig von den Werten im *Basisszenario* (Abbildung 16). Bei ähnlichem Flächenbedarf ist im *geNA-Szenario* der Biogaseinsatz höher.

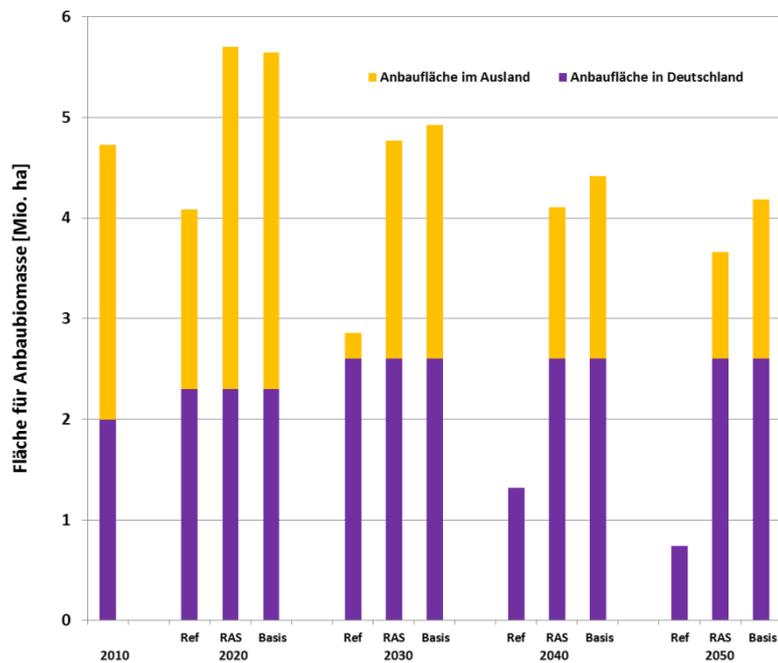


Abbildung 15 Flächeninanspruchnahme durch Anbaubiomasse im Vergleich der Szenarien *Ref*, *RAS* und *Basis*

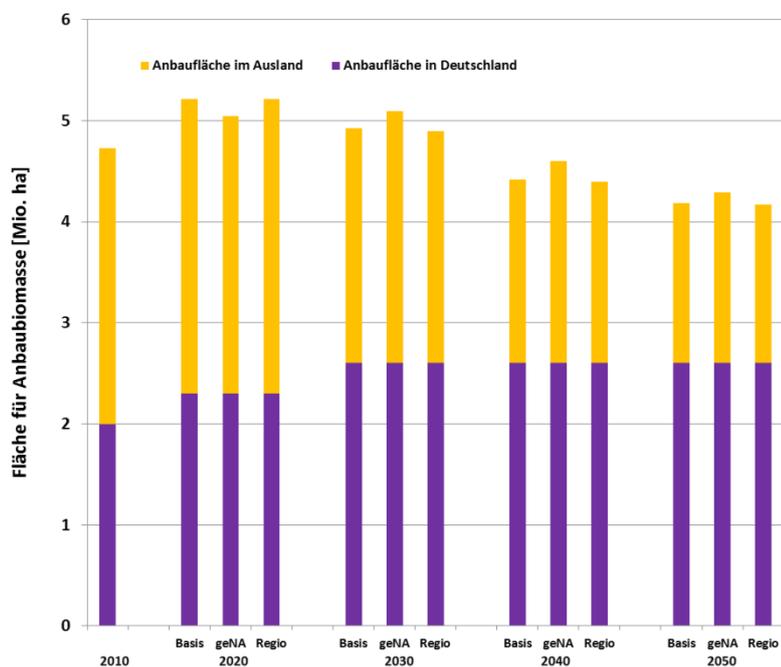


Abbildung 16 Flächeninanspruchnahme durch Anbaubiomasse im Vergleich der Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*

5.3 Andere direkte Flächeninanspruchnahme

Braunkohletagebau

Für die Förderung der Braunkohle in Deutschland werden mit Stand Januar 2016 folgende Betriebsflächen in Anspruch genommen:⁴

Rheinisches Revier insgesamt 9.540,1 ha

- Garzweiler: 2.300 ha (bis ca. 2045)
- Hambach: 4.000 ha (bis ca. 2040)
- Inden: 1.100 ha (bis ca. 2030; genehmigt sind 4.500 ha)

Revier Helmstedt insgesamt 1.106,7 ha

- Schöningen: 600 ha (bis 2017)

Mitteldeutsches Revier insgesamt 12.252,5 ha

- Amstorf: 1.000 ha (bis ca. 2035)
- Schleenheim: 2.500 ha (bis ca. 2040)
- Profen: 1.660 ha (bis 2035)

Lausitzer Revier insgesamt 32.051,6 ha

- Jänschwalde: 3.165 ha (bis 2041)
- Nochten: 9.000 ha (bis ca. 2050)
- Reichwalde: 5.600 ha (bis ca. 2040)
- Weltzow-Süd: 1.600 ha (bis 2042)

Im Jahr 2016 waren Braunkohletagebaue mit einer Abbaufäche von ca. 27.000 ha aktiv. Ab dem Jahr 2020 werden es voraussichtlich noch ca. 25.000 ha sein. Die Flächeninanspruchnahme im Braunkohletagebau ist größer als die aktuelle Abbaufäche; Betriebsflächen beinhalten die Inanspruchnahme durch Abraum, Kohle, Kippe, Rekultivierungsrückstände und Risikoflächen und bei den wieder nutzbar gemachten Flächen sind Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Wasserflächen und sonstige Nutzungen (Wohnsiedlungen, fremde Betriebe, Müllflächen, Verkehrswege etc.) zu nennen. Zur Bilanzie-

⁴ <http://www.braunkohle.de/101-0-Revierkarten.html>

rung der Flächen wurden hierzu die Daten „Statistik der Kohlenwirtschaft e.V.“ mit Stand von Ende Dezember 2015 ausgewertet.⁵

Im Bezugsjahr 2010 betrug die Landinanspruchnahme durch den Braunkohlebergbau 52.868 ha Betriebsflächen, 34.234 ha landwirtschaftliche Neunutzung, 52.518 ha Aufforstung, 21.425 ha Wasserflächen und 11.550 ha sonstige Nutzung. Die Entwicklung in den Jahren 1991 bis 2015 zeigt Abbildung 17. Im Jahr 2010 wurden 169 Mio. t Braunkohle mit einem Energiegehalt von 420 TWh auf 52.868 ha Betriebsflächen gefördert, das ergibt eine Betriebsfläche von 126 ha pro TWh. Die insgesamt in Anspruch genommene Fläche hat von 1991 bis 2015 von 151.037 ha auf 176.487 ha zugenommen. In der Bewertung der Szenarien wird für das jeweilige Bezugsjahr zwischen Betriebsflächen und Flächen mit Neunutzung („umgenutzte Flächen“) differenziert. Für die Ermittlung der Betriebsflächen wird unterstellt, dass diese mit der mittleren Förderung der vergangenen 10 Jahre korrelieren. In der Summe war von 2000 bis 2015 ein Zuwachs an Flächeninanspruchnahme (Betriebsfläche und Neunutzung) von 14.000 ha zu verzeichnen. In der gleichen Zeit wurden ca. 7.000 TWh Braunkohle gefördert; im Mittel somit ein Zuwachs von ca. 2 ha pro TWh. Dieser Wert wird in der Bewertung der Szenarien fortgeschrieben. Als Beispiel zeigt Abbildung 20 die Entwicklung für das *Basisszenario*; für das *geNA-Szenario* und *Regionalszenario* sind die Ergebnisse annähernd identisch wie im *Basisszenario*. Die Ergebnisse für alle Szenarien sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

⁵ http://www.kohlenstatistik.de/files/rekult_2.xlsx

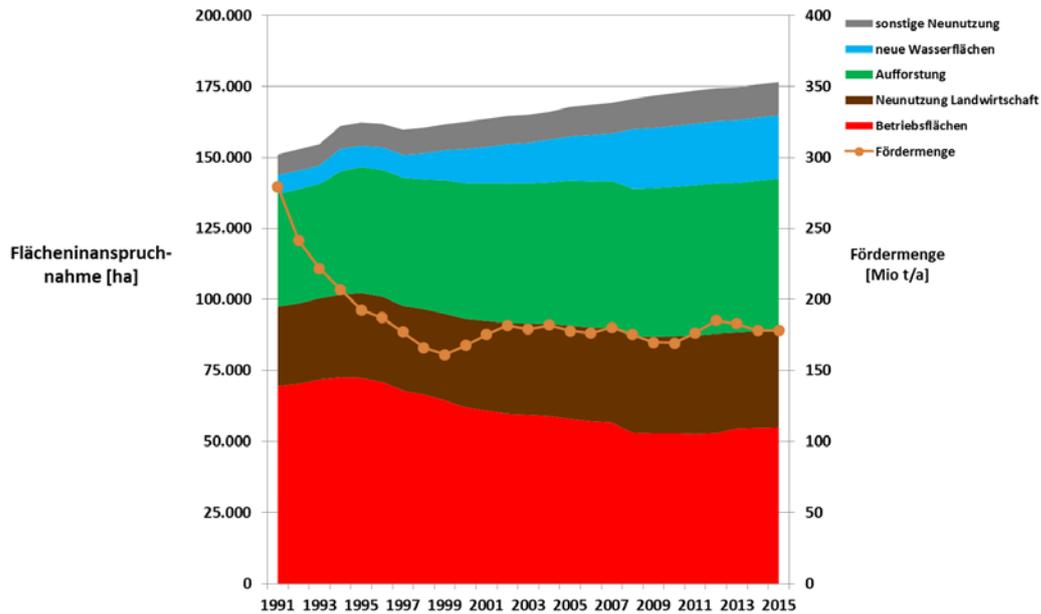


Abbildung 17 Flächeninanspruchnahme durch Braunkohletagebau in Deutschland, 1991-2015

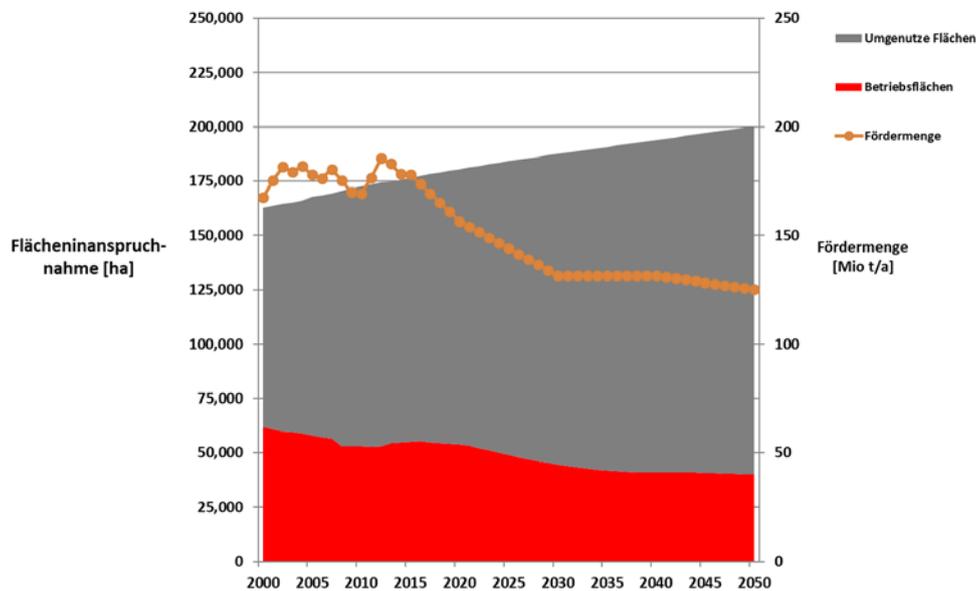


Abbildung 18 Flächeninanspruchnahme durch Braunkohletagebau in Deutschland im Referenzszenario, 2000-2050

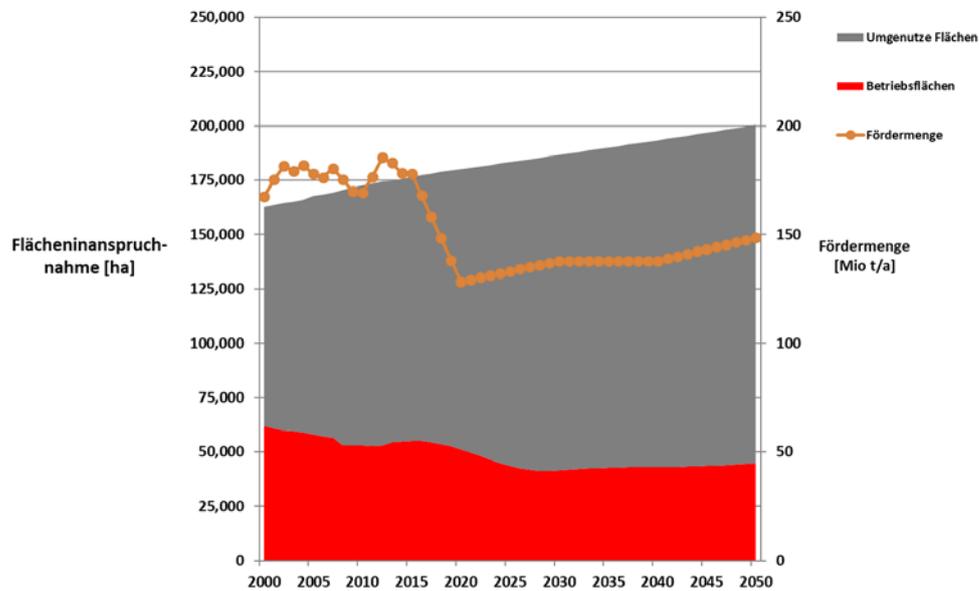


Abbildung 19 Flächeninanspruchnahme durch Braunkohletagebau in Deutschland im *restriktionsarmen Szenario*, 2000-2050

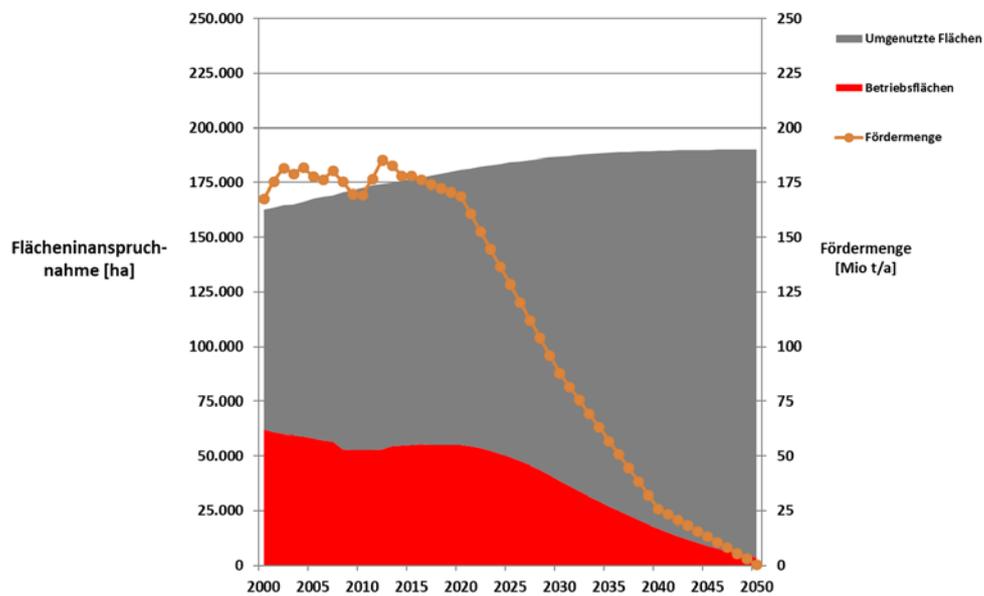


Abbildung 20 Flächeninanspruchnahme durch Braunkohletagebau in Deutschland im *Basisszenario*, 2000-2050

Tabelle 12 Flächeninanspruchnahme durch Braunkohletagebau in Deutschland im Vergleich der Szenarien *Ref*, *RAS* und *Basis*

Bezug	2010	2020	2030	2040	2050
Einsatz Endener-					
gie [TWh]					
Referenz	420	387	359	326	310
RAS	420	318	219	342	368
Basis	420	314	218	65	1,2
Betriebsflächen					
[ha]					
Referenz	53.000	55.000	53.000	53.000	53.000
RAS	53.000	54.000	49.000	47.000	44.000
Basis	53.000	55.000	39.000	17.000	3.700
Summe Flächen					
[ha]					
Referenz	170.000	180.000	190.000	200.000	210.000
RAS	170.000	130.000	150.000	200.000	200.000
Basis	170.000	180.000	190.000	190.000	190.000

Tabelle 13 Flächeninanspruchnahme durch Braunkohletagebau in Deutschland im Vergleich der Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*

Bezug	2010	2020	2030	2040	2050
Einsatz Endener-					
gie [TWh]					
Basis	420	314	218	65	1,2
geNA	420	311	216	48	1,2
Regio	420	316	218	64	1,2
Betriebsflächen					
[ha]					
Basis	53.000	55.000	39.000	17.000	3.700
geNA	53.000	51.000	33.000	17.000	2.800
Regio	53.000	51.000	33.000	17.000	3.700
Summe Flächen					
[ha]					
Basis	170.000	180.000	190.000	190.000	190.000
geNA	170.000	180.000	190.000	190.000	190.000
Regio	170.000	180.000	190.000	190.000	190.000

Atomkraftwerke (AKW)

Im Jahr 1986 waren in Deutschland 26 AKW in Betrieb, im Jahr 2010 waren es noch 17 Anlagen. Bis 2022 sollen alle diese AKW abgeschaltet werden. Der Standort des

AKW Brokdorf umfasst z.B. 25 ha Fläche [EON 2010]; die versiegelte Fläche wird dabei mit ca. 6 ha abgeschätzt. Da für alle bestehenden AKW dieser Wert zugrunde gelegt wird, ergibt sich eine diesbezügliche Flächeninanspruchnahme von derzeit rund 225 ha, davon 42 ha versiegelt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in der Rückbauphase (10 Jahre und mehr) die Standorte nicht für andere Nutzungen zur Verfügung stehen.

Fossile Kraftwerke

In der Kraftwerksliste des Umweltbundesamts [UBA 2013] sind 234 Kraftwerke mit einer Erzeugungsleistung von über >100 MW_e mit einer installierten Kapazität von 76,8 GW gelistet. Aus Standortkarten wurde eine mittlere Flächeninanspruchnahme von ca. 5 ha pro Kraftwerk geschätzt, davon sind 2 ha versiegelte Fläche. Somit ergibt sich ein Wert für den Kraftwerkspark von ca. 1.200 ha mit 500 ha versiegelter Fläche. Die spezifische Flächeninanspruchnahme wird somit mit 15 ha pro GW_e geschätzt. Anhand dieser Annahmen ergeben sich die in Tabelle 14 ausgewiesenen Werte.

Wasserkraftwerke inkl. Pumpspeicher

In den Industrie- und Gewerbeflächendaten des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems ATKIS wurden für das Jahr 2012 in Deutschland insgesamt 1.319 Wasserkraftanlagen geführt, die eine Fläche von 455 ha beanspruchen. Daraus ergibt sich eine durchschnittliche Flächenbeanspruchung von 0,35 ha pro Anlage. Die ATKIS-Daten beinhalten jedoch nur eine Teilmenge des gesamten Anlagenbestands; die Datenbank EnergyMap.info der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie DGS⁶ weist für das Jahr 2014 insgesamt 7.477 gemeldete Wasserkraftanlagen aus, mehr als 70% der Anlagen befinden sich in Bayern und Baden-Württemberg. Die Größenverteilung kann der Potenzialstudie Wasserkraft des BMU [Ingenieurbüro Floecksmühle et al. 2010] entnommen werden, nach der für das Jahr 2007 eine Anzahl von 6.884 kleiner Wasserkraftanlagen mit einer Leistung von unter 1 MW und 405 Anlagen mit einer Leistung von über 1 MW angegeben werden. Die Nettonennleistung der installierten Laufwasserkraftwerke beträgt 3.677 MW [UBA 2013].

In dieser Studie wird die Durchschnittsfläche einer Wasserkraftanlage aus den ATKIS-Daten auf die Anlagenanzahl aus den EEG-Daten hochgerechnet; daraus ergibt sich

⁶ <http://www.energymap.info/energieregionen/DE/105.html> (abgerufen am 26.08.2014)

eine Flächeninanspruchnahme der Wasserkraftanlagen in Deutschland von ca. 2.600 ha für das Jahr 2014. Dabei entfallen ca. 810 ha auf Pumpspeicherkraftwerke mit einer Nettonennleistung von 6.351 MW [UBA 2013b]. Es wird davon ausgegangen, dass zusätzliche Kapazität durch den Neubau von Kraftwerken an neu geschaffenen Querverbauungen erreicht wird. Mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG 2009) besteht die Möglichkeit, an bestehenden Querverbauungen Wasserkraftanlagen zu errichten und gleichzeitig durch Fischtrepfen die biologische Durchgängigkeit wiederherzustellen. Die vorhandenen Möglichkeiten sind im Wesentlichen genutzt und erschlossen worden. Ein Ausbau ist lediglich bei Pumpspeicherkraftwerken zu erwarten. Für den Ausbau von Pumpspeicherkraftwerken wird eine spezifische zusätzliche Flächeninanspruchnahme von 0,12 ha je MW angesetzt. Nach den Szenarienrechnungen kommt es zu keinem Ausbau von Pumpspeicherkraftwerken. Somit ist in den Szenarien und allen Bezugsjahren eine direkte Flächeninanspruchnahme von 2.600 ha für Wassernutzung ausgewiesen.

Geothermie

Bei der Nutzung von Geothermie ist oberflächennahe und Tiefengeothermie zu unterscheiden. Eine Flächeninanspruchnahme besteht nur bei Tiefengeothermieanlagen, in denen aus mehr als 1.000 m Tiefe Wärme gefördert wird. Aus den Industrie- und Gewerbeflächendaten 2012 des ATKIS wurde nach [Koldrack 2013] für 15 Anlagen in Bayern eine Gesamtfläche von 12,4 ha ermittelt. Daraus ergibt sich eine anlagenspezifische Fläche von 0,8 ha pro Anlage. Da in den bisherigen Szenarien kein Zuwachs an Tiefengeothermie erfolgt, wird die Flächeninanspruchnahme mit 12,4 ha bis 2050 fortgeschrieben.

PV-Freiflächenanlagen

Die Nutzung von Solarenergie erfolgt über Sonnenkollektoren in Form von Wärme (Solarthermie) oder Solarzellen, die diese in elektrische Energie umwandeln (Photovoltaik). Die Module können sowohl auf Freiflächen als auch an Gebäudeflächen wie Fassaden und Dächern angebracht werden. Im Jahr 2008 wurden 5.800 ha Gebäudeflächen für PV und Solarthermie genutzt [AEE, 2009]. Die Befestigung von Modulen auf Gebäudeflächen beansprucht jedoch keine neue zusätzliche Fläche, sondern nutzt bereits anderweitig genutzte Flächen aus. Die Gebäudefläche wird demnach in dieser Studie nicht als Flächenbeanspruchung ausgewiesen.

Tabelle 14 Flächeninanspruchnahme durch AKW und fossile Kraftwerke in Deutschland im Vergleich der Szenarien *Ref*, *RAS* und *Basis*

	2010	2020	2030	2040	2050
Atomkraftwerke, installierte Kapazität [GW]					
	21,6	8,1	0	0	0
Sonstige Kraftwerke, installierte Kapazität [GW]					
Referenz	88,4	67,2	55,9	54,2	49,6
RAS	88,4	64,9	49,6	48,4	37,3
Basis	88,4	64,8	50,8	47,2	36,3
Flächeninanspruchnahme durch Kraftwerke [ha]					
Referenz	1.700	1.100	840	810	740
RAS	1.700	1.100	740	730	560
Basis	1.700	1.100	760	710	550

Tabelle 15 Flächeninanspruchnahme durch AKW und fossile Kraftwerke in Deutschland im Vergleich der Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*

	2010	2020	2030	2040	2050
Atomkraftwerke, installierte Kapazität [GW]					
	21,6	8,1	0	0	0
Sonstige Kraftwerke, installierte Kapazität [GW]					
Basis	88,4	64,8	50,8	47,2	36,3
geNA	88,4	65,4	59	55	63,8
Regio	88,1	65,8	51,1	49	36,9
Flächeninanspruchnahme durch Kraftwerke [ha]					
Basis	1.700	1.100	760	710	550
geNA	1.700	1.100	890	830	960
Regio	1.700	1.100	770	740	550

Auf Freiflächen werden fast ausschließlich Photovoltaikanlagen eingesetzt; in einem sehr geringem Ausmaß auch thermische Solaranlagen. Die Solarzellen können ebenerdig auf einer Freifläche als fest montiertes System oder als Tracker-Systeme, welche dem Stand der Sonne folgen, errichtet werden. In beiden Fällen werden die Module mit einem Fundament im Grund und in ausreichendem Abstand voneinander installiert. Neben der Modulfläche wird also weitere „Abstandsfläche“ benötigt, die Grundfläche eines Solarparks. Freiflächenanlagen werden meist auf ehemaligem Ackerland, Tagebaugebieten, renaturierten Deponien, Flächen in maximal 110 Meter Abstand von Autobahnen oder Bahnlinien sowie auf bereits versiegelten Flächen installiert. Zu den versiegelten Flächen gehören Stellplätze, sogenannte Konversionsflächen wie Deponien, Abraumhalden, Truppenübungsplätze und Munitionsdepots. Im Jahr 2010 waren in Deutschland 2,7 GW PV-Freiflächenanlagen auf einer Gesamtfläche von 22.400 ha in Betrieb. Der durchschnittliche Flächenverbrauch pro MW wird auf 2,5 ha geschätzt.

Mit diesem Wert wurde für den Ausbau in den Szenarien gerechnet; die Ergebnisse zeigen Tabelle 16 im Vergleich der Szenarien *Ref*, *RAS* und *Basis* und Tabelle 17 im Vergleich der Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*.

Tabelle 16 Direkte Flächeninanspruchnahme durch PV-Freiflächenanlagen in Deutschland im Vergleich der Szenarien *Ref*, *RAS* und *Basis*

	2010	2020	2030	2040	2050
Installierte Kapazität [GW]					
Referenz	2,7	9,8	9,6	0,7	16
RAS	2,7	9,8	9,6	18	49
Basis	2,7	13	13	13	30
Flächeninanspruchnahme [ha]					
Referenz	22.000	24.000	24.000	1.900	39.000
RAS	22.000	24.000	24.000	45.000	120.000
Basis	22.000	33.000	33.000	33.000	76.000

Tabelle 17 Direkte Flächeninanspruchnahme durch PV-Freiflächenanlagen in Deutschland im Vergleich der Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*

	2010	2020	2030	2040	2050
Installierte Kapazität [GW]					
Basis	2,7	13	13	13	30
geNA	2,7	9,8	9,6	18	49
Regio	2,7	13	13	13	30
Flächeninanspruchnahme [ha]					
Basis	22.000	33.000	33.000	33.000	76.000
geNA	22.000	24.000	24.000	45.000	120.000
Regio	22.000	33.000	33.000	33.000	76.000

Windkraftanlagen

Die direkte Flächeninanspruchnahme durch Windkraftanlagen (WKA) besteht in der versiegelten Fläche, die für eine WKA benötigt wird (Fundament, Kranstellfläche (die bis zum Rückbau der Anlage bestehen bleibt), Kranauslegerfläche und Zufahrtswege). Der Fundamentdurchmesser einer WKA variiert zwischen 20 und 30 Metern; die Fundamentfläche beträgt somit bei einem Durchmesser von 30 Metern etwa 0,08 ha. Darüber hinaus werden noch versiegelte Zufahrtswege und teilversiegelte Kranstellflächen benötigt. Zusammen genommen ergibt sich etwa ein versiegelter Flächenbedarf von 0,2 ha pro Anlage. Für die temporär belegten Flächen werden 0,8 ha je Anlage angesetzt, bei Waldstandorten entspricht dies der Gesamtrodungsfläche. Davon werden

etwa 50% nach Errichtung der Anlage wieder aufgeforstet. Hieraus ergeben sich die Werte in Tabelle 18 bzw. Tabelle 19.

Tabelle 18 Direkte Flächeninanspruchnahme durch Windkraftanlagen an Land in Deutschland im Vergleich der Szenarien *Ref*, *RAS* und *Basis*

	2010	2020	2030	2040	2050
Installierte Kapazität [GW]					
Referenz	27	39	30	36	53
RAS	27	35	41	75	101
Basis	27	42	38	70	75
Flächeninanspruchnahme [ha]					
Referenz	2.700	3.900	3.000	3.600	5.300
RAS	2.700	3.500	4.100	7.500	10.000
Basis	2.700	4.200	3.800	7.000	7.500

Tabelle 19 Direkte Flächeninanspruchnahme durch Windkraftanlagen an Land in Deutschland im Vergleich der Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*

	2010	2020	2030	2040	2050
Installierte Kapazität [GW]					
Basis	27	42	38	70	75
geNA	27	42	33	65	100
Regio	27	44	41	76	82
Flächeninanspruchnahme [ha]					
Basis	2.700	4.200	3.800	7.000	7.500
geNA	2.700	4.200	3.300	6.500	10.000
Regio	2.700	4.400	4.100	7.600	8.200

Freileitungen und Umspannwerke

Freileitungen im Übertragungsnetz werden in der Regel mit Plattenfundamenten gebaut; pro Mast werden ca. 100 m² versiegelt. Für das 35.000 km lange Übertragungsnetz im Jahr 2010 betragen die Abstände zwischen den Masten zwischen 300 m und 450 m [TenneT 2014a]. Somit ist für das Übertragungsnetz von ca. 93.000 Masten mit ca. 930 ha versiegelter Fläche (0,027 ha je km Freileitung) auszugehen. In den Szenarien wird die direkte Flächeninanspruchnahme durch Freileitungen fortgeschrieben; neue Leitungen werden fast ausschließlich als Erdkabel verlegt. Die direkte Flächeninanspruchnahme von Muffenstationen, Crossbondingschächten usw. bei Kabelnetzen ist im Vergleich dazu sehr klein und wird als vernachlässigbar eingestuft. In [Koldrack 2013] wird die durch Umspannwerke in Deutschland im Jahr 2012 beanspruchte Flä-

che auf Grundlage der ATKIS-Datenbank mit 5.200 ha ermittelt. Nur ein kleiner Teil der Fläche eines Umspannwerks ist durch Betriebsstraßen, Fundamente oder das Betriebsgebäude versiegelt [TenneT 2013]. Dieser Wert wird für alle Szenarien fortgeschrieben.

Dachflächenbelegung in Deutschland

Im Jahr 2010 wurden 102 Mio. m², d.h. 3,1% der ca. 3,3 Mrd. m² Dachflächen Deutschlands für PV und Solarthermie genutzt. Im *Basisszenario* steigt bis zum Jahr 2050 die Belegung von Dachflächen auf 260 Mio. m² von dann ca. 3,8 Mrd. m² Dachflächen (= 7,5%). Im *Referenzszenario* sinkt die Ausnutzung auf 1,3%, im *restriktionsarmen Szenario* auf 0,9% (Abbildung 21). Im Vergleich der Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio* (Abbildung 22) bestehen hinsichtlich der Belegung von Dachflächen keine Unterschiede.

Direkte Flächeninanspruchnahme in Deutschland im Vergleich

Abbildung 23 zeigt die aufsummierte direkte Flächeninanspruchnahme im Vergleich der Szenarien *Ref*, *RAS* und *Basis*; Abbildung 24 die direkte Flächeninanspruchnahme im Vergleich der Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*. Bei der direkten Flächenwirkung dominiert der Braunkohletagebau. Je nach Szenario werden bis 2050 ca. 200.000 ha Landschaft überformt und umgenutzt; die offenliegenden Betriebsflächen werden im *Basisszenario* von 55.000 ha fast vollständig rekultiviert. In den Szenarien mit kontinuierlicher Braunkohlenverstromung (*Ref* und *RAS*) bleiben bis zu 53.000 ha Betriebsflächen bis 2050 bestehen. Im *Basisszenario* werden an zweiter Stelle durch PV-Freiflächenanlagen bis 2050 ca. 76.000 ha in Anspruch genommen. Kraftwerksflächen sowie versiegelte Flächen durch Freileitungen und Windkraftanlagen sind in allen Szenarien von untergeordneter Bedeutung. Im Szenario *geNA* werden im Vergleich zum *Basisszenario* signifikant größere Flächen durch Freiflächen-PV belegt.

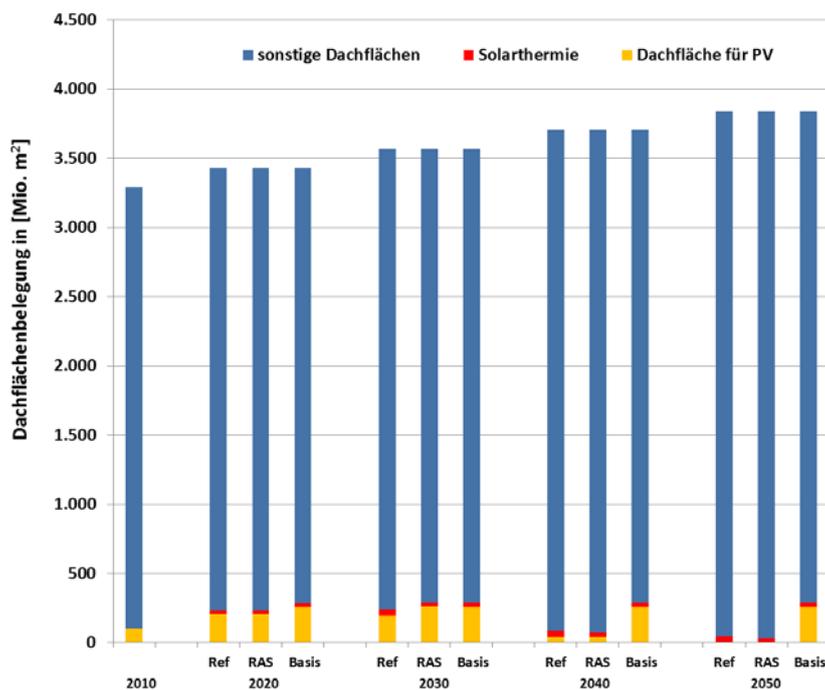


Abbildung 21 Dachflächenbelegung in Deutschland im Vergleich der Szenarien Ref, RAS und Basis, 2000-2050

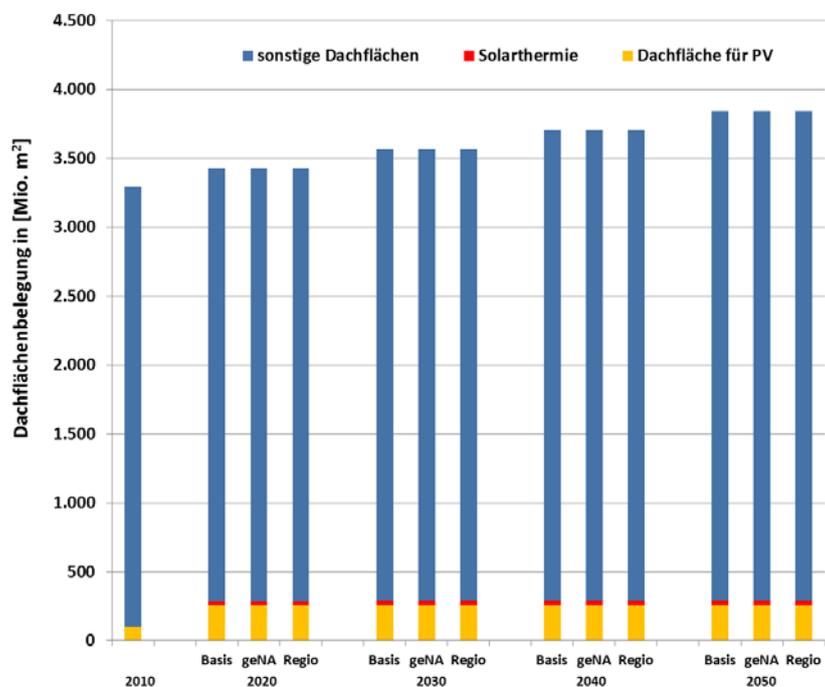


Abbildung 22 Dachflächenbelegung in Deutschland im Vergleich der Szenarien Basis, geNA und Regio, 2000-2050

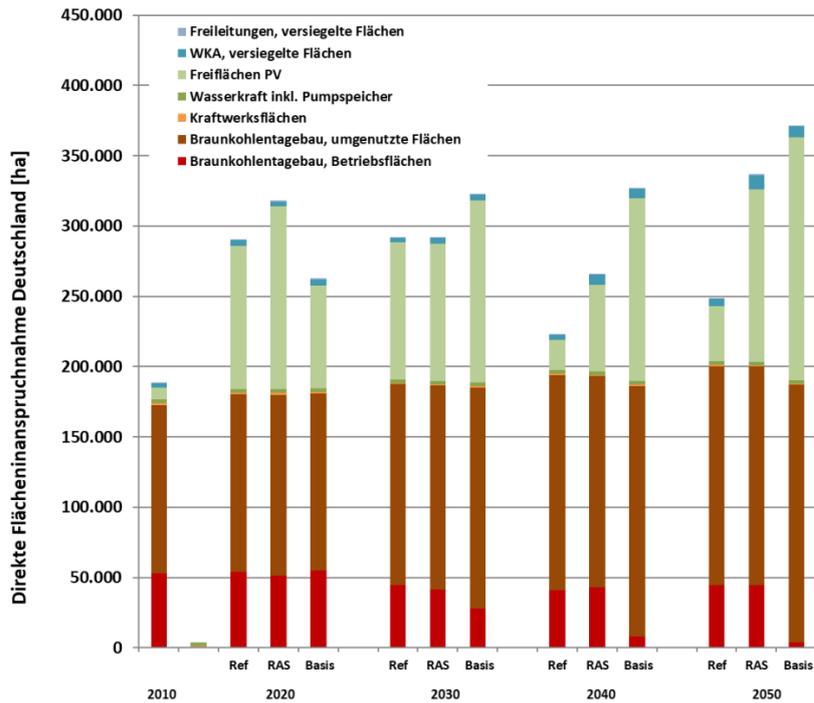


Abbildung 23

Direkte Flächeninanspruchnahme in Deutschland (ohne Anbaubio-
masse) im Vergleich der Szenarien *Ref*, *RAS* und *Basis*, 2000-2050

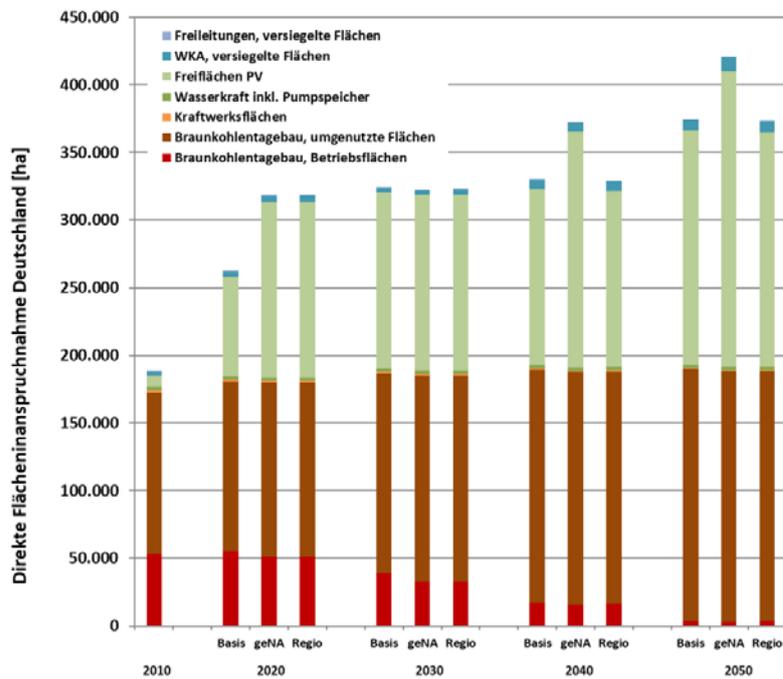


Abbildung 24

Direkte Flächeninanspruchnahme in Deutschland (ohne Anbaubio-
masse) im Vergleich der Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*, 2000-
2050

5.4 Indirekte Flächeninanspruchnahme in Deutschland

Windkraftanlagen

Abstandsregelungen sind in den einzelnen Bundesländern recht unterschiedlich geregelt. Eine ausführliche Zusammenstellung stammt vom Bundesamt für Naturschutz [2000]. Hierin werden die Abstände zwischen Naturschutzflächen und WKA sowie die Abstände zwischen sonstigen Flächen und WKA aufgelistet. So variieren die Abstände von z.B. 25 m zu Wald (Nordrhein-Westfalen) über 200 m zu Naturschutzgebieten (diverse Länder), 500 m zu ausgewiesenen Vogelschutzgebieten (u.a. Baden-Württemberg, Nordrhein-Westfalen) bis zu 1.000 m zu Küstengewässern (Mecklenburg-Vorpommern). Mindestabstände zu Verkehrsinfrastruktur betragen in einigen Ländern 50 m (Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen), jene zu Baugebieten sind z.B. in Rheinland-Pfalz abhängig vom Schallleistungspegel der Gesamtanlage und betragen bei Gewerbegebieten 45 m, bei reinen Wohngebieten mindestens 290 m [BBSR, 2006].

Um die gegenseitige Beeinflussung zu minimieren, müssen Windkraftanlagen einen Mindestabstand zueinander einhalten. Dieser ist abhängig von der vorherrschenden Windrichtung und der Anlagengröße. Nach der Agentur für Erneuerbare Energien e.V. [2010] lag der rechnerische Wert für die Abstandsfläche im Jahr 2008 bei 7 ha pro MW und wird ab dem Jahr 2020 auf 6 ha pro MW sinken. Daraus ergeben sich die in Tabelle 20 errechneten Zahlenwerte für die Szenarien.

Tabelle 20 Indirekte Flächeninanspruchnahme [ha] durch Windkraftanlagen in Deutschland im Vergleich der Szenarien *Ref*, *RAS* und *Basis*

	2010	2020	2030	2040	2050
Referenz	190.000	270.000	210.000	250.000	360.000
RAS	190.000	250.000	290.000	520.000	710.000
Basis	190.000	290.000	270.000	490.000	530.000

Tabelle 21 Indirekte Flächeninanspruchnahme [ha] durch Windkraftanlagen in Deutschland im Vergleich der Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*

	2010	2020	2030	2040	2050
Basis	190.000	290.000	270.000	490.000	530.000
geNA	190.000	290.000	230.000	460.000	700.000
Regio	190.000	300.000	280.000	530.000	570.000

Übertragungsnetz

Übertragungsnetze ermöglichen einen Transport von Strom über große Entfernungen. Über sogenannte Kuppelleitungen ist das deutsche Höchstspannungsnetz an das europäische Verbundnetz angeschlossen. Die Stromkreislänge der Übertragungsnetze in Deutschland beträgt derzeit ca. 35.000 Kilometer [BMW 2014]. Übertragen wird mit Höchstspannung von 220 Kilovolt (kV) oder 380 kV. Bis zum Jahr 2020 sollen nach dem Netzentwicklungsplan 2.800 km Netzleitungen zugebaut werden [Bundesnetzagentur 2012]. Für die Breite einer Freileitungstrasse wird nach [Energieatlas Bayern 2014] für eine 2-systemige Freileitung (380 kV, 50Hertz) ein Wert von 70 m angesetzt. Wie bei Freileitungen geht auch von Erdkabeln eine Schneisenwirkung aus [50 Hertz 2012]. Darüber hinaus werden beim Bau von Erdkabeln Boden- und Wasserhaushalt beeinflusst. Die Trassenbreite für das Übertragungsnetz wird nach [50Hertz kein Datum] mit ca. 30 m angesetzt. Die Trassenlängen und errechneten Daten für die indirekte Flächeninanspruchnahme sind in Tabelle 22 und Tabelle 23 zusammen gestellt.

Tabelle 22 Indirekte Flächeninanspruchnahme durch Übertragungsnetze in Deutschland im Vergleich der Szenarien *Referenz*, *RAS* und *Basis*

	2013	2020	2030	2040	2050
Oberirdisches Übertragungsnetz [Trassen-km]					
Referenz	24.157	24.788	25.964	26.499	26.347
RAS	24.157	24.788	25.963	26.718	26.665
Basis	24.157	24.445	23.583	22.657	22.365
Übertragungsnetz (Erdkabel) [Trassen-km]					
Referenz	0	0	273	737	889
RAS	0	0	433	1.081	1.254
Basis	0	343	2.786	4.715	5.007
Neues Verteilungsnetz, Erdkabel [Trassen-km]					
Referenz		56.521	63.785	107.694	159.863
RAS		44.845	47.104	105.110	173.737
Basis		44.681	47.146	95.472	162.756
Indirekte Flächeninanspruchnahme Übertragungsnetz [ha]					
Referenz	169.000	179.000	183.000	188.000	187.000
RAS	166.000	173.000	183.000	190.000	190.000
Basis	166.000	172.000	173.000	173.000	172.000

Tabelle 23 Indirekte Flächeninanspruchnahme durch Übertragungsnetze in Deutschland im Vergleich der Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*

	2013	2020	2030	2040	2050
Oberirdisches Übertragungsnetz [Trassen-km]					
Basis	24.157	24.445	23.583	22.657	22.365
geNA	24.157	24.445	23.780	22.812	22.465
Regio	24.157	24.445	24.172	23.728	23.355
Übertragungsnetz (Erdkabel) [Trassen-km]					
Basis	0	343	2.786	4.715	5.007
geNA	0	343	2.229	4.536	4.883
Regio	0	343	1.811	2.101	2.369
Neues Verteilungsnetz, Erdkabel [Trassen-km]					
Basis		44.681	47.146	95.472	162.756
geNA		40.581	42.406	93.362	180.885
Regio		40.748	43.471	90.111	132.771
Indirekte Flächeninanspruchnahme Übertragungsnetz [ha]					
Basis	166.000	172.000	173.000	173.000	172.000
geNA	166.000	172.000	175.000	172.000	171.000
Regio	166.000	172.000	173.000	173.000	172.000

Verteilnetz

Bei den neuen Verteilnetzen (z.B. unterhalb von Straßen oder Bürgersteigen) kommt es zu keinen neuen Flächeninanspruchnahmen.

Vergleichende Bilanz

Die Werte für die indirekte Flächeninanspruchnahme werden in Abbildung 25 (Szenarien *Ref*, *RAS* und *Basis*) und Abbildung 26 (Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*) verglichen. Bei der indirekten Flächenwirkung dominieren in allen Szenarien die Windkraftanlagen, gefolgt von den oberirdischen Übertragungs- und Verteilungsnetzen. Im Vergleich aller Szenarien ist die indirekte Flächeninanspruchnahme im *restriktionsarmen Szenario* durch den massiven Ausbau von Windkraftanlagen an Land am größten, gefolgt vom Szenario *geNA*. Die indirekten Flächeninanspruchnahmen folgender Prozesse wurden nicht berücksichtigt: (a) Förderung fossiler Energieträger im Ausland (Abraumhalden Steinkohle, Förderanlagen für Erdöl und Erdgas), (b) Flächenwirksamkeit von Importstrom und (c) Flächenwirksamkeit der Rohstoffgewinnung für Energieinfrastruktur.

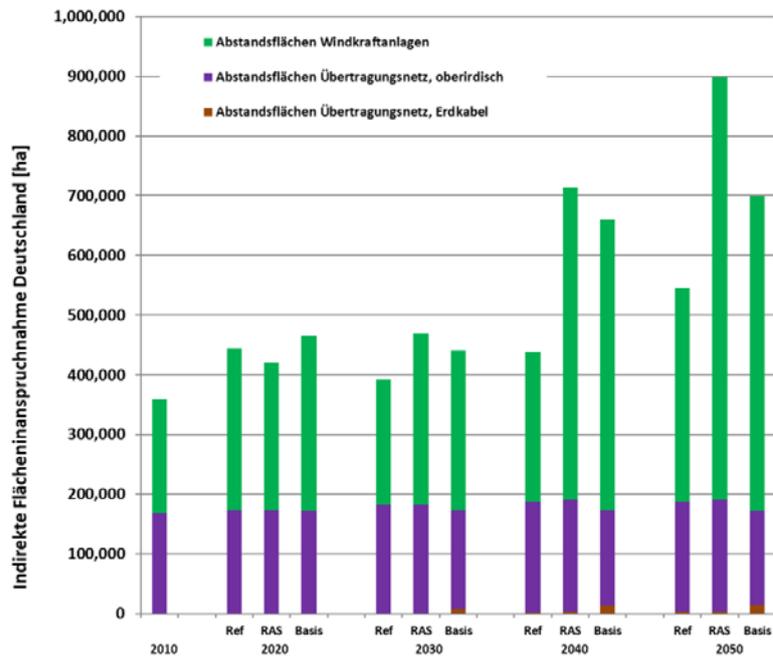


Abbildung 25 Indirekte Flächeninanspruchnahme im Vergleich der Szenarien *Ref*, *RAS* und *Basis*

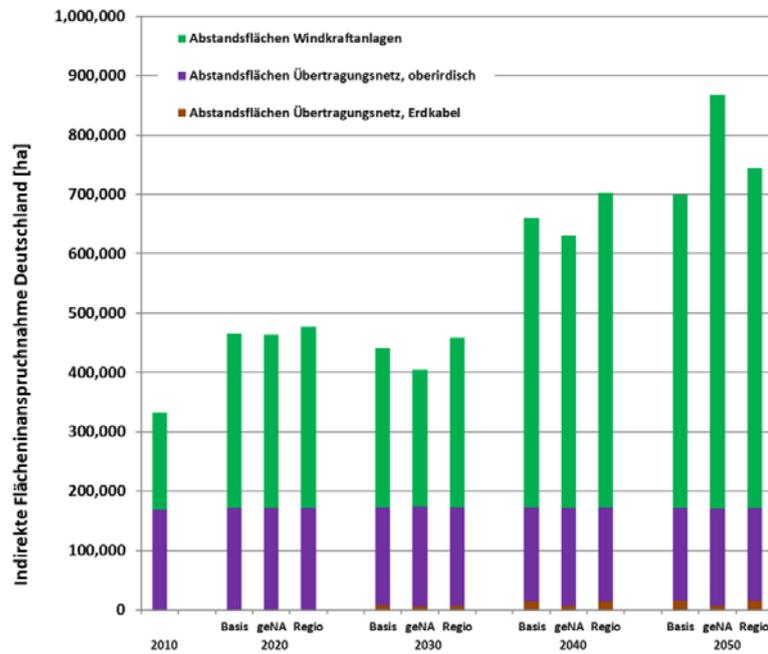


Abbildung 26 Indirekte Flächeninanspruchnahme im Vergleich der Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*

6 Inanspruchnahme von Oberflächengewässern

6.1 Methodisches Vorgehen

In diesem Kapitel wird die Wasserintensität des Energiesektors für den Untersuchungszeitraum 2010 bis 2050 quantifiziert und bewertet. Basierend auf Daten für die Energieerzeugung durch Wasserkraft- und Wärmekraftwerke im Jahre 2010, werden spezifische Faktoren abgeleitet und für die Prognose der zukünftigen Wasserinanspruchnahme angewendet.

Wasserinanspruchnahme durch Wasserkraftwerke

Anhand der Daten aller baden-württembergischen Laufwasserkraftwerke >10 MW_{el} installierter Leistung für die Bruttostromerzeugung im Jahre 2010 wird ein Turbinendurchfluss von 470 m³ pro MWh Strom abgeleitet. Dabei handelt es sich um 12 Wasserkraftanlagen, die sowohl EEG als auch nicht EEG gefördert sind. Für die Berechnung wurden die vom Betreiber angegebenen Daten verwendet; zum Teil wurden die Wirkungsgrade in Anlehnung an Quaschnig [2000] geschätzt. Geringfügige Abweichungen zur realen Situation sind möglich, dies ist für die Berechnungen des Turbinendurchflusses aber unkritisch. Der ermittelte Faktor wird auf die Stromerzeugung aller deutschen Wasserkraftanlagen angewendet. Darin sind Laufwasser-, Speicherwasser- und Pumpspeicherkraftwerke enthalten.

Wasserinanspruchnahme durch Wärmekraftwerke

Bei einer Bruttostromerzeugung von 1.805 PJ aus Wärmekraftwerken in Deutschland im Jahr 2010 mussten für die Ableitung von 2.847 PJ Abwärme insgesamt 20,2 Mrd. m³ Kühlwasser aus Vorflutern entnommen werden [Statistisches Bundesamt 2013]; das entspricht einer Kühlwassermenge von 25 m³ pro erzeugter MWh Bruttostrom. Nach Angaben des Statistischen Bundesamts [2013] stammen 99,4% des im Energiesektor genutzten Wassers aus Oberflächengewässern (Uferfiltrat, Flüsse, Seen, Talsperren, Grundwasser). Etwa 49% der Abwärme (1.410 PJ) wurde wieder in den Vorfluter eingeleitet und 51% (1.440 PJ) über Verdunstung abgeführt. Für die Verdunstungskühlung in Kühltürmen wurden 3% des entnommenen Wassers verwendet und dabei 600 Mio. m³ Wasser als Dampf freigesetzt. Für die Prognose in den Szenarien wurden folgende spezifischen Faktoren bezogen auf ein PJ Abwärme abgeleitet:

- Kühlwasserentnahme: 7,1 Mio. m³ PJ⁻¹
- Kühlwassereinleitung: 6,9 Mio. m³ PJ⁻¹
- Abwärme in Vorfluter / Abwärme über Verdunstung: 49% / 51%
- Emission von Wasser über Kühltürme: 210.000 m³ PJ⁻¹

Änderungen der Kühlsysteme von Wärmekraftwerken innerhalb der betrachteten Zeiträume der Szenarien sind hierbei nicht berücksichtigt.

6.2 Bilanz für 2010

Wasserkraftanlagen

Die Mehrheit der Wasserkraftwerke in Deutschland hat weniger als 10 MW_{el} installierte Leistung. Der Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. [BDEW, 2011] weist für das Jahr 2010 für Deutschland den Betrieb von 7.089 Wasserkraftanlagen aus. Die Bundesnetzagentur [2014] klassifiziert davon 87 Laufwasserkraftwerke (>10 MW_{el}), 4 Speicherkraftwerke (>10 MW_{el}) und 48 Pumpspeicherkraftwerke (>10 MW_{el}). Bayern und Baden-Württemberg haben als Bundesländer mit hoher Reliefenergie das größte Wasserkraftpotenzial und die höchste Anlagendichte in Deutschland. Der spezifische Turbinendurchfluss wurde auf Basis der Laufwasserkraftwerke in Baden-Württemberg mit ca. 47.000 m³/GWh ermittelt (vgl. Tabelle 24).

Tabelle 24 Turbinendurchfluss und Jahresstromerzeugung bei Laufwasserkraftwerken in Baden-Württemberg im Jahr 2010

Wasserkraftwerk in Betrieb ¹⁾	Mittlere Fallhöhe [m]	Mittlere Jahresstromerzeugung [GWh]	Turbinendurchfluss [Mio. m ³ /a] ¹⁰⁾
RADAG Kanalkraftwerk	9,16 ²⁾	580 ²⁾	260
RADAG Wehrkraftwerk	8,75 ²⁾	122 ²⁾	58
Rheinkraftwerk Säckingen	7 ³⁾	490 ⁴⁾	290
Rudolf-Fettweis-Werk (Murgwerk)	145 ⁵⁾	80 ³⁾	2,3
KW Wyhlen	5,6 ⁶⁾	255 ⁷⁾	190
Rheinkraftwerk Iffezheim	11 ⁸⁾	740 ⁸⁾	280
Rheinkraftwerk Reckingen	8,5 ³⁾	240,8 ⁹⁾	120
KW Rheinfelden	7,5 ³⁾	600 ³⁾	330
Rheinkraftwerk Ryburg-Schwörstadt	10 ³⁾	760 ³⁾	320
Dettingen	14,1 ³⁾	50 ³⁾	15
Unteropfingen	17 ³⁾	61,6 ³⁾	15
Tannheim	15,8 ³⁾	57,5 ³⁾	15
Summe	259	4.037	1.900

1) [Bundesnetzagentur, 2014]; 2) [RADAG, 2009]; 3) [ENBW, 2014]; 4) [RSK, 2007]; 5) [ENBW, 2011]; 6) [PÖRY, 2013]; 7) [Energiedienst, 2012]; 8) [ENBW, 2009]; 9) [Kraftwerk Reckingen AG, 2012]; 10) Der Durchfluss V wurde wie folgt errechnet: $V = W / (\eta_T \cdot \eta_G \cdot \eta_{\text{Getriebe\&Trafo}} \cdot h \cdot \rho \cdot g) \cdot (365 \text{ d} \cdot 24 \text{ h} \cdot 60 \text{ min} \cdot 60 \text{ sec})$ wobei η_T Wirkungsgrad (WG) Turbine 90%, η_G WG Generator 95%, $\eta_{\text{Getriebe\&Trafo}}$ WG Getriebe und Transformator 90%, ρ Dichte des Wassers 1000 kg/m³, g Erdbeschleunigung 9,81 m/s²

Tabelle 25 Kenndaten für Wärmekraftwerke in Deutschland, 2010

	Braun- kohle	Stein- kohle	Erdgas	Mineralöl	Kern- energie	Summe
Primärenergie- verbrauch [PJ] 1)	1.405	1.151	925	82	1.533	5.096
Bruttostromer- zeugung [PJ] 2)	525	421	321	31	506	1.805
Fernwärme [PJ] 3)	41	139	253	10	0	443
Abwärme [PJ] 4)	839	590	351	41	1.027	2.847
Kühlwasser [Mio. m³/a] 5)	-	-	-	-	-	20.145
Verdunstungs- verlust [Mio. m³/a] 5)	-	-	-	-	-	600,4
Eingeleitetes Kühlwasser [Mio. m³/a] 6)	-	-	-	-	-	19.500
Abwärme via Verdunstung [PJ] 8)	-	-	-	-	-	1.440
Abwärme in Vorfluter [PJ] 7)	-	-	-	-	-	1.410

1) [AGEB, 2013]; 2) [BMWi, 2014, p. 22]; 3) [BMWi, 2014, p. 22]; 4) Primärenergieverbrauch minus Bruttostromverbrauch minus Fernwärme; 5) [Statistisches Bundesamt, 2013]; 6) Kühlwasserbedarf minus Verdunstungsverlust; 7) errechnet aus Verdunstungsenthalpie; 8) Abwärmeaufkommen minus Abwärmeabfuhr via Verdunstung

Die Stromerzeugung aus Wasserkraft wird entweder als regenerativer Strom (aus natürlichen Zuflüssen / ohne Pumpbetrieb) oder gesamt Strom (inkl. Strom aus unnatürlichen Zuflüssen / Pumpbetrieb) angegeben. Die regenerative Bruttostromerzeugung 2010 belief sich auf 21 TWh, die gesamte Bruttostromerzeugung auf 27,5 TWh [BMWi, 2014, S. 22]. Der für die regenerative Stromerzeugung benötigte Turbinendurchfluss berechnet sich für 2010 jeweils auf 9,9 Mrd. m³, in der Summe mit Pumpbetrieb auf 12,9 Mrd. m³. Diese Wassermengen entsprechen jeweils 6% und 7% des Mittleren Abflusses aller betroffenen Flusssysteme (Rhein, Donau, Elbe, Weser, Oder). Der Turbinendurchfluss in Bayern beträgt allein 12% des mittleren Abflusses der Donau, für Baden-Württemberg sind es 2% des mittleren Abflusses von Rhein und Donau.

Das Potenzial zur Wasserkraftnutzung gilt in Deutschland mit insgesamt 10,4 GW_{el} installierter Leistung [BMWi, 2014, p. 22] als weitgehend ausgeschöpft [UBA, 2014]. Eine Erhöhung der Wasserkraftleistung ist insbesondere durch Optimierungen, Moder-

nisierungen und Reaktivierung bestehender, jedoch nicht genutzter Stauhaltungen möglich [UBA, 2014]. Ein weiterer Ausbau der Laufwasserkraft wird zum Schutz der Natur (eingeschränkte Durchgängigkeit) nicht in Betracht bezogen. Derzeit sind in Deutschland neue Pumpspeicherkraftwerke bzw. Erweiterungen bestehender Pumpspeicherwerke mit insgesamt 1.690 MW_{el} in Planung [BDEW, 2017].

Wassernutzung durch Wärmekraftwerke

Die Bundesnetzagentur weist 2010 für Deutschland ca. 150 Braunkohlekraftwerke, 106 Steinkohlekraftwerke, 231 Erdgaskraftwerke, 51 Mineralölkraftwerke und 15 Kernkraftwerke aus. Die Bruttostromerzeugungskapazität dieser fossilen Wärmekraftwerke betrug 2010 insgesamt 104 GW_{el}. Der Primärenergieverbrauch fossiler Wärmekraftwerke belief sich 2010 auf 5.096 PJ [AGEB, 2013], davon dienten 1.805 PJ (501,5 TWh) der Bruttostromerzeugung und 443 PJ für Fernwärme [BMWI, 2014, p. 22]. Die anfallende Abwärme von 2.847 PJ wird über Kühlwasser abgeführt. Die dafür benötigte Kühlwassermenge belief sich 2010 auf 20,1 Mrd. m³, davon verdunsteten rund 3% (0,6 Mrd. m³) [Statistisches Bundesamt, 2013]. Die insgesamt genutzte Kühlwassermenge entspricht somit 11% des gesamten mittleren Abflusses aller betroffenen Flusssysteme (Rhein, Donau, Elbe, Weser, Oder). Die mit dem abgeleiteten Kühlwasser eingeführte Abwärme berechnet sich für 2010 auf 1.410 PJ. Die mittlere Erwärmung des Flusswassers in Deutschland durch Einleitung von Abwärme aus Kraftwerken beträgt somit ca. 1,9 Kelvin.

Tabelle 26 fasst die Ergebnisse zur Inanspruchnahme der Ressource Wasser durch die Energieerzeugung in Deutschland im Jahr 2010 zusammen:

- Etwa 7% des Wassers der deutschen Flüsse wird durch Turbinen zur Stromerzeugung geleitet.
- Etwa 11% des Wassers der deutschen Flüsse wird durch Wärmekraftwerke geleitet und dabei erwärmt.
- Der Wärmeeintrag in Oberflächenwasser von 1.410 PJ beträgt etwa 10% des Primärenergieverbrauchs Deutschlands (im Jahr 2010 ca. 14.200 PJ). Dadurch wird das Wasser der deutschen Flüsse im Mittel um 1,9 Kelvin erwärmt.
- Die Entnahme von Wasser durch Turbinen und zur Kühlung sowie die eingetragene Abwärme führen zur Schädigung und Tötung von Organismen.
- Die Verdunstung von 0,6 Mrd. m³ Wasser aus Kühltürmen entspricht 0,3% der natürlichen Verdunstung über dem Gebiet Deutschlands; auf der Fläche Deutschlands von 357.168 km² und einer mittleren Verdunstung von 490 mm/a [NLÖ 2001] verdunsten 175 Mrd. m³ Wasser pro Jahr.

Tabelle 26 Inanspruchnahme der Ressource Wasser durch die Energieerzeugung in Deutschland im Jahr 2010

Parameter	Wert
Mittlerer Abfluss der Flüsse in Deutschland, Mrd. m ³	180 ^{a)}
Turbinendurchfluss inkl. Pumpbetrieb, Mrd. m ³	12,9
Kühlwasserentnahme aus Flüssen, Mrd. m ³	20,1
Verdunstungsverlust (Kühlturmschwaden), Mrd. m ³ Wasser	0,6
Wärmeeintrag in Oberflächengewässer, PJ	1.410
Mittlere Erwärmung des Flusswassers in Deutschland durch Einleitung von Abwärme aus Kraftwerken, K	1,9

a) davon: Rhein 73 Mrd. m³/a; Donau 47 Mrd. m³/a; Elbe 27 Mrd. m³/a; Oder 18 Mrd. m³/a; Weser 12 Mrd. m³/a, jeweils am wasserreichsten inländischen Punkt

6.3 Bilanz für die Szenarien

Die Bilanz der Inanspruchnahme von Oberflächengewässern im Vergleich der Szenarien ist in Abbildung 27 (*Ref*, *RAS* und *Basis*) und in Abbildung 28 (*Basis*, *geNA* und *Regio*) dargestellt. Der Ausbau der erneuerbaren Energien und der Rückgang der Nutzung fossiler Energien in Wärmekraftwerken führen bezüglich der Wasserinanspruchnahme des Energiesektors zu folgenden Konsequenzen:

- Der Turbinendurchfluss durch Wasserkraftnutzung ändert sich nicht. Dadurch bleibt die Organismen-tötung durch Laufwasserkraftwerke zunächst unverändert, kann aber durch Nachrüstung der Anlagen (z.B. durch Fischabstiege) reduziert werden.
- Durch den Rückgang der Stromerzeugung aus Wärmekraftwerken sowie durch den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung geht die benötigte Kühlwassermenge zurück. Die Organismen-tötung durch Kühlwasserentnahme und die eingetragene Abwärme verringert sich deutlich. Die mittlere Erwärmung deutscher Flüsse reduziert sich von 1,8 K im Jahr 2010 auf <0,1 K im Jahr 2050 (*Basisszenario*).
- Obwohl im *restriktionsarmen Szenario (RAS)* ein erheblicher Einsatz von Braunkohle-energieerzeugung (mit CCS) stattfindet, ist die Erwärmung im Jahr 2050 ebenfalls mit <0,1 K gering, da die Abwärme über Kühltürme abgegeben wird. Auch im Referenzszenario ist sie mit 0,1 K gering.
- Durch den zunehmenden Klimawandel ist davon auszugehen, dass sich die Durchschnittstemperatur deutscher Flüsse erhöhen wird.

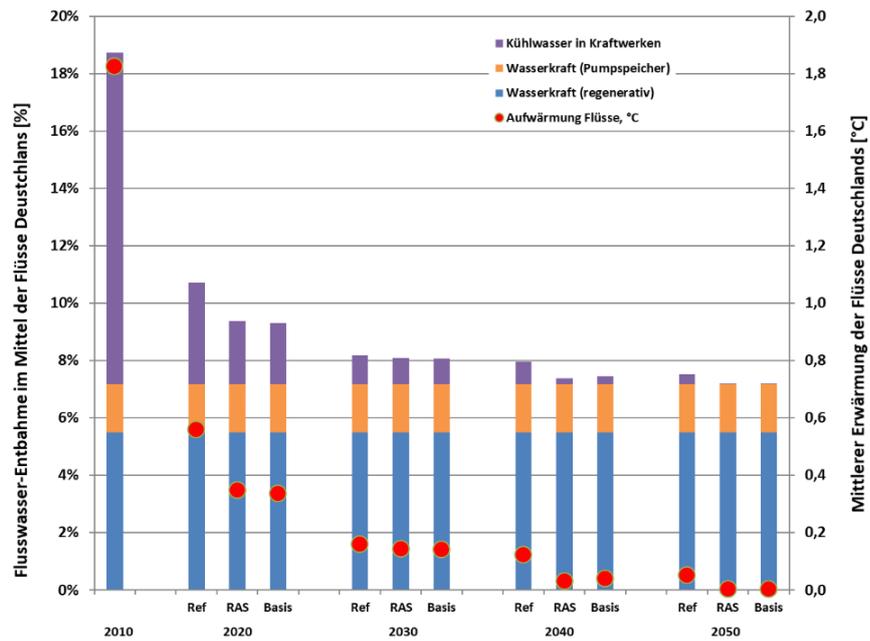


Abbildung 27 Inanspruchnahme der Ressource Oberflächengewässer durch die Energieerzeugung in Deutschland, 2010 bis 2050 im Vergleich der Szenarien *Ref*, *RAS* und *Basis*

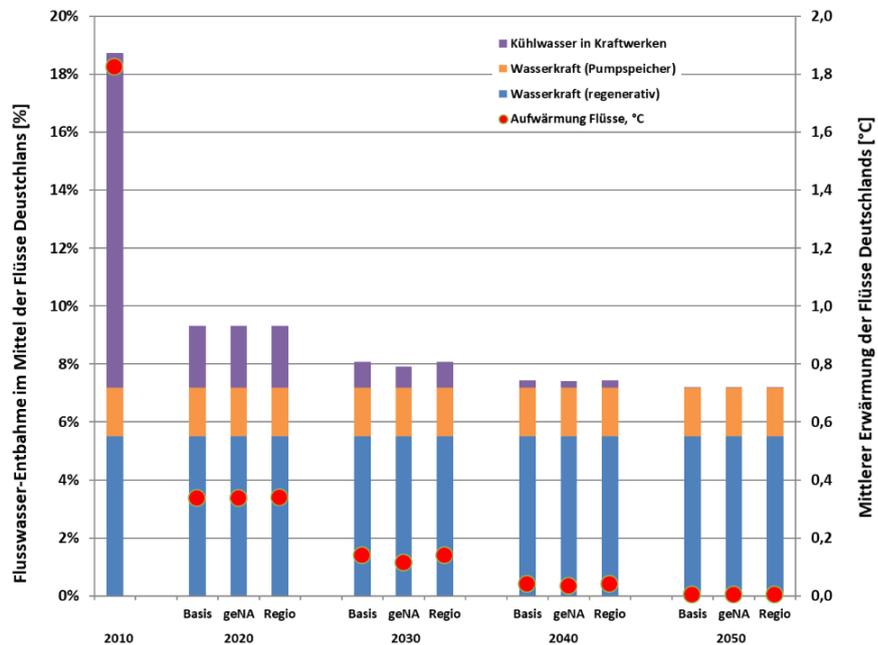


Abbildung 28 Inanspruchnahme der Ressource Oberflächengewässer durch die Energieerzeugung in Deutschland, 2010 bis 2050 im Vergleich der Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*

7 Auswirkungen auf Tiere, Pflanzen und Biodiversität

Bei der Bewertung der Auswirkungen wird zwischen *direkten Effekten* wie z.B. der Tötung von Organismen und den *indirekten Auswirkungen* durch Zerschneidung von Lebensräumen unterschieden.

7.1 Direkte Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen

Zu den direkten Auswirkungen zählen die Mortalität durch direkte Flächeninanspruchnahme, Kühlwasserentnahme bei Wärmekraftwerken (z.B. Fische, Muscheln) sowie die Organismen-tötung (Vögel und Fledermäuse) durch Windkraftanlagen und durch Freileitungen.

Mortalität durch direkte Flächeninanspruchnahme

Die Flächenversiegelung durch Anlagen und den Braunkohlebergbau sind mit der Tötung von tierischen und pflanzlichen Organismen verbunden. Die mit Abstand größte direkte Flächeninanspruchnahme in Deutschland entsteht durch den Braunkohlebergbau. Derzeit sind 53.000 ha Betriebsflächen abgeräumt. Nach der Neunutzung wird dies nur zum Teil kompensiert.

Die Flächeninanspruchnahme durch PV-Freiflächenanlagen ist demgegenüber weniger problematisch, da keine vollständige Versiegelung stattfindet und dafür in der Regel ökologisch weniger wertvolle Flächen genutzt werden.

Mortalität durch Wasserkraftwerke und Kühlwasserentnahme

Etwa 7,2% des mittleren Abflusses der deutschen Flusssysteme werden durch Wasserkraftwerke genutzt. Der Ausbau der Wasserkraftnutzung ist weitgehend abgeschlossen. Die Bandbreite für Fischmortalität beträgt zwischen 5% und 90% pro Turbinenpassage (abhängig von Technik und Standort). Laufwasserkraftwerke wirken sich negativ auf die Biodiversität von Flussökosystemen aus, die Mortalität ist jedoch nicht bestandsgefährdend. Bei dem Ausbau, der Optimierung, Modernisierungen oder Reaktivierung von Wasserkraftanlagen sollte die Durchgängigkeit der Gewässer gewahrt bzw. verbessert werden.

Die kumulierte Mortalität ist eine Funktion der mittleren Überlebensrate und Zahl der überwundenen Hindernisse (vgl. Abbildung 29). Der Organismenverlust lässt sich auf Basis der vorliegenden Untersuchungen nicht verlässlich quantifizieren, er ist jedoch nicht bestandsgefährdend.

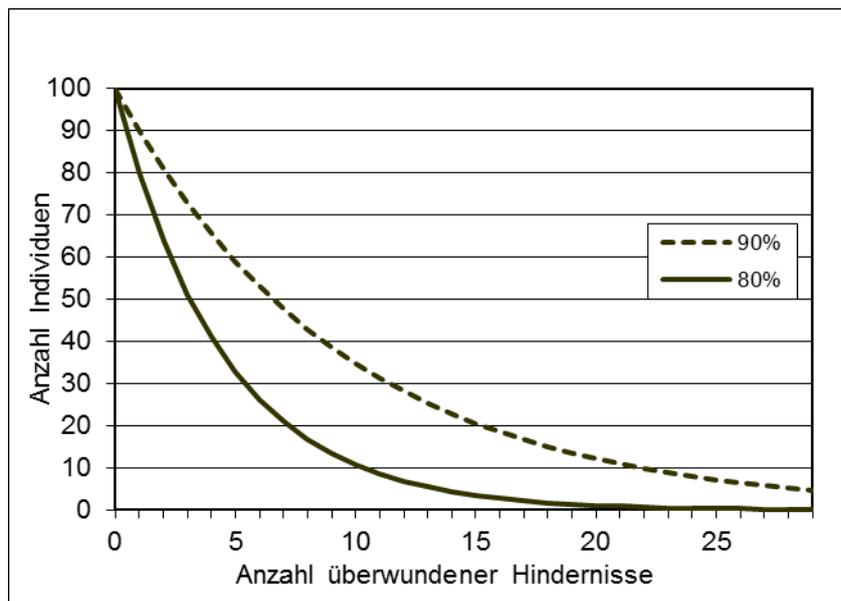


Abbildung 29 Kumulierte Mortalität bei mittleren Überlebensraten von 90% und 80 % pro überwundenem Hindernis [Quelle: IKSR 2004]

Je nach Standort führt auch die Kühlwassernutzung zu erheblichen Verlusten an Fischen. Darüber hinaus sind Fischlarven, Krebse, Muscheln, Schnecken usw. betroffen. Die Verluste sind jedoch ebenfalls nicht bestandsgefährdend. Das Beispiel von Kraftwerken im Bereich der deutschen Küste (Tabelle 27) zeigt jedoch zum Teil erhebliche Verluste an Fischen, bis zu 91,5 t/a beim AKW Unterweser (KKU). Die Verringerung der Kühlwassernutzung durch den Rückgang des Einsatzes von Wärmekraftwerken führt zu einer deutlichen Verringerung der Verluste. Hierbei ist das *Basisszenario* am vorteilhaftesten und das *restriktionsarme Szenario* am ungünstigsten einzustufen; das *Referenzszenario* liegt dazwischen.

Mortalität durch Windkraftanlagen (Vögel und Fledermäuse)

WKA werden von den meisten Vögeln gemieden, der Einfluss auf Brutvögel ist klein. Es gibt Kollisionen mit Windkraftwerken, die zu Mortalität bei Vögeln und Fledermäusen führen. Die Mortalität ist stark standortabhängig, jedoch nicht bestandsgefährdend. Bei ca. 10 Kollisionen mit Vögeln und Fledermäusen je WKA liegt der Organismenverlust im Jahr 2050 (ca. 25.000 WKA im *Basisszenario*) bei insgesamt ca. 13 t pro Jahr (Annahme: Gewicht 50 g pro Tier). Beim Bau weiterer WKA sollte durch geeignete Standortwahl dieses Risiko reduziert werden.

Ein geeigneter Indikator für die potenzielle Schädigung ist die Rotorfläche. Die im Jahr 2010 installierten 20.638 Windkraftanlagen an Land hatten einen mittleren Rotordurchmesser von 61 m [IE 2015]. Daraus errechnet sich eine Rotorfläche von 60 Mio.

m². Die Daten zur den Rotorflächen in den Szenarien sind in Tabelle 28 zusammengestellt. Im *Basisszenario* steigt die Rotorfläche bei Windkraftanlagen an Land auf 250 Mio. m² im Jahr 2050, das entspricht einer Vervielfachung gegenüber 2010. In erster Näherung wird die Mortalität von Vögeln und Fledermäusen ebenfalls ansteigen. Eine Reduzierung der Schadwirkung ist bei der Standortwahl und Betriebsart (Abschaltung bei Vogelzug) möglich.

Tabelle 27 Verluste an Fischen durch Kühlwassernutzung im Bereich der deutschen Küsten einschließlich Ästuare

Region	KKS	KBR	KKB	KWWH	KKU
Kraftwerk ^{a)}	Elbe	Elbe	Elbe	Jadebusen	Weser
MW _{el}	640	1.326	771	705	1.285
Kühlwasser, m ³ /s	33	60	36	26	60
Stint, t/a	9,5	15,4	22,7	21,9	56,3
Flunder, t/a	0,08		0,66	0,99	1,9
Aal, t/a	0,084	0,20	1,48	0,35	1,1
Stichling, t/a	0,32	0,22	0,31	0,32	12,3
Finte, t/a	0,32	1,7	2,1		
Kaulbarsch, t/a	0,64	5,0	2,9		0,42
Hering, t/a			2,6	13,45	1,68
Sonstige, t/a	0,94	2,4	0,77	17,14	17,8
Summe, t/a	12,7	25,0	33,7	54,2	91,5

a) KKS=AKW Stade; KBR=AKW Brokdorf; KKB= AKW Brunsbüttel; KWWH=Kohlekraftwerk Wilhelmshaven; KKU= AKW Unterweser. Quelle: Sprengel [1997]

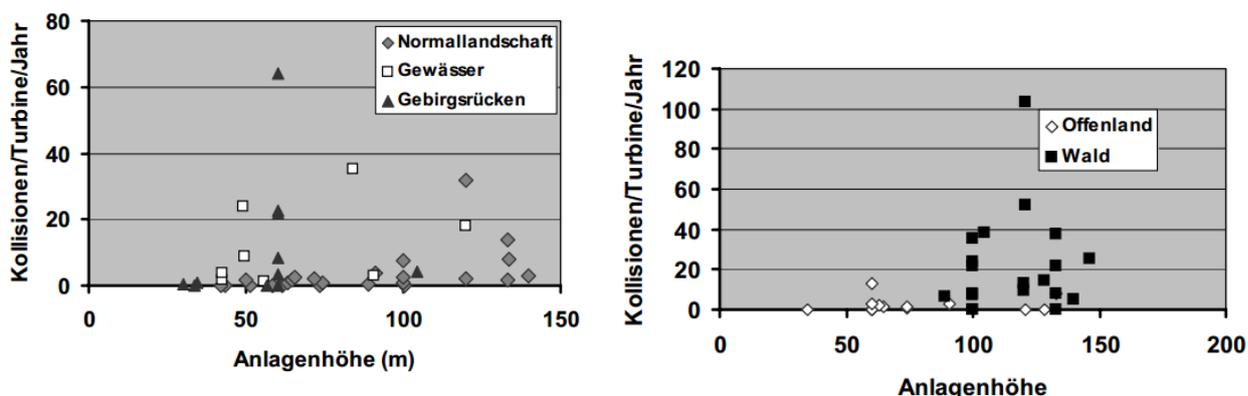


Abbildung 30 Kollisionsraten von Vögeln (links) und Fledermäusen (rechts) mit Windkraftwerken; aus [Hötker 2006]

Tabelle 28 Rotorflächen der installierten Windkraftanlagen an Land (Mio. m²) im Vergleich der Szenarien *Ref*, *RAS* und *Basis*

Szenario	2010	2020	2030	2040	2050
Referenz	60	82	72	110	160
RAS	60	74	110	230	330
Basis	60	90	95	220	250

Tabelle 29 Rotorflächen der installierten Windkraftanlagen an Land (Mio. m²) im Vergleich der Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*

Szenario	2010	2020	2030	2040	2050
Basis	60	90	95	220	250
geNA	60	89	80	200	320
Regio	60	93	100	240	270

Windkraftanlagen auf Waldstandorten

Bei Windkraftwerken haben Standorte in Wäldern aufgrund der dort relativ größeren Artenvielfalt größere Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen als Standorte auf landwirtschaftlichen Flächen. Ende 2010 waren in Deutschland 306 Windkraftanlagen - und damit knapp 1,5% des gesamten Anlagenbestandes - auf Waldflächen in Betrieb [FA Wind 2016]. In den Jahren zwischen 2010 und 2015 wurden weitere 859 Anlagen mit einer Gesamtleistung von 2,3 GW im Wald errichtet. Die Werte in Tabelle 30 und Tabelle 31 zeigen die Entwicklung in den Szenarien.

Tabelle 30 Installierte Leistung von Windkraftanlagen in GW (in Klammern der Anteil Waldstandorte in Prozent) sowie die Zahl der Anlagen im Wald im Vergleich der Szenarien *Ref*, *RAS* und *Basis*

Szenario	2010	2020	2030	2040	2050
Referenz [GW, Anteil Wald]	27 (1,5 %)	39 (0,5 %)	30 (2,1 %)	36 (4,5 %)	51 (8,3 %)
Anlagen im Wald	310	230	220	880	1.400
RAS [GW, Anteil Wald]	27 (1,5 %)	35 (0,5 %)	41 (3,5 %)	75 (9,9 %)	101 (12 %)
Anlagen im Wald	310	86	510	2.500	4.200
Basis [GW, Anteil Wald]	27 (1,5 %)	42 (1,6 %)	38 (3,8 %)	70 (1,0 %)	75 (10 %)
Anlagen im Wald	310	330	520	2.200	2.600

Tabelle 31 Installierte Leistung von Windkraftanlagen in GW (in Klammern der Anteil Waldstandorte in Prozent) sowie die Zahl der Anlagen im Wald im Vergleich der Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*

Szenario	2010	2020	2030	2040	2050
Basis [GW, Anteil Wald]	27 (1,5 %)	42 (1,6 %)	38 (3,8 %)	70 (1,0 %)	75 (10 %)
Anlagen im Wald	310	330	520	2.200	2.600
geNA [GW, Anteil Wald]	27 (1,5 %)	42 (2,0 %)	22 (3,4 %)	65 (11 %)	99 (14 %)
Anlagen im Wald	310	410	400	2.400	4.800
Regio [GW, Anteil Wald]	27 (1,5 %)	43 (3,0 %)	41 (4,8 %)	76 (9,3 %)	82 (9,8 %)
Anlagen im Wald	310	650	700	2.300	2.700

Bei einer angenommenen mittleren Anlagengröße von 3 MW für das Jahr 2050 werden im *Basisszenario* bei einer installierten Kapazität von 75 GW etwa 2.600 Anlagen (7,8 GW entsprechend ca. 10% der installierten Kapazität) im Wald stehen. Im *restriktionsarmen Szenario* wären es sogar 4.200 Anlagen, im Szenario *geNA* sogar 4.800.

Offshore-Windkraftanlagen

Die Errichtung und der Betrieb von Offshore-Windkraftanlagen sind mit Auswirkungen auf Meereslebewesen verbunden. Auswirkungen sind durch Windkraftanlagen, Konverterplattformen und Seekabel zu erwarten. Der Umweltbericht des Bundesfachplan Offshore (BFO-N) [BSH 2015] kommt zum Ergebnis:

„Aufgrund der Durchführung des BFO-N sind unter strenger Einhaltung der im Rahmen der konkreten Zulassungsverfahren anzuordnenden Vermeidungs- und Verminderungsmaßnahmen, für die der BFO-N grundsätzliche textliche Festlegungen trifft, nach derzeitigem Stand keine erheblichen Auswirkungen auf die Natura2000-Gebiete in ihren für die Schutz- und Erhaltungsziele oder den Schutzzweck maßgeblichen Bestandteilen zu erwarten.“

Mortalität 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]. Die Ursache für Kollisionen liegt demnach darin, dass die Leitungen nicht oder zu spät gesehen werden. Besonders gebietsunkundige Zugvögel seien in Gefahr.

Für Schleswig-Holstein ist insgesamt eine besondere Kollisionsgefährdung mit hohen Verlusten zu erwarten, weil es durch seine Lage zwischen Nord- und Ostsee, zwi-

schen Skandinavien und Mitteleuropa sowie durch die Lage am Wattenmeer, als Drehscheibe des nord- und mitteleuropäischen Vogelzuges gilt. Im Mittel über Deutschland sind deutlich niedrigere Verlustraten zu erwarten. Hierzu liegen jedoch keine verlässlichen Quantifizierungen vor.

Bei bestehenden Trassenlängen von ca. 50.000 km für Hochspannungsfreileitungen (Verteilungsnetz) und maximal 22.400 km für Freileitungen im Übertragungsnetz (*Basisszenario* 2050) und im Mittel über das Bundesgebiet angenommenen 50 Todesfällen pro Trassenkilometer und Jahr errechnet sich ein Organismenverlust von ca. 200 t pro Jahr.

Auswirkungen durch Luftschadstoffe

Luftschadstoffe können direkte Schäden an Pflanzen und Tieren bewirken und zudem nach ihrer Ablagerung abiotische Umweltfaktoren verändern. Bestimmte Arten und Lebensgemeinschaften werden dadurch verdrängt. Hohe Einträge luftgetragener Schadstoffe führen so zu einem Verlust an biologischer Vielfalt und bedrohen naturnahe Ökosysteme dauerhaft in ihrer Existenz. Indikatoren für das Maß der Beeinflussung sind das Versauerungs-, Eutrophierungs- und Ozonbildungspotenzial. Hier ist bei allen Szenarien eine deutliche Verbesserung in Hinblick auf Fauna, Flora und Biodiversität zu konstatieren. Für das *Basisszenario* gehen die Schadstoffemissionen bis 2050 gegenüber dem Stand 2010 um ca. 74 % zurück.

7.2 Auswirkungen auf Lebensräume und Biodiversität

Die Auswirkungen auf Lebensräume und Biodiversität stellen ein komplexes Problem dar und sind nur schwer in dieser Untersuchung im Vergleich von Szenarien zu quantifizieren und auf einen Nenner zu bringen. Für einen vollständigen Vergleich wären sehr unterschiedlich geartete Wirkungszusammenhänge zu bewerten. Eine Übersicht zeigt Tabelle 32.

Hierbei können folgende Ergebnisse festgehalten werden:

- Die größte Flächenbeanspruchung ist durch die Nutzung von Anbaubiomasse mit allen Risiken der Intensivlandwirtschaft gegeben. In den hier betrachteten Szenarien wird in Deutschland die Nutzung von bis zu 2,6 Mio. ha notwendig, durch die Importe führt die Nutzung von weiteren ca. 3,0 Mio. ha Fläche im Ausland zu vergleichbaren Auswirkungen.
- Die irreversible Zerstörung von Lebensräumen gibt es insbesondere im Braunkohletagebau und durch die Versiegelung von Flächen für Kraftwerke und andere Bauten. Selbst beim Ausstieg aus der Braunkohlenutzung im *Basisszenario* werden bis 2050

noch 15.000 ha neue Abbauf Flächen notwendig. Die Einwirkungen auf Lebensräume durch Bauwerke wie z.B. durch Kraftwerke ist demgegenüber untergeordnet.

- Die indirekten Auswirkungen durch Zerschneidung von Lebensräumen sind bei Windkraftanlagen und Freileitungen am größten, nimmt man die Abstandsflächen als Maßstab. Hier sind insgesamt bis zu 1 Mio. ha Fläche betroffen.
- Es entstehen indirekte Schädigungen von Menschen, Tieren und Pflanzen durch luft- und wassergetragene Emissionen aus Feuerungsprozessen.
- Bei der direkten Tötung von Tieren ist die Masse an getöteten Fischen durch Wasserkraftnutzung und Kühlwasserentnahme (>500 t/a) vermutlich größer als die Masse von getöteten Vögeln und Fledermäusen durch Kollision mit Windkraftanlagen und Freileitungen (>200 t/a). Die Masse der getöteten Tiere ist kein guter Indikator der Schädigung. In beiden Fällen sind die Verluste jedoch als nicht bestandsgefährdend einzustufen.
- Die Erwärmung der deutschen Flüsse durch Kühlwassereinleitung bewirkt schwer zu quantifizierende Lebensraumveränderungen und Organismenverluste durch Sauerstoffzehrung. Durch den Rückgang des Einsatzes von Wärmekraftwerken wird dieses Risiko deutlich verkleinert.
- Das Risiko einer weitflächigen Kontamination mit radioaktiven Stoffen durch AKWs in Deutschland verringert sich mit dem Abschalten des letzten deutschen AKW im Jahr 2022; das Risiko durch AKWs in den Nachbarländern bleibt jedoch bestehen.
- In der Gesamtbewertung sind auch durch die Importe verursachten Auswirkungen durch Energieerzeugung im Ausland (Biomasse, Strom, fossile Energieträger) zu berücksichtigen. Diese sind nur schwer zu quantifizieren.
- Im Vergleich der Szenarien gibt es kein eindeutiges Ausschlusskriterium oder keinen quantitativen Indikator für *Auswirkungen auf Lebensräume und Biodiversität*. Eine qualitative Bewertung unter Berücksichtigung möglicher Minderungsmaßnahmen ist deshalb unumgänglich.
- Bei der Bewertung von Maßnahmen, bei denen das THG-Minderungsziel nicht erreicht wird, sind die Auswirkungen auf Lebensräume und Biodiversität bei Verfehlung der Klimaschutzziele gegenzurechnen.

Tabelle 32 Auswirkungen auf Lebensräume und Biodiversität

Ursache	Wirkungen	Minderungsmaßnahmen
<i>Erzeugung in Deutschland</i>		
Braunkohletagebau	Irreversible Zerstörung von Lebensräumen (bis zu ca. 200.000 ha)	Schaffung neuer Lebensräume bei Rekultivierung
Feuerungsanlagen (Kraftwerke, Transport, Haushalte)	Schädigung von Menschen, Tieren und Pflanzen durch luft- und wassergetragene	Reduktion der Emissionsfrachten durch Ersatz von Altanlagen, Vorsorge bei

Ursache	Wirkungen	Minderungsmaßnahmen
	Emissionen	Standortwahl und Anlagenkonzept
Windkraftanlagen (WKA)	Zerschneidung von Lebensräumen (Abstandsflächen bis ca. 710.000 ha) Tötung von Vögeln und Fledermäusen bei Kollision	Vorsorge bei Standortwahl und Anlagenkonzept, Abschaltung der WKA bei Vogelzug Ausgleichsmaßnahmen
Freileitungen	Zerschneidung von Lebensräumen (Abstandsflächen bis ca. 190.000 ha) Tötung von Vögeln und Fledermäusen bei Kollision	Vorsorge bei Trassenwahl Vogelschutzmaßnahmen Ausgleichsmaßnahmen
Erdkabel	Zerschneidung von Lebensräumen (Abstandsflächen bis 15.000 ha)	Vorsorge bei Trassenwahl Ausgleichsmaßnahmen
Freiflächen-PV	Flächenbelegung (bis ca. 100.000 ha), 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 (bis ca. 2.000 ha)	Vorsorge bei der Standortwahl (Auswahl von bereits anthropogen geprägten Standorten), Ausgleichsmaßnahmen
Wasserkraftwerke, Kühlwasserentnahme	Tötung von Wasserlebewesen (vermutlich >500 t pro Jahr)	Technische Optimierung bei der Wasserentnahme, Fischtreppen
Wärmeeinleitung in Oberflächengewässer	Tötung von Wasserlebewesen durch Sauerstoffentzug, Veränderung von Lebensräumen	Wärmelastpläne, Erhöhung der Sauerstoffzufuhr
CO ₂ -Transport und Speicherung	Zerschneidung von Lebensräumen durch Pipelines	Vorsorge bei der Standortwahl und Trassenführung; Ausgleichsmaßnahmen
AKW-Unfälle	potenziell weiträumige Kontamination	Vorsorge durch Ausstieg (in Deutschland umgesetzt ab 2022)
Anbaubiomasse	Intensivlandwirtschaft auf ca. 2,6 Mio. ha, Verlust von Artenvielfalt und Grünland	Anbausysteme mit Mischkulturen, Reduktion der Nährstoffeinträge durch Düngung, kein Grünlandumbruch

Erzeugung im Ausland

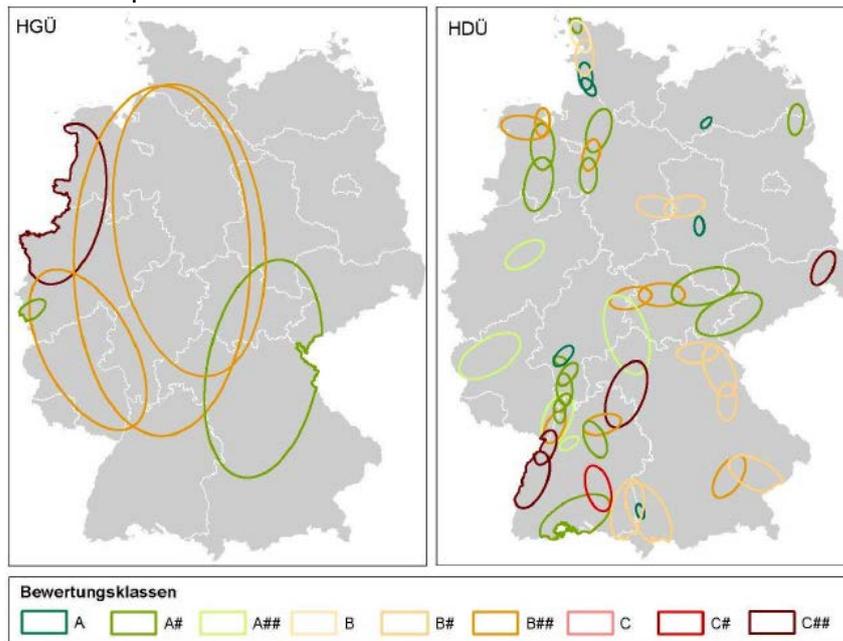
Ursache	Wirkungen	Minderungsmaßnahmen
Stromerzeugung zur Nutzung in Deutschland	Vielfältige Einwirkungen auf Lebensräume in Abhängigkeit vom Kraftwerksmix und lokalen Bedingungen im Erzeugungsland	je nach lokaler Situation
Förderung fossiler Energieträger zur Nutzung in Deutschland	Vielfältige Einwirkungen auf Lebensräume (Bergbau, Erdölförderung, Transporte)	je nach lokaler Situation
Anbaubiomasse zur Nutzung in Deutschland	Intensivlandwirtschaft auf bis zu 2,6 Mio. ha, Verlust von Artenvielfalt und Grünland	Anbausysteme mit Mischkulturen, Reduktion der Nährstoffeinträge durch Düngung, kein Grünlandumbruch

7.3 Minimierung der Auswirkungen in der Planung

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung ist nur eine grobe Betrachtung möglicher Umweltauswirkungen möglich. Auch in den strategischen Umweltprüfungen (SUP) zu einzelnen Maßnahmen, wie z.B. beim Netzausbau, ist dies ebenfalls nur eingeschränkt möglich. In den SUP-Verfahren kann lediglich festgestellt werden, welche *potenziell* schwer zu überwindenden Hindernisse bei der Umsetzung im Detail zu berücksichtigen sind. Der Ablauf der notwendigen Prüfschritte lässt sich am Beispiel des Netzausbaus erläutern. Im Bundesbedarfsplan sind nur die Anfangs- und Endpunkte der Netze bekannt. Abbildung 31 zeigt die Konfliktregionen (grün: konfliktarm, rot: konfliktreich). Im nächsten Schritt des Netzausbauverfahrens, der Bundesfachplanung, werden die Übertragungsnetzbetreiber einen 500 m bis 1.000 m breiten Trassenkorridor und Alternativen dazu vorstellen [Bundesnetzagentur 2015]. Da somit der zu untersuchende Raum eingeschränkt ist, fällt die zugehörige Strategische Umweltprüfung nun wesentlich detaillierter aus. Sie dient insbesondere auch dazu, die alternativen Korridore umweltfachlich miteinander vergleichen zu können. Am Ende der Bundesfachplanung wird dann unter Berücksichtigung der Prüfungsergebnisse ein Trassenkorridor festgelegt. In der folgenden Planfeststellung wird schließlich der konkrete Verlauf der Stromtrasse bestimmt. Bei Freileitungen wird nun über Art, Höhe und Standorte der Masten entschieden und bei Erdkabeln beispielsweise über die Standorte von Kabelübergabestationen. Da das Vorhaben zu diesem Zeitpunkt also ganz konkret wird, können auch die möglichen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt konkret untersucht werden. Das geschieht mit einer Umweltverträglichkeitsprüfung.

In vergleichbarer Weise ist eine Abschichtung der Prüfung auf Umweltverträglichkeit bei den anderen Baumaßnahmen im Zusammenhang mit der Energiewende (z.B. Windkraftanlagen, PV-Freiflächenanlagen, CO₂-Transport und Lagerung) vorzunehmen.

men. Allgemein können konkrete Gegenmaßnahmen vorgeschlagen werden. Das können beim Netzausbau Vogelschutzmarkierungen in Form von Kugeln oder Signalplatten sein, die direkt an die Hochspannungsleitung gehängt werden und das Hindernis für die Vögel sichtbar machen. Außerdem können an den Masten akustische Vogelabwehranlagen installiert werden, die Rufe von Greifvögeln und Warnschreie gefährdeter Arten abspielen.



Quelle:
Bundesnetzagentur 2012

Abbildung 31 Ergebnisse der Bewertung der Maßnahmen im Netzentwicklungsplan 2012 für Schutzgüter Tiere, Pflanzen und biologische Vielfalt

8 Unfallrisiken

Die Gewinnung und Verteilung von Energie beinhaltet viele technische Prozesse, in denen es zu Unfällen kommen kann. Die folgenden Risikoindikatoren werden betrachtet:

- Mittlere Zahl der direkten Todesfälle pro erzeugter Strommenge durch Unfälle
- Häufigkeit von Unfällen mit einer großen Zahl von Todesfällen
- Langfristige Flächenkontamination und Umsiedlung bei AKW-Unfällen
- Unfälle bei Pipelines, insbesondere für CO₂

8.1 Risiko von Todesfällen innerhalb von 30 Tagen nach einem Ereignis

Für den Indikator „direkte Todesfälle“ liegen umfassende Untersuchungen im Rahmen des EU-Projekts NEWEXT vor [NEWEXT 2004]. Dabei wurden die direkten Todesfälle aus der Stromerzeugung inkl. der Brennstoffvorkette in OECD- und Nicht-OECD-Ländern bestimmt. Für die Importanteile werden in dieser Studie die Nicht-OECD-Länder anteilmäßig berücksichtigt. Für den Verbrauch fossiler Energieträger außerhalb der Stromerzeugung wurden die Werte anhand mittlerer Kraftwerkswirkungsgrade umgerechnet.⁷ Das Todesfallrisiko bei der Erzeugung von Biomasse in Deutschland kann zuverlässig auf Basis der Gesundheitsberichterstattung⁸ des Bundes abgeleitet werden, wonach im Jahr 2012 insgesamt 71 Todesfälle durch äußere Ursachen (ohne Selbsttötungen) berichtet wurden. Zur energetischen Nutzung wurden im gleichen Jahr ca. 2 Mio. ha der 16,7 Mio. landwirtschaftlichen Nutzfläche verwendet. Somit entfielen im Jahr 2010 statistisch 8,6 Todesfälle auf die inländische Erzeugung von Biomasse zur energetischen Nutzung.

Unglücksfälle kommen auch bei Windkraftanlagen vor, doch da sie meist fernab von Siedlungen stehen, kommt es, abgesehen von Arbeitsunfällen bei der Montage und Wartung, meist nicht zu Personenschäden. Neben Blitzschlägen und defekten Rotor-

⁷ Annahme: Kohle 35%, Erdöl 40%, Erdgas 50%, Geothermie 50%

⁸ http://www.gbe-bund.de/oowa921-install/servlet/oowa/aw92/WS0100/_XWD_PROC?_XWD_646/3/XWD_CUBE.DRILL/_XWD_674/D.046/34959 (Zugriff am 10.07.2014)

blättern sind Turmberührungen bei extremen Böen Gründe für Unfälle. Auch bei PV-Anlagen geschehen Unfälle bei Installation und Wartung. Die statistisch anzusetzenden Todesfälle pro TWh betragen 0,05 bei PV-Anlagen und 0,017 bei Windkraftanlagen.⁹ Für die Forstwirtschaft wurden im Jahr 2010 54,4 Mio. Festmeter (Fm) Holz eingeschlagen¹⁰; im langjährigen Mittel wurden 3,2 tödliche Unfälle registriert¹¹. Die energetische Nutzung von Holz in Deutschland betrug 68,4 Mio. Fm, darin sind Importe enthalten. Wenn man für die gesamte energetisch genutzte Holzmenge das inländische Unfallrisiko ansetzt, sind für das Jahr 2010 3,5 Todesfälle anzurechnen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 33 zusammengestellt.

Tabelle 33 Direkte Todesfälle (Sterblichkeit 30 Tage nach Unfall) durch Energieverbrauch im Deutschland 2010

Prozess	Risiko tödlicher Unfälle	Energieverbrauch 2010	Tödliche Unfälle 2010
Kernkraftwerke	0 GW _{ei} a ⁻¹	17 GW _{ei} a	0
Kohleverbrauch	0,0017 PJ ⁻¹	2851 PJ	4,8
Erdölverbrauch	0,005 PJ ⁻¹	3.468 PJ	17
Erdgasverbrauch	0,0014 PJ ⁻¹	3.333 PJ	4,7
Wasserkraft	0,003 GW _{ei} a ⁻¹	17 TWh	0,1
Anbaubiomasse (energetisch)	4,3 (Mio. ha*a) ⁻¹	4,7 Mio. ha ^{a)}	20,3
Holz	0,059 Mio. Fm ⁻¹	68,4 Mio. Fm	4,0
Photovoltaik	0,05 GWa ⁻¹	12 TWh	0,1
Windkraft	0,017 GWa ⁻¹	38 TWh	0,07
Summe			51

a) nur Deutschland

Danach hat der Energieverbrauch in Deutschland des Jahres 2010 weltweit etwa 51 tödliche Unfälle verursacht. Der größte Einzelbeitrag entfällt dabei auf den Erdölverbrauch durch Unfälle in der Erdölgewinnung und Transport. Die Ergebnisse im Vergleich der Szenarien zeigen Abbildung 32 und Abbildung 33. Im Zuge der Energiewende verringert sich das Risiko von Todesfällen durch die Energieerzeugung absolut und wird durch die Nutzung von Anbaubiomasse dominiert.

⁹ <http://nextbigfuture.com/2008/03/deaths-per-twh-for-all-energy-sources.html>

¹⁰ <http://www.wald.de/holzeinschlag-deutschland-2011/> (10.07.2014)

¹¹ <http://www.kwf-online.org/mensch-und-arbeit/arbeitsschutz/unfallstatistik/2010.html>; (10.07.2014), der Mittelwert über die 5 Jahre von 2007 bis 2011 betrug 3,2.

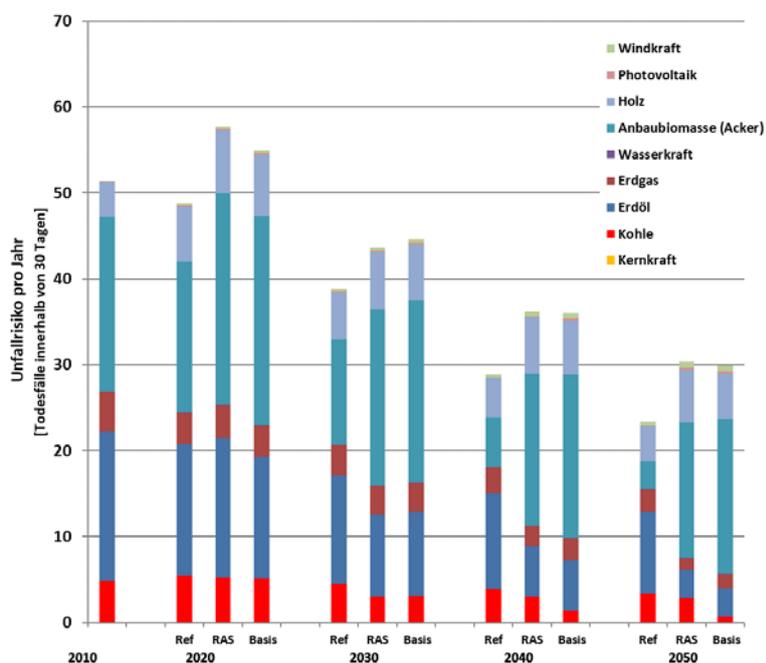


Abbildung 32 Todesfallrisiko durch Energieverbrauch in Deutschland, 2010 bis 2050 im Vergleich der Szenarien *Ref*, *RAS* und *Basis*

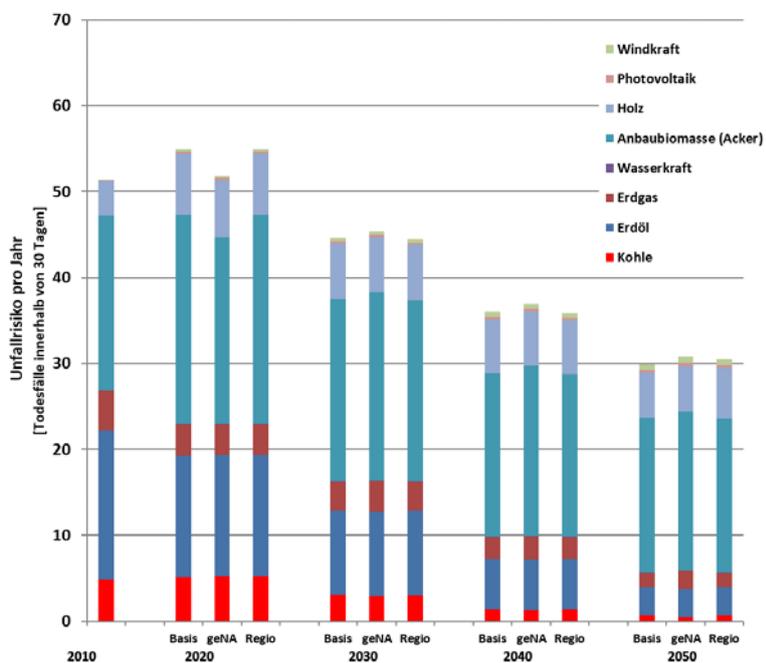


Abbildung 33 Todesfallrisiko durch Energieverbrauch in Deutschland, 2010 bis 2050 im Vergleich der Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*

8.2 Risiko von Unfällen mit einer großen Zahl von Todesfällen

Neben dem mittleren Todesfallrisiko ist das Risiko von Unfällen mit einer großen Zahl von Todesfällen, insbesondere bei der Atomenergie, von großer Bedeutung für die Bewertung. Die Häufigkeitsverteilung für verschiedene Energieträger ist in Abbildung 34 dargestellt. Dabei wurde für fossile Energieträger und Wasserkraft die Auswertung aus [NewExt 2004] und für OECD-Länder (1969-2000) aus statistischen Erhebungen für unmittelbare Todesfälle bei den im Betrachtungszeitraum aufgetretenen Unfällen zugrunde gelegt. Für Atomkraftwerke können die notwendigen Informationen aus probabilistischen Sicherheitsanalysen (engl.: probabilistic safety analysis (PSA)) abgeleitet werden. In Abbildung 34 werden hierzu zwei Ergebnisse präsentiert: die PSA zum AKW Mühleberg in der Schweiz sowie in rot die Ergebnisse der Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke aus dem Jahr 1981 [GRS 1981]. In der PSA für das AKW Mühleberg (373 MW_{el}) aus dem Jahr 1991 wird ein deutlich kleineres Risiko errechnet als in der deutschen Risikostudie [GRS, 1981] aus dem Jahr 1981 für Reaktoren der 1,3 GW_{el}-Klasse. Aus [GRS, 1981] lassen sich für eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 1×10^{-7} pro GW_{el}a ca. 70.000 späte Todesfälle ableiten, die maximale Zahl der späten Todesfälle der betrachteten Unfallfolgeszenarien wurde in der GRS-Studie mit 107.800 errechnet.

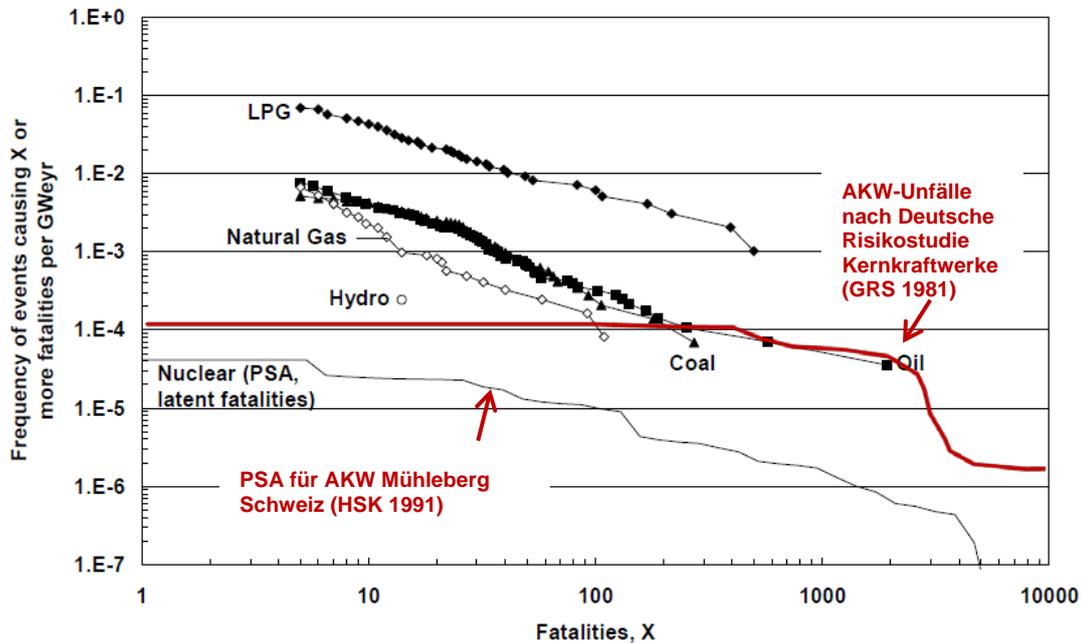


Abbildung 34 Risiko von Unfällen mit einer großen Zahl von Todesfällen

Die Ergebnisse illustrieren, dass im Vergleich mit anderen Energieträgern die nukleare Energieerzeugung mit dem Risiko der größten Zahl an Todesfällen durch Unfälle verbunden ist. Bei der Bewertung ist zu beachten, dass die Sicherheitsanforderungen für deutsche AKWs seit 1981 zunehmend verschärft wurden und neuere probabilistische Sicherheitsanalysen die Eintrittswahrscheinlichkeit schwerer Unfälle niedriger einschätzen als in der „Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke“ angegeben. In keiner der neueren Untersuchungen für Deutschland wurden jedoch detaillierte Unfallfolgenberechnungen vorgelegt. Eine Aktualisierung der rechnerisch ermittelten Eintrittswahrscheinlichkeit der Schadensereignisse auf Grundlage vorhandener Studien ist deshalb nicht möglich. Das Risiko durch fossile Energieträger ist erwartungsgemäß bei Öl und Kohle am höchsten. Durch den weitgehenden Umstieg auf erneuerbare Energieträger im Rahmen der Energiewende wird das Risiko von Unfällen durch Energieerzeugung mit einer großen Zahl von Todesfällen weitgehend reduziert.

8.3 Risiko des Verlustes der Nutzbarkeit großer Landflächen

Ein weiteres wichtiges Kriterium in der Bewertung von Energieträgern ist die Gefahr des Verlustes der Nutzung großer Landflächen aufgrund langfristiger Kontamination. Dies wurde als Konsequenz der Unfälle in den AKW Tschernobyl (1986) und Fukushima (2011) deutlich. In Tschernobyl wurden 91.200 Personen umgesiedelt und 260.000

ha Fläche als nicht bewohnbar deklariert. In der dichter besiedelten Region um Fukushima ist derzeit eine Fläche von 44.000 ha nicht ganztäglich bewohnbar und es wurden insgesamt 200.000 Personen zur Vermeidung von Strahlenexposition umgesiedelt. Für Deutschland datiert die letzte umfangreiche Untersuchung der Folgen möglicher AKW-Unfälle aus dem Jahre 1981. In der „Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke“ [GRS 1981] wurden die Folgen von schweren Unfällen für 25 Reaktoren des Typs Biblis A an 19 Standorten ermittelt. Die Berechnungen basierten auf 115 repräsentativen Wetterläufen und berücksichtigen 8 verschiedene Unfalltypen (Freisetzungskategorien). Als Maximalfall wurden 3,2 Millionen umzusiedelnde Personen und 380.000 ha nicht bewohnbare Flächen ermittelt (siehe Tabelle 34). In der Studie wurde impliziert, dass weitere Flächen entweder zu dekontaminieren oder nur eingeschränkt nutzbar seien (z.B. durch Verzehrverbote bestimmter Lebensmittel). Der Studie sind hierzu jedoch keine Angaben über Flächengrößen zu entnehmen.

Tabelle 34 Umgesiedelte Personen und als nicht bewohnbar deklarierte Flächen bei schweren AKW-Unfällen

Ort	Umgesiedelte Personen	Als nicht bewohnbar deklarierte Flächen [ha]
Tschernobyl	91.200 ¹²	260.000 ¹²
Fukushima	200.000 ¹³	44.000 ¹⁴
Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke, maximaler Rechenfall [GRS 1981]	3.200.000	380.000

Angaben zur Eintrittswahrscheinlichkeit für die langfristige Umsiedelung von Menschen und als unbewohnbar deklarierter Flächen sind Tabelle 35 und Tabelle 36 zu entnehmen. In [GRS 1981] wurde das Risiko einer langfristigen Flächenkontamination von 100.000 ha bei AKWs über die Betriebszeit von 40 Jahren mit ca. 1 : 2.500 abgeschätzt, das Risiko einer Umsiedlung von 100.000 Menschen beträgt ca. 1 : 1.300. Durch den Atomausstieg wird das Risiko einer langfristigen Flächenkontamination und der bei einem schweren AKW-Unfall notwendigen Umsiedlung großer Teile der Bevöl-

¹² http://en.wikipedia.org/wiki/Chernobyl_Exclusion_Zone; (07.08.2014)

¹³ http://en.wikipedia.org/wiki/Japanese_reaction_to_Fukushima_Daiichi_nuclear_disaster

¹⁴ <http://www.psr.org/environment-and-health/environmental-health-policy-institute/responses/costs-and-consequences-of-fukushima.html>

kerung vermieden. Vergleichbare Risiken gibt es bei anderen Arten der Energieerzeugung nicht.

Tabelle 35 Risiko der langfristigen Flächenkontamination bei 40 Jahre Betrieb von 25 AKW mit je 1,3 GW_{el} [GRS 1981]

Nicht bewohnbare Fläche [ha]	Risiko pro Jahr	Risiko über 40 Jahre Betrieb
1.000	2*10 ⁻⁴	1 : 125
10.000	4*10 ⁻⁵	1 : 625
100.000	1*10 ⁻⁵	1 : 2.500
300.000	1*10 ⁻⁶	1 : 25.000

Tabelle 36 Risiko der Umsiedlung von Personen bei 40 Jahre Betrieb von 25 AKW mit je 1,3 GW_e [GRS 1981]

Umzusiedelnde Personen	Risiko pro Jahr	Risiko über 40 Jahre Betrieb
100	2*10 ⁻³	1 : 16
1.000	8*10 ⁻⁴	1 : 31
10.000	9*10 ⁻⁵	1 : 280
100.000	2*10 ⁻⁵	1 : 1.300
1.000.000	1*10 ⁻⁶	1 : 25.000

8.4 Risiko durch Transport und Lagerung von CO₂

Transport

Zum Transport von CO₂ gibt es weltweit seit Jahrzehnten umfangreiche Erfahrungen. Die meisten CO₂-Pipelines bestehen in Nordamerika zur Verbesserung der Ölgewinnung (engl.: Enhanced Oil Recovery (EOR)). In den USA besteht ein Netz von mehr als 2.500 km Länge, weltweit etwa 3.100 km mit einer derzeitigen Transportkapazität von 44 Millionen t CO₂ pro Jahr [Serpa et al. 2011]. In Europa sind Netze im Aufbau, so in der Nordsee (160 km für das Snøhvit LNG Projekt) und in den Niederlanden mit ca. 80 km Pipeline zum CO₂-Transport von Rotterdam zu Gewächshäusern in der Nähe von Amsterdam.

CO₂-Pipelines werden in der gleichen Weise wie Erdgas- und Ölpipelines konstruiert. Im Versagensfall gibt es bei Erdgas und Öl das Explosionsrisiko, beim Austritt von CO₂ aus Pipelines besteht das Risiko der Erstickung bei der Akkumulation des Gases in Senken. Zuverlässige Statistiken gibt es aus dem jahrzehntelangen Betrieb von Erd-

gaspipelines in den USA. In den Jahren 1992 bis 2011 gab es dort im 510.000 km langen Leitungsnetz insgesamt 1.845 berichtete Störfälle¹⁵ mit 45 Todesfällen [Furchtgott-Roth 2013]. Im gleichen Zeitraum wurden 2.644 Störfälle mit 298 Todesfällen im Verteilnetz berichtet, das waren überwiegend Gasexplosionen in Häusern. Das statistische Störfallrisiko aus dem Erdgastransport beträgt 0,62 pro Mrd. tkm, das Todesfallrisiko ca. 0,015 pro Mrd. tkm.

Wie hoch ist nun das Risiko durch den CO₂-Transport über Pipelines in Deutschland, falls in größerem Maße CCS angewandt wird? Der Maximalfall stellt in dieser Studie das *Restriktionsarme Szenario* dar, da in diesem CO₂ sowohl aus der Industrie als auch aus dem Umwandlungssektor transportiert und verpresst wird. Dabei wären in Deutschland im Jahr 2050 169 Mio. t CO₂ zu transportieren; im *Basisszenario* wären es 37 Mio. t CO₂, die ausschließlich aus der Industrie stammen. Unterstellt man den Pipelinetransport dieser Menge an Land, über ca. 500 km bis zur Nordsee und das gleiche Störfall- und Todesfallrisiko pro tkm wie beim Erdgastransport, so wären pro Jahr 32 Störfälle mit 1,3 Todesfällen (*RAS*) bzw. 7 Störfälle mit 0,3 Todesfällen (*Basis*) zu erwarten. Es ist allerdings davon auszugehen, dass CO₂ durch seine Nichtentflammbarkeit im Fall von Unfällen deutlich weniger Verletzungs- und Todesfallrisiko birgt als Erdgas.

Das Risiko durch den Transport von CO₂ in Pipelines (*RAS*: 85 Mrd. tkm; *Basis*: 19 Mrd. tkm) sollte ins Verhältnis zum Risiko durch den Transport von Erdöl, Erdgas, Biogas, Bio-Erdgas und synthetischem Erdgas gesehen werden. Im Jahr 2010 lag der Transportaufwand für das in Deutschland verbrauchte Erdgas bei ca. 175 Mrd. tkm.¹⁶ Beim Ausbau von CCS und gleichzeitigem Rückgang des Erdgasverbrauchs wird die durch Pipelines transportierte Menge an Gasen nicht signifikant geändert, aber weitgehend auf das Gebiet Deutschlands verlagert.

¹⁵ Dazu zählen (1) Explosion oder Feuer, (2) mehr als 18 l freigesetzte Flüssigkeit oder CO₂, (3) Todesfall, (4) Verletzung mit stationärer Behandlung, (5) Sachschaden größer \$50.000.

¹⁶ Verbrauch 2010: 933 Mrd kWh; Energiedichte Erdgas 15,42 kWh/kg. Im gewichteten Mittel der Transporte (ca. 41% Russland, 37% Norwegen und 22% Niederlande) werden 2.900 km angenommen.

Leckage

Nach IPCC [2007] liegt die jährliche CO₂-Leckage für gut gewählte und gemanagte Lagerstätten sehr wahrscheinlich unter 0,01% (p= 90% bis 99%) und wahrscheinlich sogar unter 0,001% (p= 66% bis 90%).

Im *Restriktionsarmen Szenario* werden bis 2050 kumulativ 2,9 Mrd. t CO₂ eingespeichert; im *Basisszenario* sind es 0,5 Mrd. t CO₂. Unterstellt man für 2050 bis 2100 eine Stabilisierung der CCS-Einspeicherung, so würden bei einer Leckage von 0,01% pro Jahr, im Jahr 2100 im Szenario *RAS* ca. 1,1 Mio. t CO₂ freigesetzt; im *Basisszenario* sind es 0,2 Mio. t CO₂. Zur Illustration ist in Abbildung 35 auch die Auswirkung einer wahrscheinlichen Leckage von 0,001% pro Jahr dargestellt (Szenario *RAS* ca. 0,11 Mio. t CO₂ pro Jahr; Szenario *Basis* ca. 0,02 Mio. t CO₂ pro Jahr). Gemessen an den Zielemissionen für 2050 von ca. 160 Mio. t CO₂-äq. pro Jahr, sind dies vergleichsweise geringe Mengen. Für die Realisierung der CCS-Option sollte eine niedrigere Leckage (< 0,001% pro Jahr) sichergestellt sein.

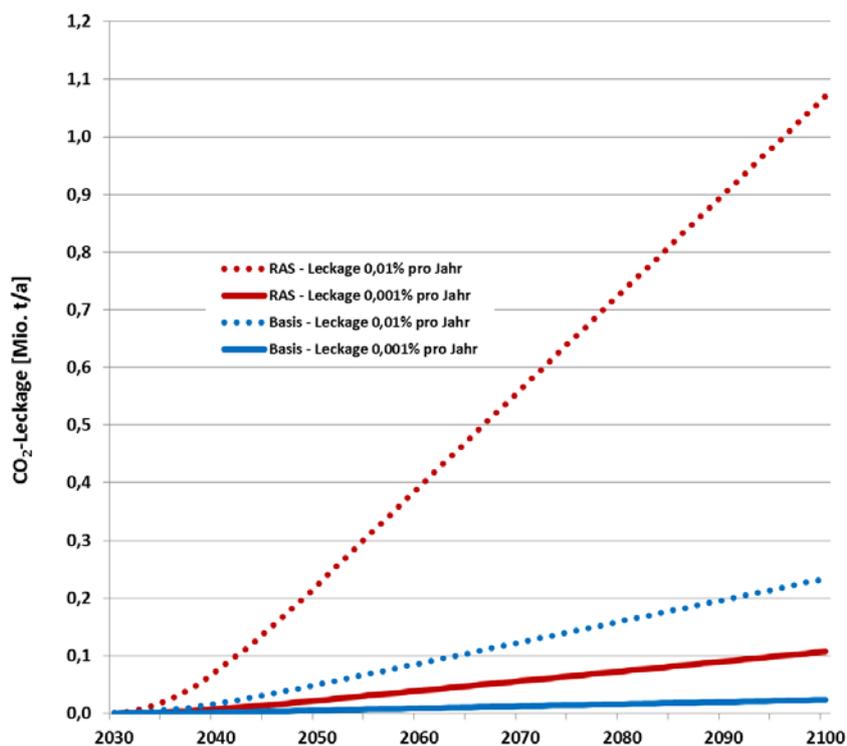


Abbildung 35 CO₂-Leckage pro Jahr

9 Auswirkungen auf das Landschaftsbild

Als Indikatoren für die Auswirkungen auf das Landschaftsbild wurden ausgewählt:

- Anzahl der Windkraftanlagen und ihre räumliche Verteilung
- Installierte Leistung der Windkraftanlagen und räumliche Verteilung
- Installierte Leistung und räumliche Verteilung von Freiflächen-PV-Anlagen
- Installierte Leistung und räumliche Verteilung von Dachflächen-PV-Anlagen
- Trassen-km der oberirdischen Netze und ihre Verteilung
- Stromkreis-km der oberirdischen Netze (durch Zunahme bedingt größere Masten)
- Betriebsflächen für den Braunkohleabbau
- Durch Braunkohleabbau überformte Flächen

Die Zahlenwerte für die Szenarien sind in Tabelle 37 (*Ref*, *RAS* und *Basis*) und Tabelle 38 (*Basis*, *geNA* und *Regio*) zusammengestellt. Ein direkter Vergleich ist aufgrund unterschiedlicher geographischer Lagen, der Sichtbarkeit und der subjektiv unterschiedlich geprägten Wirkung schwierig.

Die räumliche Verteilung der Windkraftanlagen für den Bestand, abgeleitet aus dem EE-Anlagenregister mit Stand Ende 2012, und den Zustand im Jahr 2050 für die Szenarien zeigen Abbildung 36 und Abbildung 37. Die räumliche Verteilung der Freiflächen-PV zeigen Abbildung 38 und Abbildung 39, die Verteilung von Dachflächen-PV Abbildung 40 und Abbildung 41.

Die Summe der installierten Kapazitäten von PV-Aufdach, PV-Freifläche und Windkraft an Land in den sechs Modellregionen im Jahr 2050 im Vergleich zum Jahr 2012 zeigen Abbildung 42 und Abbildung 43.

Tabelle 37 Auswirkungen auf das Landschaftsbild in Deutschland im Vergleich der Szenarien *Ref*, *RAS* und *Basis*

Kriterium	Indikator	2010	2020			2030		
			Ref	RAS	Basis	Ref	RAS	Basis
Zahl der Windkraftanlagen an Land	Zahl der Anlagen	21.000	19.000	18.000	21.000	11.000	15.000	14.000
Leistung der Windkraftanlagen an Land	Installierte Leistung, GW	27	39	35	42	31	41	38
Dachflächen für PV und Solarthermie	Nutzung von Dachflächen in %	3,1%	6,7%	6,7%	8,3%	6,7%	8,2%	8,1%
Fläche für Freiland-PV-Anlagen	ha Freiland-PV	8.600	24.000	24.000	33.000	24.000	24.000	33.000
Oberirdische Hochspannungstrassen	Trassen-km Hochspannung	24.000	25.000	25.000	24.000	26.000	26.000	24.000
Braunkohle Betriebsflächen	ha Betriebsflächen	53.000	54.000	51.000	55.000	47.000	33.000	39.000
Braunkohlentagebau, umgenutzte Flächen	ha Flächen nach Umnutzung	120.000	130.000	130.000	130.000	140.000	150.000	150.000
Kriterium	Indikator	2010	2040			2050		
Zahl der Windkraftanlagen an Land	Zahl der Anlagen	21.000	12.000	25.000	23.000	18.000	34.000	25.000
Leistung der Windkraftanlagen an Land	Installierte Leistung, GW	27	36	75	70	53	100	75
Dachflächen für PV und Solarthermie	Nutzung von Dachflächen in %	3,1%	2,5%	2,0%	7,8%	0,0%	0,9%	7,5%
Fläche für Freiland-PV-Anlagen	ha Freiland-PV	8.600	5.400	45.000	33.000	39.000	120.000	76.000
Oberirdische Hochspannungstrassen	Trassen-km Hochspannung	24.000	26.000	27.000	23.000	26.000	27.000	22.000
Braunkohle Betriebsflächen	ha Betriebsflächen	53.000	43.000	36.000	17.000	40.000	45.000	3.700
Braunkohlentagebau, umgenutzte Flächen	ha Flächen nach Umnutzung	120.000	150.000	150.000	170.000	160.000	150.000	190.000

Tabelle 38 Auswirkungen auf das Landschaftsbild in Deutschland im Vergleich der Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*

Kriterium	Indikator	2010	2020			2030		
			Basis	geNA	Regio	Basis	geNA	Regio
Windkraftanlagen an Land	Zahl der Anlagen	21.000	21.000	21.000	12.000	14.000	12.000	22.000
Windkraftanlagen an Land	Installierte Leistung, GW	27	42	42	33	38	33	65
Dachflächen für PV und Solarthermie	Nutzung von Dachflächen in %	3,1%	8,3%	8,3%	8,3%	8,1%	8,1%	8,1%
Fläche für Freiland-PV-Anlagen	ha Freiland-PV	8.600	33.000	33.000	33.000	33.000	33.000	33.000
Oberirdische Hochspannungstrassen	Trassen-km Hochspannung	74.000	75.000	75.000	74.000	76.000	76.000	74.000
Braunkohle Betriebsflächen	ha Betriebsflächen	53.000	55.000	51.000	51.000	39.000	33.000	33.000
Braunkohlentagebau, umgenutzte Flächen	ha Flächen nach Umnutzung	120.000	130.000	130.000	130.000	150.000	150.000	150.000
Kriterium	Indikator	2010	2040			2050		
			Basis	geNA	Regio	Basis	geNA	Regio
Windkraftanlagen an Land	Zahl der Anlagen	21.000	23.000	22.000	33.000	25.000	33.000	27.000
Windkraftanlagen an Land	Installierte Leistung, GW	27	70	65	100	75	100	82
Dachflächen für PV und Solarthermie	Nutzung von Dachflächen in %	3,1%	7,8%	7,8%	7,8%	0,0%	7,5%	7,5%
Fläche für Freiland-PV-Anlagen	ha Freiland-PV	8.600	33.000	77.000	33.000	76.000	120.000	76.000
Oberirdische Hochspannungstrassen	Trassen-km Hochspannung	74.000	76.000	77.000	73.000	76.000	77.000	72.000
Braunkohle Betriebsflächen	ha Betriebsflächen	53.000	17.000	16.000	17.000	3.700	2.800	3.700
Braunkohlentagebau, umgenutzte Flächen	ha Flächen nach Umnutzung	120.000	170.000	170.000	170.000	190.000	190.000	180.000

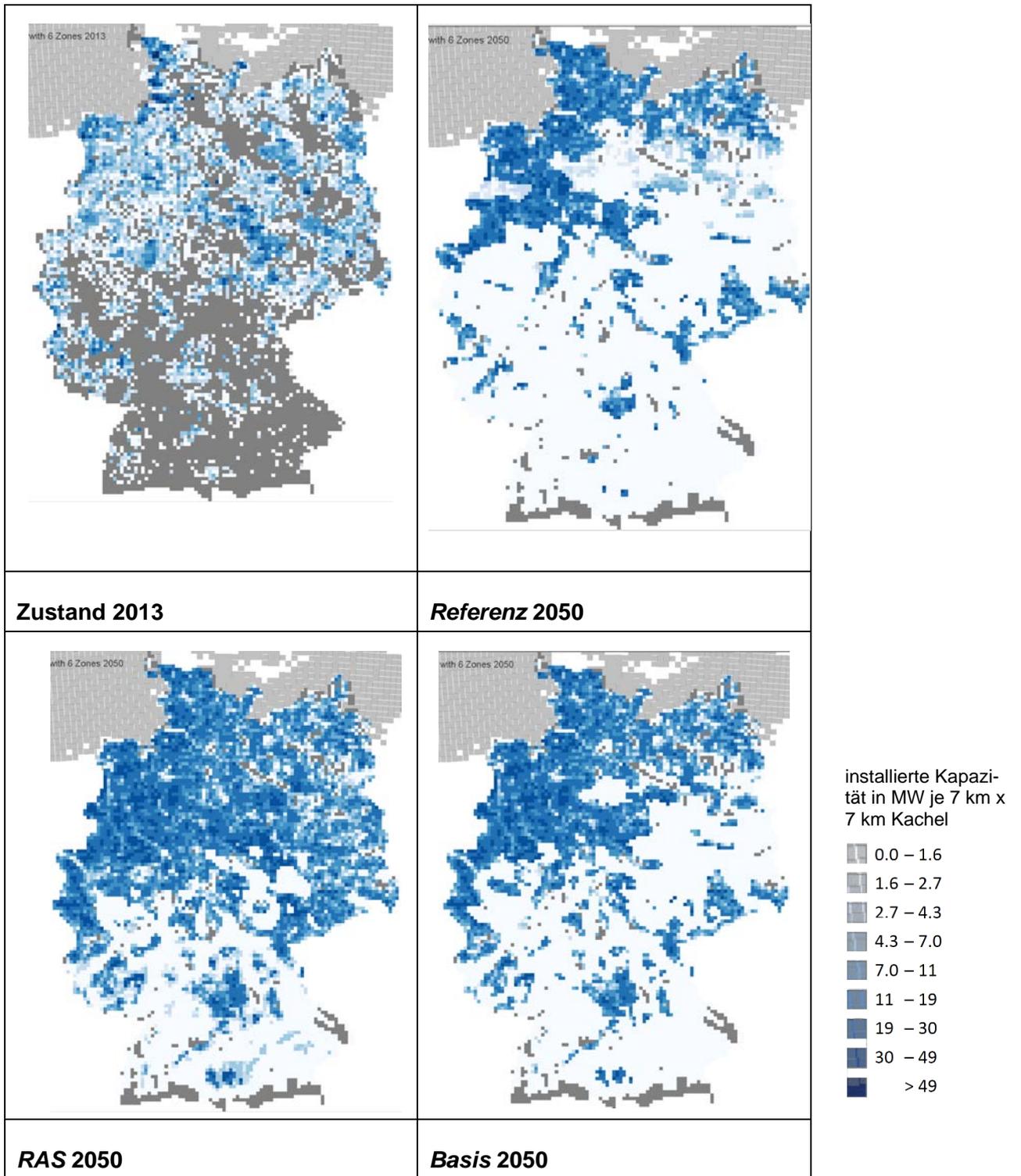


Abbildung 36 Windkraftanlagen, installierte Kapazität im Vergleich der Szenarien Ref, RAS und Basis

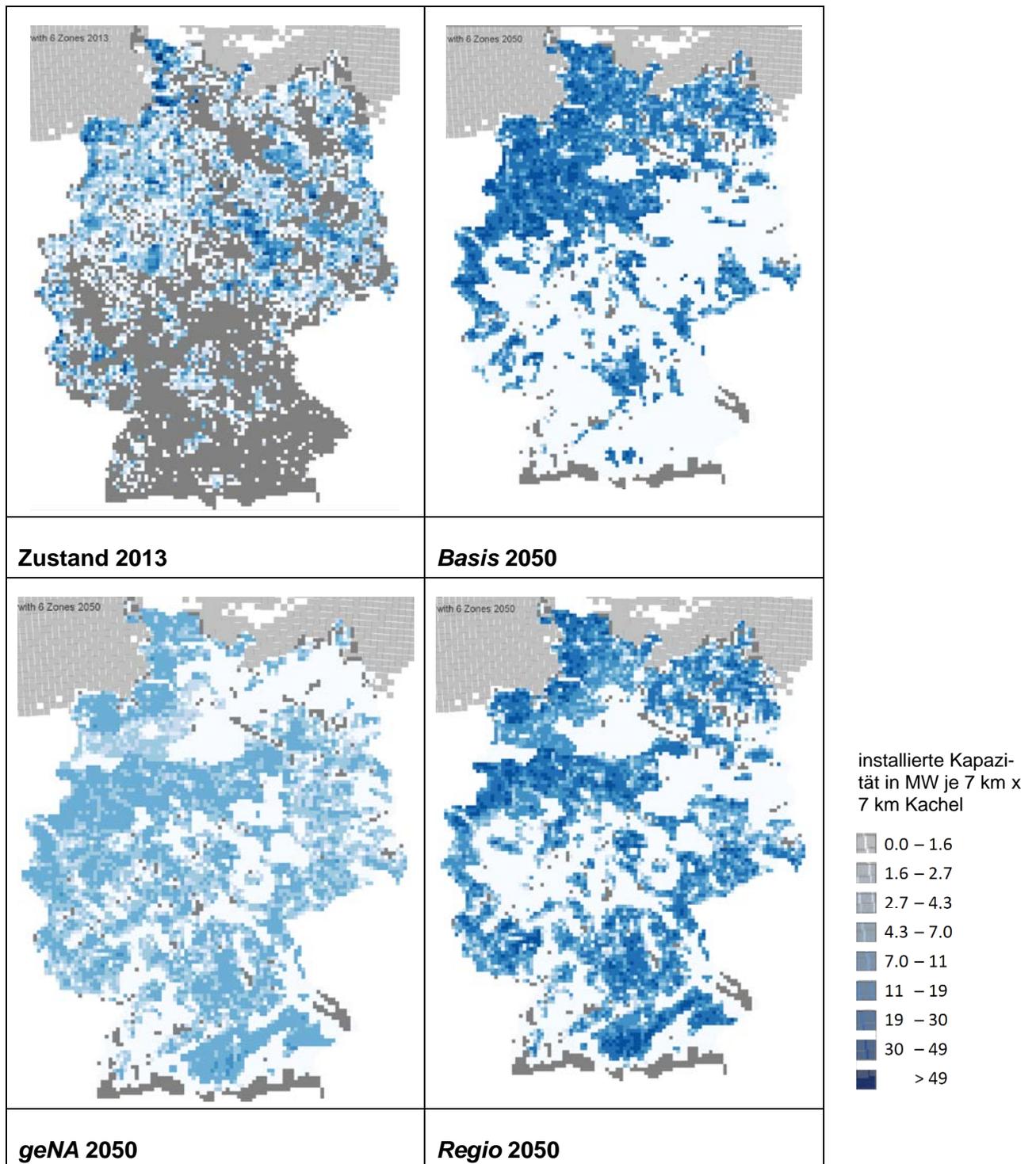


Abbildung 37 Windkraftanlagen, installierte Kapazität im Vergleich der Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*

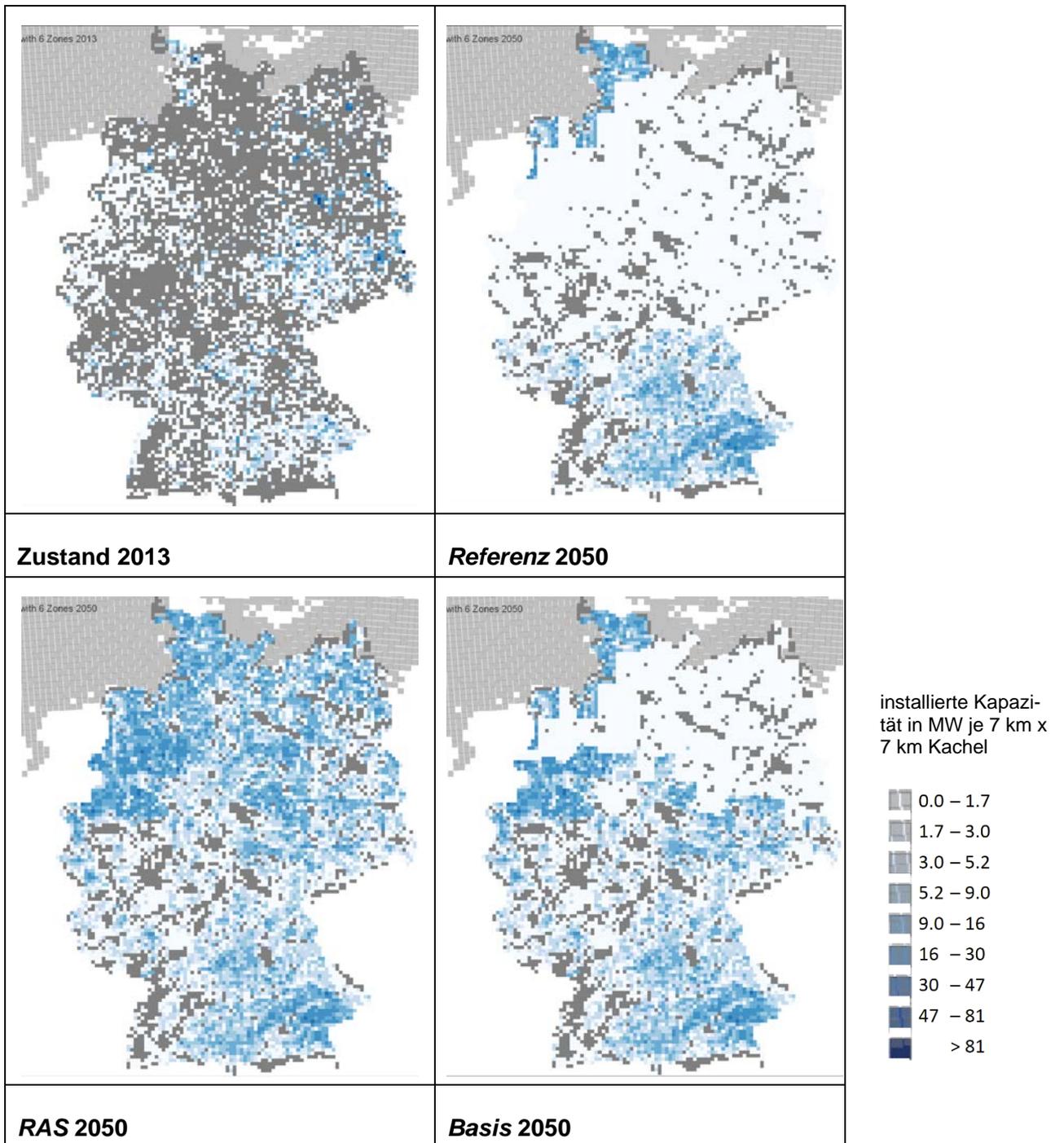


Abbildung 38 PV-Freiflächenanlagen, installierte Kapazität im Vergleich der Szenarien *Ref*, *RAS* und *Basis*

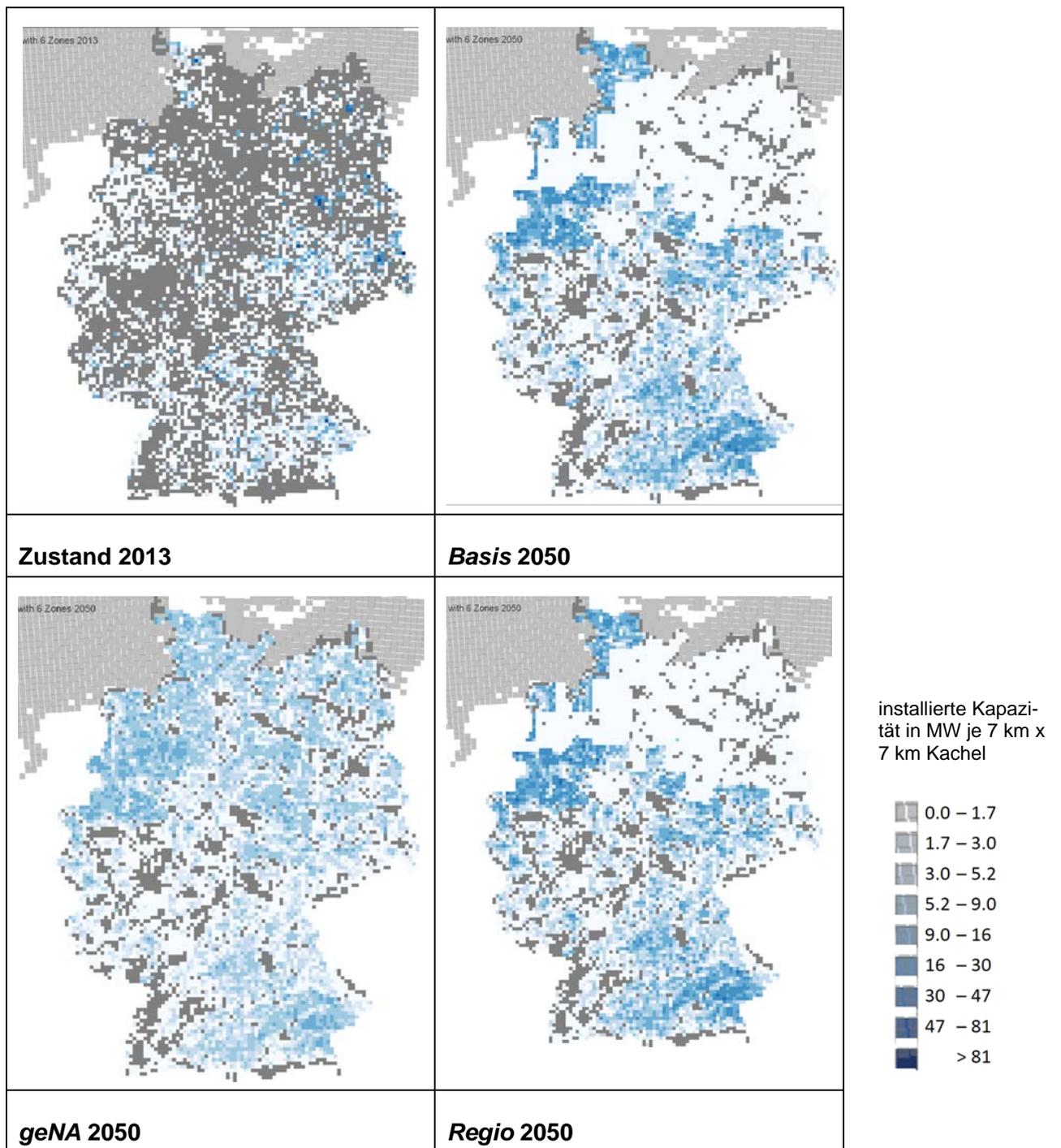


Abbildung 39 PV-Freiflächenanlagen, installierte Kapazität im Vergleich der Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*

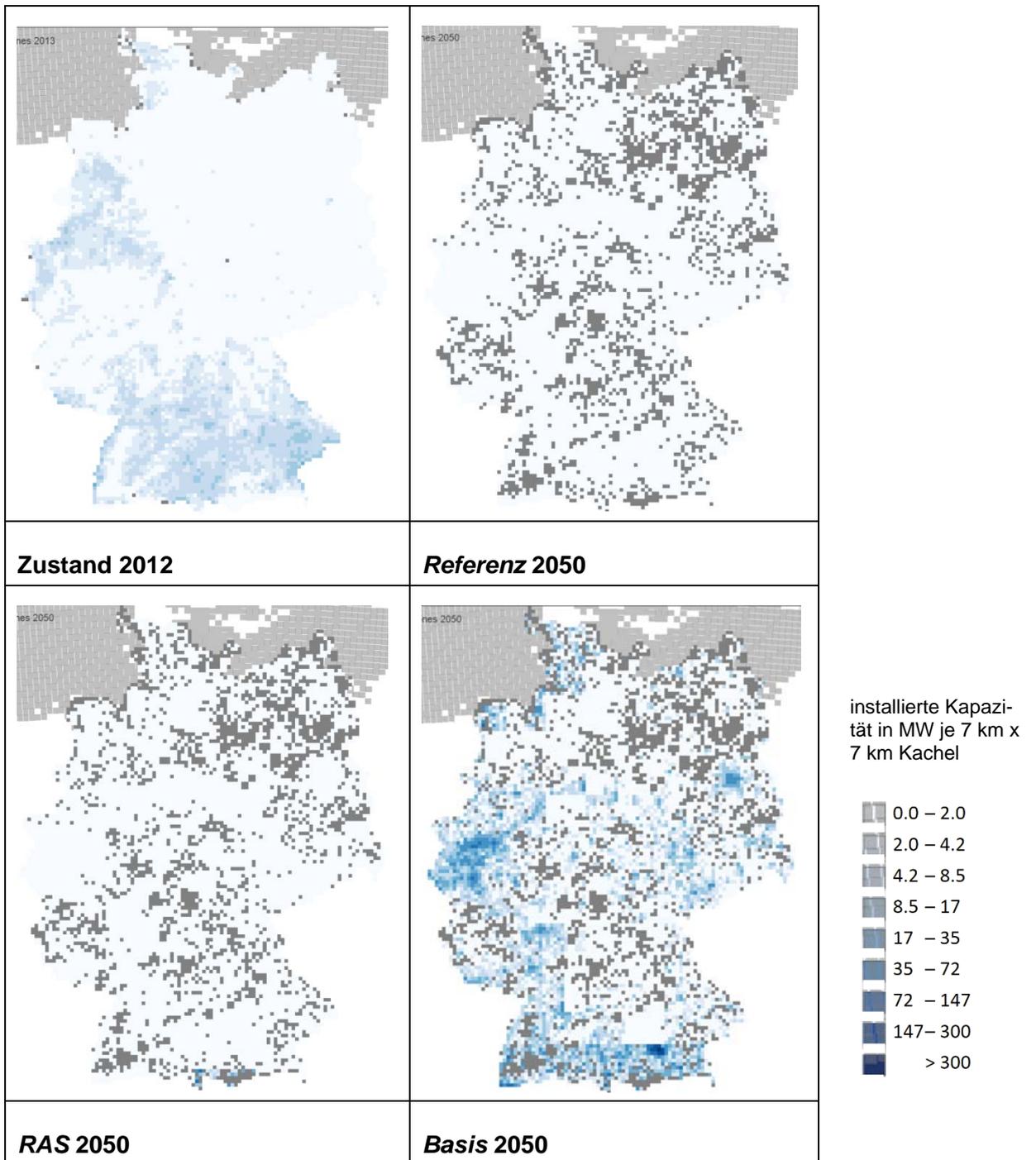


Abbildung 40 PV-Aufdachanlagen im Vergleich der Szenarien *Ref*, *RAS* und *Basis*

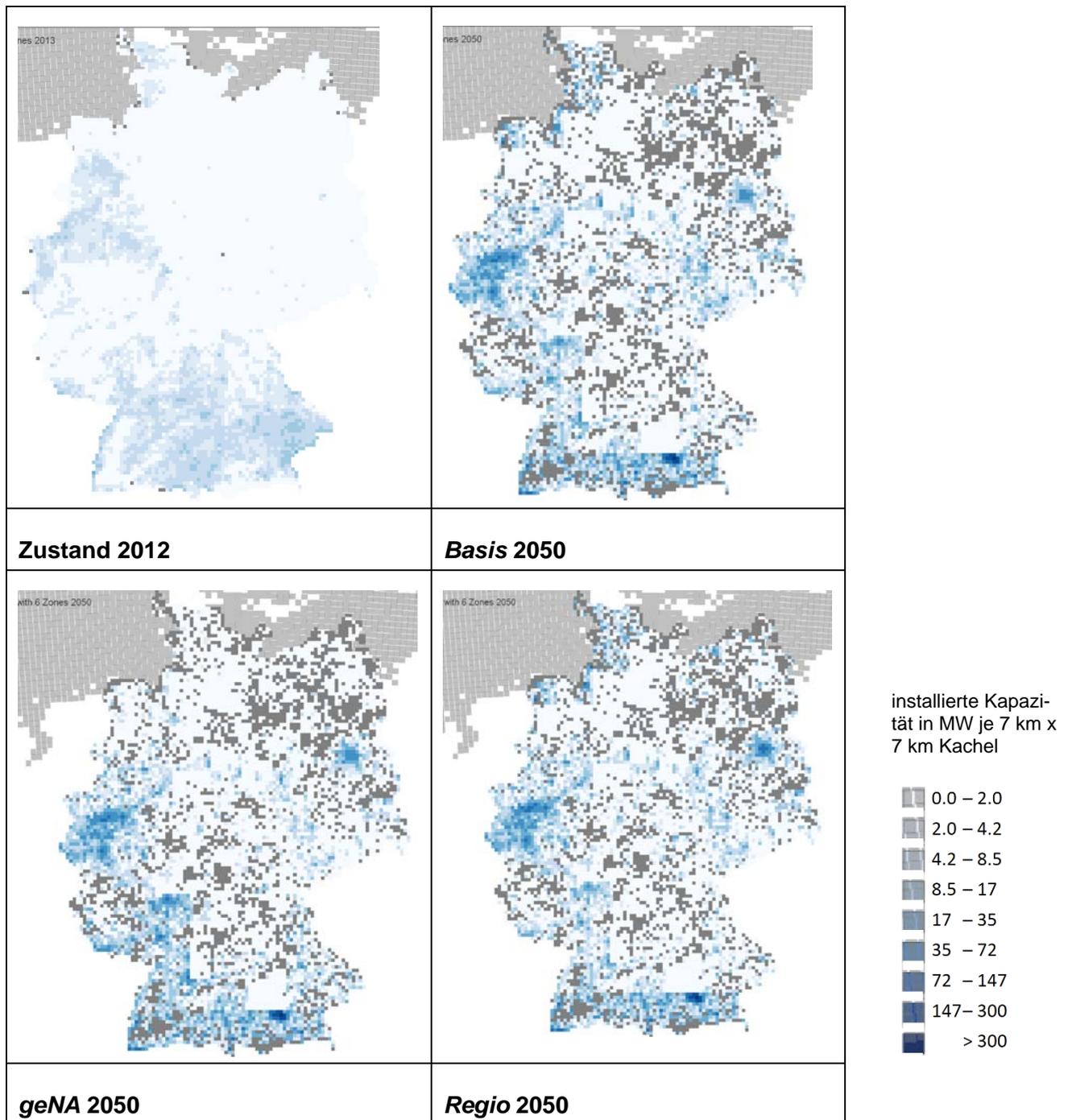


Abbildung 41 PV-Aufdachanlagen im Vergleich der Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*

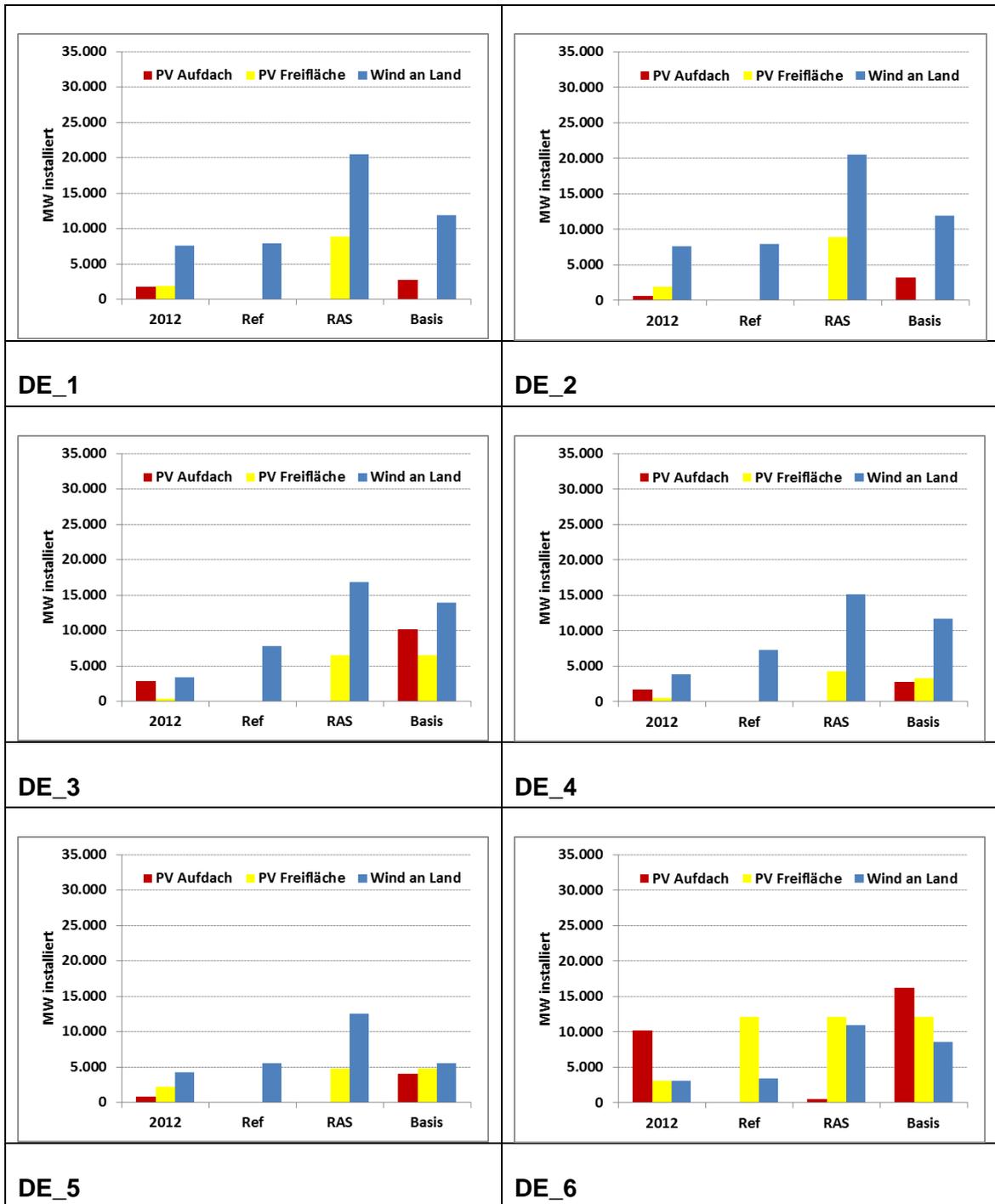


Abbildung 42

Installierte Kapazität [MW] für PV-Aufdach, PV-Freifläche und Windkraft an Land in den 6 Modellierungs-Regionen; Ist-Zustand 2012 und Ausbau 2050 bei den Szenarien *Ref*, *RAS* und *Basis*

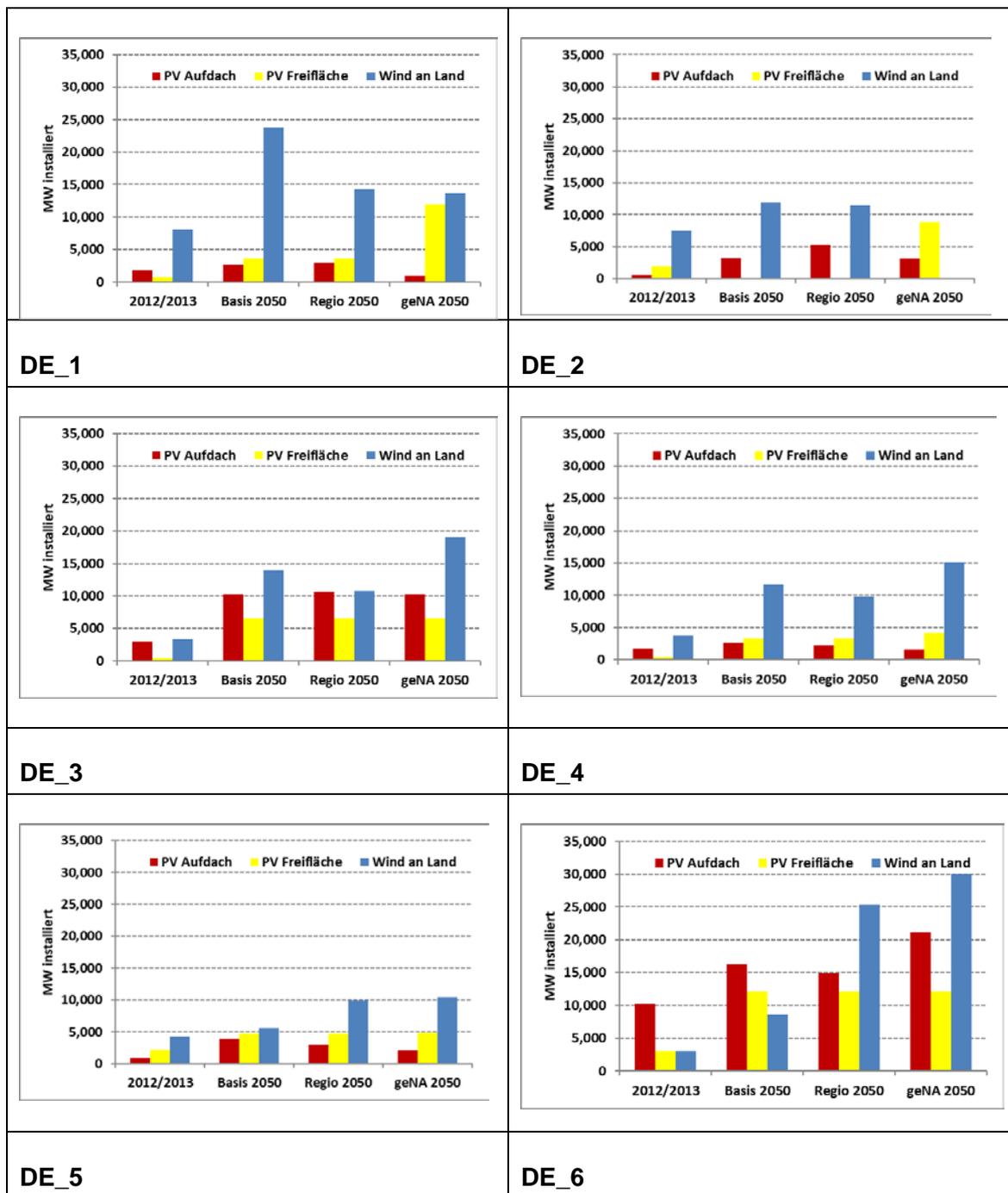


Abbildung 43 Installierte Kapazität [MW] für PV-Aufdach, PV-Freifläche und Windkraft an Land in den 6 Modellierungs-Regionen; Ist-Zustand 2012 und Ausbau 2050 bei den Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*

9.1 Landschaftsveränderung durch den Ausbau des Übertragungsnetzes und von Hochspannungsfreileitungen

Übertragungsnetze und Hochspannungsfreileitungen bewirken Landschaftsveränderungen, die mit der Länge der Freileitungen und Zahl sowie Höhe der Masten korrelieren. In Tabelle 39 sind dazu die relevanten Kenndaten zusammengestellt. Die Länge aller Übertragungsleitungen (Trassen-km) steigt in den drei betrachteten Szenarien bis 2050 um ca. 10% gegenüber dem Stand 2013 an. Dabei erfolgt der Trassenausbau im *Basisszenario* überwiegend durch ca. 5.000 km Erdkabel, während die Länge der Freileitungstrassen zurückgeht. In den Szenarien *RAS* und *Referenz* dominiert der Ausbau durch längere Freileitungen: ca. 2.500 km (*Referenz*) bzw. 3.000 km (*RAS*). In allen Szenarien werden Stromkreise auf bestehenden Freileitungstrassen stark ausgebaut: Der Anteil der 220 kV-Stromkreise sinkt von 39% im Jahr 2013 auf 15% im Jahr 2050 (*Referenz, Basis*) bzw. 12% (*RAS*).

Die Trassen werden intensiver genutzt: Das Verhältnis (Stromkreis-km / Trassen-km) steigt von 1,4 im Jahr 2013 auf 1,7 (*Referenz*) bzw. 1,8 (*RAS, Basis*) an. In der Folge ändert sich die Bauart der Masten, sie werden höher und / oder breiter. Die Modelle für den Netzausbau lassen keine Aussage über die physische Dimensionierung der einzelnen Masten zu; die Festlegung hierfür ist standortabhängig und erfolgt in der Detailplanung für den Netzausbau.

Die sich aus dem Ausbau ergebenden indirekten Flächeninanspruchnahmen wurden in Tabelle 22 mittels durchschnittlicher Trassenbreiten quantifiziert. In erster Näherung ist davon auszugehen, dass die Auswirkung auf das Landschaftsbild proportional zu den Abstandsflächen des oberirdischen Übertragungsnetzes ist. Im *Basisszenario* verändern sich diese nicht: Die Flächenwirksamkeit durch stärkere Auslastung der Trassen wird durch die Reduktion der Länge der Freileitungstrassen kompensiert, wobei gleichzeitig ein starker Ausbau des Erdkabelnetzes erfolgt. Die Trassen sollten in der Detailplanung regionalspezifisch optimiert werden, um die Auswirkungen auf das Landschaftsbild so gering wie möglich zu halten. Lokal nachteilige Auswirkungen sind jedoch unvermeidbar.

Tabelle 39 Trassen-, Stromkreislängen sowie Flächenwirkung des Übertragungsnetzes 2013 in den Szenarien *Ref*, *RAS* und *Basis* für 2050

	2013	Referenz 2050	RAS 2050	Basis 2050
Stromkreislänge Freileitung 220 kV, km	13.000	6.600	5.400	6.100
Stromkreislänge Freileitung 380 kV, km	21.000	34.000	38.000	34.000
Stromkreislänge Freileitung HGÜ, km	34	4.600	3.800	400
Summe Stromkreis- km Freileitung	34.000	45.000	47.000	41.000
<i>Anteil 380 kV & HGÜ an Stromkreis-km</i>	61%	85%	88%	85%
Trassenlänge Freilei- tung 220 kV, km	9.200	4.000	3.000	3.000
Trassenlänge Freilei- tung 380 kV, km	15.000	20.000	21.000	19.000
Trassenlänge Freilei- tung HGÜ, km	34	2.600	2.900	83
Summe Trassenlänge Freileitung, km	24.000	26.000	27.000	22.000
Trassenlänge Kabel 380 kV, km	< 50	790	1.100	2.100
Trassenlänge Kabel HGÜ, km	0	98	130	2.900
Summe Trassenlänge Kabel, km	< 50	890	1.300	5.000
Verhältnis (Strom- kreis-km / Trassen- km)	1,4	1,7	1,8	1,8
Summe Trassen-km (Freileitung und Ka- bel)	24.000	27.000	27.000	27.000
Flächenwirkung Freileitungstrassen, ha	170.000	180.000	190.000	160.000
Flächenwirkung Erdkabel, ha	< 150	2.700	3.800	15.000

Tabelle 40 Trassen-, Stromkreislängen sowie Flächenwirkung des Übertragungsnetzes 2013 in den Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio* für 2050

	2013	Basis 2050	geNA 2050	Regio 2050
Stromkreislänge Freileitung 220 kV, km	13.000	6.100	7.200	5.500
Stromkreislänge Freileitung 380 kV, km	21.000	34.000	30.000	33.000
Stromkreislänge Freileitung HGÜ, km	34	400	400	400
Summe Stromkreis- km Freileitung	34.000	41.000	37.000	39.000
Anteil 380 kV & HGÜ an Stromkreis-km	61%	85%	81%	86%
Trassenlänge Freilei- tung 220 kV, km	9.200	3.000	3.700	3.000
Trassenlänge Freilei- tung 380 kV, km	15.000	19.000	20.000	19.000
Trassenlänge Freilei- tung HGÜ, km	34	83	83	83
Summe Trassenlänge Freileitung, km	24.000	22.000	23.000	22.000
Trassenlänge Kabel 380 kV, km	< 50	2.100	760	2.000
Trassenlänge Kabel HGÜ, km	0	2.900	1.600	2.900
Summe Trassenlänge Kabel, km	< 50	5.000	2.400	4.900
Verhältnis (Strom- kreis-km / Trassen- km)	1,4	1,8	1,7	1,8
Summe Trassen-km (Freileitung und Ka- bel)	24.000	27.000	26.000	27.000
Flächenwirkung Freileitungstrassen, ha	170.000	160.000	160.000	160.000
Flächenwirkung Erdkabel, ha	< 150	15.000	7.100	15.000

9.2 Landschaftsveränderung durch den Ausbau der Windkraftanlagen

Das Ausmaß der Landschaftsveränderung durch Onshore-Windkraftanlagen wird bedingt durch die Zahl der Anlagen, ihrer Größe und Sichtbarkeit sowie die regionale Verteilung (Tabelle 41, Tabelle 42). In allen Szenarien steigt die installierte Leistung im Vergleich zum Jahr 2015 erheblich an: um 22% (*Referenz*), 140% (*RAS*) und 80% (*Basisszenario*). Da im Mittel die Anlagengröße steigt, geht die Zahl der WKA im gleichen Zeitraum um 35% im *Referenzszenario* zurück. Im Szenario *RAS* steigt sie um 31%, im *Basisszenario* sinkt sie trotz des Anstiegs der installierten Leistung sogar geringfügig um 4%. Die indirekte Flächeninanspruchnahme steigt proportional mit der installierten Leistung.

Tabelle 41 Kenngrößen für die Landschaftsveränderung durch Onshore-Windkraftanlagen im Vergleich der Szenarien *Ref*, *RAS* und *Basis*

	2010	2015	Referenz 2050	RAS 2050	Basis 2050
WKA, inst. Leistung, MW	30.468	41.652	51.000	101.000	75.000
Mittlere Anlagengröße, MW	1,28	1,6	3,0	3,0	3,0
WKA, Zahl der Anlagen	20.638	25.980	17.000	34.000	25.000
WKA, Anlagen im Wald	306	1.165	1.400	4.200	2.600
Rotorflächen, Mio. m ²	60	80	160	330	250
Flächeninanspruchnahme, Mio. ha	0,19	0,27	0,31	0,61	0,45

Die Flächeninanspruchnahme ist eine Funktion der installierten Leistung und vergrößert sich im Vergleich zum Zustand im Jahr 2015 um 14% (*Referenz*), 130% (*RAS*) bzw. 66% (*Basis*). Die Minimierung der Auswirkungen auf das Landschaftsbild muss in den verschiedenen Schritten der Planung geschehen: Raumplanung, Bauleitplanung, Bebauungsplan und Genehmigungsplanung.

9.3 Räumliche Verteilung der Landschaftsveränderungen

Der Ausbau der WKA führt zudem zu deutlichen regionalen Verschiebungen in der Verteilung. So sinkt im *Basisszenario* die Zahl der WKA in den neuen Bundesländern um etwa ein Drittel und steigt im Westen Deutschlands um mehr als 80%; in den be-

sonders waldreichen südlichen Bundesländern Bayern und Baden-Württemberg steigt sie um 27%. Im Szenario *RAS* sind die regionalen Verschiebungen noch ausgeprägter: In allen Regionen steigt die Zahl der WKA; im Westen verdoppelt sie sich, im Süden steigt sie um 44%. Im *Referenzszenario* sinkt demgegenüber die Zahl der Anlagen; sie bleibt nur im Norden Deutschlands konstant. Diese absoluten Zahlen zum Zubau sind jedoch vor dem Hintergrund der Gesamtflächen in den Regionen DE_1 bis dE_6 zu bewerten. Es zeigt sich, dass trotz des starken Zubaus im Süden, die Dichte an WKA pro 100 km² in den nördlichen Regionen deutlich höher bleibt (vgl. Abbildung 44).

Tabelle 42 Kenngrößen für die Landschaftsveränderung durch Onshore-Windkraftanlagen im Vergleich der Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*

	2010	2015	Basis 2050	geNA 2050	Regio 2050
WKA, inst. Leistung, MW	30.468	41.652	75.000	100.000	82.000
Mittlere Anlagengröße, MW	1,28	1,6	3,0	3,0	3,0
WKA, Zahl der Anlagen	20.638	25.980	25.000	33.000	27.000
WKA, Anlagen im Wald	306	1.165	2.600	2.400	4.800
Rotorflächen, Mio. m ²	60	80	250	330	270
Flächeninanspruchnahme, Mio. ha	0,19	0,27	0,45	0,60	0,49

In der Folge führt dies zu einer Verdopplung der Zahl der WKA im Wald, trotz insgesamt zurückgehender Zahl der Anlagen. Der Blick auf die räumliche Verteilung der Windkraftanlagen an Land im Vergleich der Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio* zeigt ebenfalls deutliche Unterschiede. In den Szenarien *Regio* und *geNA* ist der Ausbau in den südlichen Bundesländern Bayern und Baden-Württemberg deutlich größer als im *Basisszenario*, während sich die Dichte der Anlagen im Norden Deutschlands verringert.

Die regionale Verteilung der Übertragungsnetze verschiebt sich deutlich, insbesondere in den Szenarien *Referenz* und *RAS*. Dort kommt es in Bayern und Baden-Württemberg (Region DE_6) zum nominell größten Zubau, jedoch ist dies auch die größte Region. Im Vergleich der Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio* (Abbildung 45) sind die Unterschiede in der räumlichen Verteilung gering. Abbildung 45 setzt die Werte zum Zubau in Bezug zu den Flächen der Regionen.

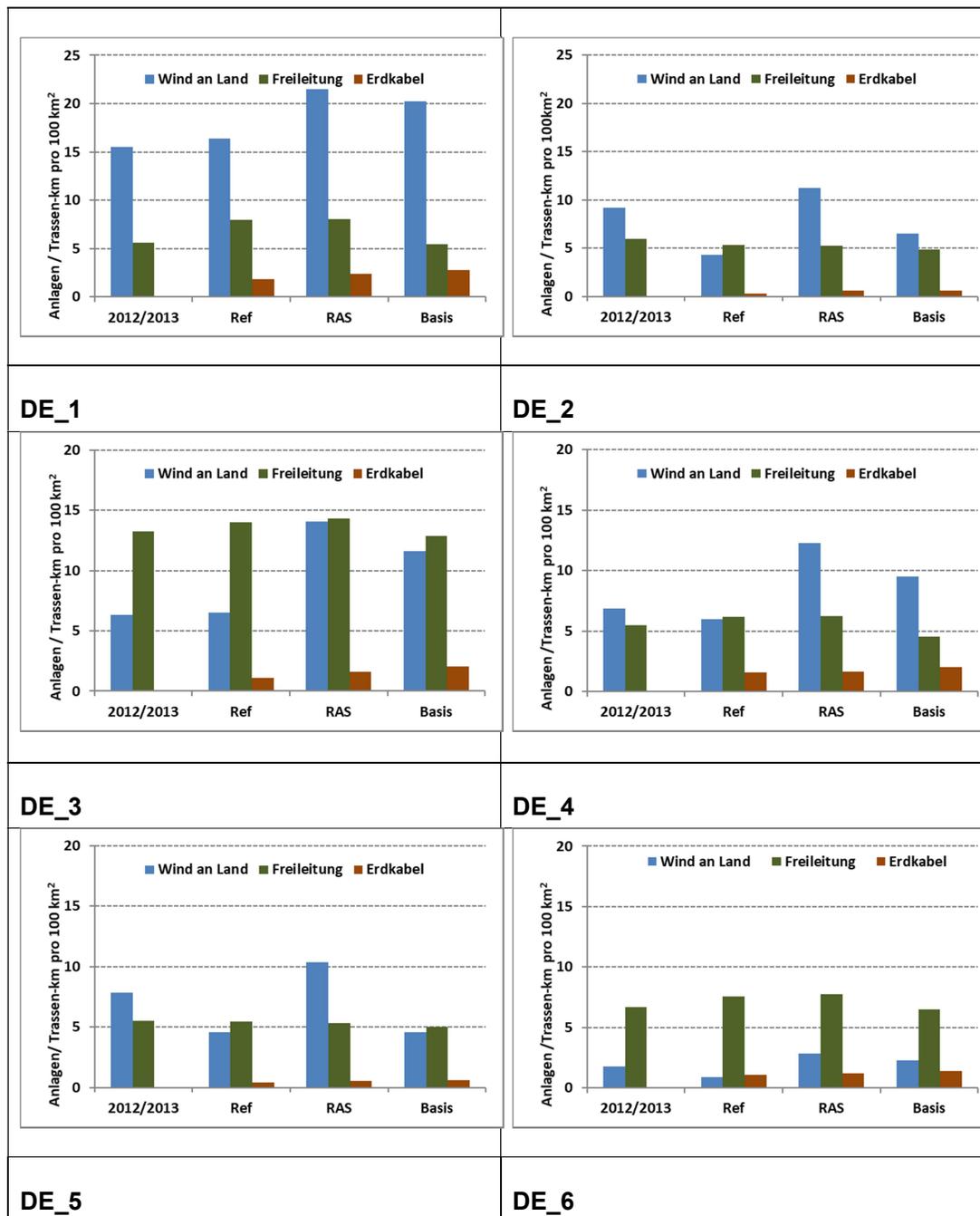


Abbildung 44 Dichte der Windkraftanlagen 2012 und ÜN-Trassen-km 2013 pro 100 km² sowie Werte für 2050 in den 6 Modellierungs-Regionen für die Szenarien *Referenz*, *RAS* und *Basis*

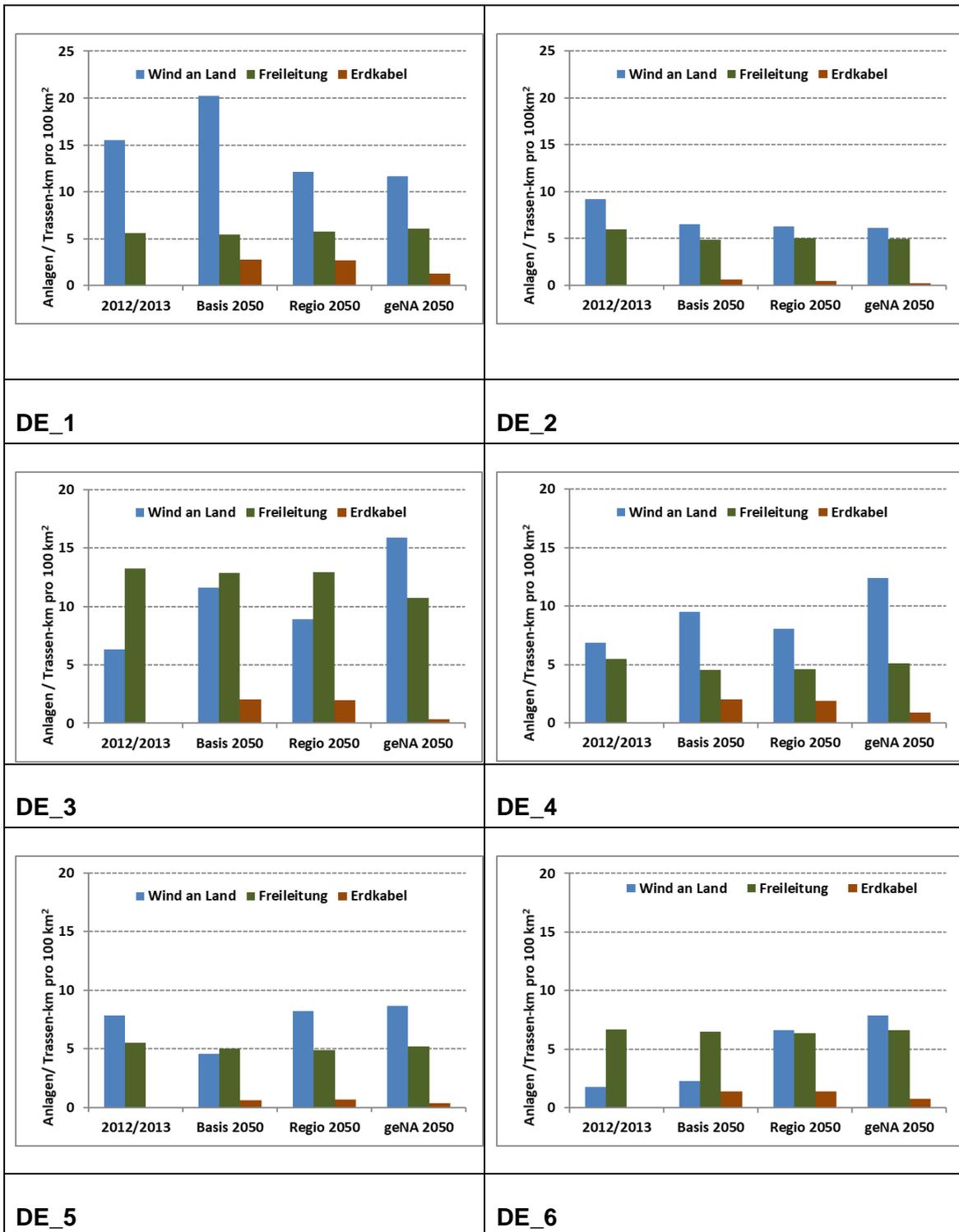


Abbildung 45

Dichte der Windkraftanlagen 2012 und ÜN-Trassen-km 2013 pro 100 km² sowie Werte für 2050 in den 6 Modellierungs-Regionen für die Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*

10 Zusammenfassende Bewertung

Für die zusammenfassende Bewertung der ökologischen Evaluierung wurden sieben Gruppen von Kriterien ausgewählt:

- Klimaschutz
- Luftqualität in Deutschland
- Wasserqualität in Deutschland
- Flächenbeanspruchung in Deutschland
- Flächenbeanspruchung im Ausland
- Flora und Fauna in Deutschland
- Landschaftsbild in Deutschland
- Risiko

Für die Kriterien wurden insgesamt 27 Indikatoren mit dem Ziel ausgewählt, eine ausgewogene Bewertung zu ermöglichen, die sowohl Belastungen als auch Entlastungen abbildet und soweit möglich geographisch differenziert. Die Schärfe der Indikatoren für die Bewertung variiert, z.B. lässt sich die Entnahme von Flusswasser besser quantifizieren als das Maß der Biotopzerschneidung, die durch die direkte und indirekte Flächeninanspruchnahme nur näherungsweise bewertet werden kann.

Die Ergebnisse sind für die insgesamt fünf Szenarien und die jeweiligen Bezugsjahre in Tabelle 43 und Tabelle 44 quantifiziert; in Tabelle 45 und Tabelle 46 werden die Ergebnisse relativ zum Jahr 2010 bewertet. Durch die Farbgebung lassen sich die Unterschiede schnell erkennen: Verbesserungen werden in grün, Verschlechterungen in rot angezeigt.

Klimaschutz

Im *Basisszenario* wird eine Reduktion der THG-Emissionen um >80% nach Territorialbilanz erzielt. Die Emissionen, einschließlich vorgelagerter Prozesse außerhalb Deutschlands, werden von 2010 bis 2050 um 82% reduziert; im *Referenzszenario* um 41%. Ergebnisse für die Szenarien *gehemmter Netzausbau* und *Regionalszenario* zeigen nur minimale Änderungen im Vergleich zum *Basisszenario*.

Luftqualität in Deutschland

Im *Basisszenario* werden die jährlichen Feinstaubemissionen von 1,9 Mio. t auf 0,53 Mio. t, also um 72% reduziert; im Szenario *RAS* ist es bedingt durch den Einsatz von Braunkohle-CCS deutlich weniger. Im *Referenzszenario* werden aufgrund des größeren Einsatzes fossiler Energieträger auch im Jahr 2050 noch 0,87 Mio. t Fein-

staub emittiert. Der Rückgang der Emission von Stoffen, die Sommersmog erzeugen, ist prozentual ähnlich wie bei den Feinstaubemissionen. Bei den krebserzeugenden Luftschadstoffen beträgt der Rückgang im *Basisszenario* lediglich 60%. Es dominieren dabei die Emissionen aus der Raumheizung von Haushalten, für die im Jahr 2050 insbesondere die Verbrennung von fester Biomasse ein wichtiger Bestandteil sein wird. Ergebnisse für die Szenarien *gehemmter Netzausbau* und *Regionalszenario* zeigen nur minimale Änderungen im Vergleich zum *Basisszenario*.

Wasserqualität in Deutschland

Durch den Rückgang der Stromerzeugung aus Atomkraft und fossilen Energieträgern in Wärmekraftwerken reduziert sich die Wasserentnahme aus deutschen Flüssen deutlich: im *Basisszenario* von 13% auf 9% und dort überwiegend durch Wasserkraftwerke. Die Erwärmung im Mittel aller deutschen Flüsse reduziert sich im *Basisszenario* von 1,9°C auf 0,5°C. Die Wasserqualität in deutschen Flüssen und damit die Situation der Wasserlebewesen verbessern sich deutlich. Ergebnisse für die Szenarien *gehemmter Netzausbau* und *Regionalszenario* zeigen nur minimale Änderungen im Vergleich zum *Basisszenario*.

Flächenbeanspruchung in Deutschland

Die direkte Flächeninanspruchnahme durch Braunkohletagebau, Versiegelung von Flächen und PV-Freiflächenanlagen steigt im *Basisszenario* von 210.000 ha auf 270.000 ha. Der Löwenanteil der Zunahme entfällt auf 52.000 ha für PV-Freiflächenanlagen; der Braunkohletagebau schlägt mit 14.000 ha zu Buche. Im Szenario *RAS* ist die Flächeninanspruchnahme im Jahr 2050 mit 330.000 ha aufgrund von größerem Anteil an PV-Freiflächenanlagen und Braunkohle (mit CCS) deutlich höher. Der Flächenbedarf für Anbaubiomasse in Deutschland steigt von 2,0 Mio. ha im Jahr 2010 auf 2,6 Mio. ha im Jahr 2050

Die indirekte Flächeninanspruchnahme liegt im *Basisszenario* bei 900.000 ha und damit um 50% über dem Wert des Jahres 2010. Durch die höhere Kapazität von Windkraftanlagen an Land im Szenario *RAS* liegt die indirekte Flächeninanspruchnahme im gleichen Jahr sogar bei 1,1 Mio. ha. Im Szenario *geNA* werden im Vergleich zum *Basisszenario* signifikant größere Flächen durch Freiland-PV belegt.

Flächenbeanspruchung im Ausland

Der Einsatz nicht erneuerbarer Energieträger (Uran, Steinkohle, Erdöl und Erdgas) geht im *Basisszenario* von 2.600 TWh auf 550 TWh um den Faktor 5 zurück. Damit verbunden ist auch eine Verringerung der Flächenbeanspruchung durch die Förde-

rung. Eine verlässliche Quantifizierung des Flächenfußabdrucks ist allerdings derzeit nicht möglich.

Die direkte Flächenbeanspruchung für importierte Anbaubiomasse sinkt im *Basisszenario* von 2,7 Mio. ha im Jahr 2010 auf 1,6 Mio. ha im Jahr 2050, wenn man annimmt, dass die spezifischen Erträge aus den Lieferländern denen in Deutschland entsprechen. Die Flächeninanspruchnahme durch energetische Anbaubiomasse im *geNA-Szenario* und *Regionalszenario* unterscheidet sich nur geringfügig von den Werten im *Basisszenario*.

Eine indirekte Flächenbeanspruchung im Ausland ist auch durch den Import von Strom gegeben. Während 2010 bei 633 TWh Stromproduktion 17 TWh exportiert wurden, sinkt im *Basisszenario* die Produktion im Jahr 2050 in Deutschland auf 501 TWh und es werden 105 TWh importiert. Wenn für die importierte Strommenge pro TWh die gleiche Flächenbeanspruchung wie in Deutschland unterstellt wird, ergibt sich im Jahr 2050 eine indirekte Flächeninanspruchnahme im Ausland von 250.000 ha. Im Szenario *RAS* ist der Nettostromimport im gleichen Jahr mit 31 TWh deutlich geringer; die indirekte Flächenbeanspruchung im Ausland liegt hierfür bei 73.000 ha.

Flora und Fauna in Deutschland

Die terrestrische Eutrophierung und Versauerung durch Luftschadstoffe reduziert sich im *Basisszenario* bis 2050 auf etwas mehr als ein Viertel der Werte von 2010. Die damit verbundenen Einwirkungen auf empfindliche Biotope stellen eine deutliche Verbesserung dar, ebenso wie der Rückgang von Sommersmog durch ozonbildende Luftschadstoffe. Das Ausmaß der Zerschneidung von Biotopen ist in erster Näherung proportional zum direkten und indirekten Flächenverbrauch. In der Summe beider Effekte ergibt sich für diese Risikoflächen im *Basisszenario* ein Zuwachs von 830.000 ha auf 1.2 Mio. ha. Im Szenario *RAS* sind die Risikoflächen aufgrund der Vielzahl von Windkraftanlagen um 200.000 ha größer. Die Frage, welche Biotope wie betroffen sind und mit welchen Minderungsmaßnahmen gegengesteuert werden kann, wäre in der weiteren Detailplanung zu evaluieren.

Die direkte Tötung von Organismen ist nicht verlässlich zu quantifizieren. Der zunehmenden Mortalität von Vögeln und Fledermäusen durch Windkraftanlagen und Höchst- sowie Hochspannungsleitungen steht die verringerte Mortalität von Fischen und anderen Wasserlebewesen durch die geringere Entnahme von Kühlwasser und Einleitung von Abwärme gegenüber.

Landschaftsbild in Deutschland

Die Energiewende ist mit deutlichen Veränderungen des Landschaftsbildes in Deutschland verbunden. Im *Basisszenario* wird im Jahr 2050 eine um den Faktor 2,8 höhere Kapazität an Windkraftanlagen installiert sein als im Jahr 2010. Die Zahl der WKA steigt in den neuen Bundesländern um etwa ein Drittel und im Westen Deutschlands um mehr als 80%; in den besonders waldreichen südlichen Bundesländern Bayern und Baden-Württemberg steigt sie um 27%. Die beanspruchte Fläche für Freiflächen-PV-Anlagen erhöht sich im *Basisszenario* um den Faktor 3, im Szenario *RAS* gar um den Faktor 5. Die Nutzung von Dachflächen für PV-Anlagen würde im *Basisszenario* von 3,1% auf 7,5% ansteigen. Die Länge der oberirdischen Trassen im Übertragungsnetz steigt im *Basisszenario* von 24.000 km auf 27.000 km. Entlastungen des Landschaftsbildes entstehen durch die Verringerung von Kühlturmschwaden und den Verzicht auf Braunkohleabbau bis 2050, wodurch statt der 53.000 ha Betriebsflächen im Jahr 2010 lediglich 3.700 ha im Jahr 2050 offen liegen. Die Überformung der deutschen Landschaft durch 190.000 ha rekultivierte Braunkohletagebauflächen bleibt jedoch bestehen.

Risiko

In allen betrachteten Szenarien wird durch den Atomausstieg das Risiko durch Unfälle in deutschen AKW nach und nach beseitigt. Die potenziell schwerwiegenden Unfallfolgen mit großen Zahlen von Todesfällen, Umsiedlungen und dem Verlust der Nutzbarkeit großer Landflächen (siehe Abschnitte 8.2 und 8.3) werden zukünftig vermieden. Die statistisch zu erwartende Zahl an Todesfällen innerhalb von 30 Tagen nach Unfällen bei der Energiebereitstellung sinkt um ca. 40%, das Kontaminationsrisiko durch Förderung und Transport von Erdöl sinkt um 81%. Demgegenüber steigt das Risiko durch CCS-Pipeline-Risiko in Deutschland.

Nicht betrachtete Kriterien

Die Umweltwirkungen, die sich durch den Bau neuer Infrastruktur (Dämmen von Häusern, andere Energieeffizienzmaßnahmen, Verkehrswege) sowie die Herstellung von Anlagen (PV-Module, Windkraftwerken, Leitungen) ergeben, werden in dieser Studie nicht betrachtet.

Zusammenfassender Vergleich

Im Vergleich des *Basisszenarios* 2050 mit dem Zustand 2010 ergibt sich folgendes Bild in Hinblick auf die Umweltverträglichkeit:

- Das Klimaschutzziel der Senkung der Emission von Treibhausgasen um mindestens 80% wird auch unter Berücksichtigung der Emissionen aus Vorketten außerhalb Deutschlands erreicht.
- Die Luft- und Wasserqualität in Deutschland verbessert sich deutlich.
- Die direkte und indirekte Flächenbelastung in Deutschland steigt deutlich, wobei die Qualität der Beeinträchtigung (Braunkohletagebau, Windkraftanlage, Hochspannungsnetze) beachtet werden muss.
- Die Umweltbelastungen im Ausland vermindern sich.
- Das Risiko schwerer Unfälle in AKW wird vermieden, übrige Unfallrisiken durch die Energiebereitstellung werden deutlich verringert.

Im Vergleich vom *Basisszenario* mit den Szenarien *geNA* und *Regio* für das Bezugsjahr 2050 bestehen folgende Unterschiede:

- Im *geNA-Szenario* wird durch die größere Zahl von Windkraftanlagen an Land und den zusätzlichen Ausbau von Freiflächen-PV trotz des geringeren Übertragungsnetzausbaus die direkte und indirekte Flächeninanspruchnahme deutlich größer als im *Basisszenario* und im *Regionalszenario*.
- Dafür ist durch den deutlich geringeren Nettostromimport die Beanspruchung von Flächen im Ausland im *geNA-Szenario* um etwa 60% kleiner als im *Basisszenario* und im *Regionalszenario*.
- Im *geNA-Szenario* ist die Beeinträchtigung von Flora und Fauna in Deutschland durch die relativ höhere Zahl von Windkraftanlagen, insbesondere durch Anlagen im Wald, größer als im *Basisszenario* und im *Regionalszenario*.
- Die Auswirkungen auf das Landschaftsbild in Deutschland sind im *geNA-Szenario* ebenfalls größer als im *Basisszenario* und im *Regionalszenario*.

Kriterium	Indikator	2010			2020			2030			2040			2050		
		Ref	RAS	Basis	Ref	RAS	Basis	Ref	RAS	Basis	Ref	RAS	Basis	Ref	RAS	Basis
Klimaschutz	Mio. t CO ₂ -e	1.100	990	940	980	700	710	770	590	490	680	480	350			
	Luftqualität in Deutschland															
Luftqualität in Deutschland	Mio. t Ethene	0,77	0,59	0,58	0,60	0,43	0,43	0,44	0,31	0,31	0,38	0,21	0,21			
	Krebstuzende Luftschadstoffe	0,84000	0,69000	0,68000	0,68000	0,47000	0,47000	0,39000	0,39000	0,39000	0,33000	0,33000	0,33000			
Wasserqualität in Deutschland	Mio. t PM10-e	2,00	1,80	1,70	1,70	1,20	1,20	1,10	0,89	0,82	0,92	0,68	0,59			
	Anteil Flusswassermenge	19%	9,4%	9,3%	11%	8,1%	8,1%	8,0%	7,4%	7,4%	7,5%	7,2%	7,2%			
Wasserqualität in Deutschland	Wasserentnahme aus deutschen Flüssen	1,8	0,4	0,3	0,6	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0			
	Erwärmung deutscher Flüsse	0,06	0,05	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02			
Flächenbeanspruchung in Deutschland	Mio. t PO4-e	190.000	210.000	220.000	210.000	210.000	230.000	210.000	250.000	230.000	250.000	330.000	280.000			
	Direkte Flächeninanspruchnahme	360.000	440.000	470.000	440.000	420.000	470.000	390.000	470.000	660.000	550.000	900.000	700.000			
Flächenbeanspruchung im Ausland	Indirekte Flächeninanspruchnahme	2,0	2,3	2,3	2,3	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6			
	Flächen durch Nettostromimport	0	0	0	21.000	10.000	0	38.000	0	0	73.000	53.000	160.000			
Flora und Fauna in Deutschland	Import nicht erneuerbarer Energieträger	2,600	2,400	2,200	2,300	1,500	1,500	1,600	950	1.000	1.300	550	630			
	Flächen für importierte Anbaubiomasse	2,7	3,4	3,3	1,8	2,2	2,3	0,3	2,2	1,8	0,0	1,1	1,6			
Terrestrische Eutrophierung	Mio. t PO4-e	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,10	0,11	0,10	0,07	0,08	0,06	0,05			
	Versauerung	2,50	2,20	2,00	2,10	1,40	1,40	1,70	1,40	1,00	1,30	0,89	0,72			
Landschaftsbild in Deutschland	Windkraftanlagen im Wald	310	86	330	230	110	520	220	880	2.500	1.400	4.200	2.600			
	Schäden durch WKA-Rotorflächen	60	74	90	82	110	95	72	110	230	160	330	250			
Landschaftsbild in Deutschland	Zerschneidung von Biotopen	550.000	630.000	690.000	660.000	630.000	670.000	610.000	690.000	890.000	790.000	1.200.000	980.000			
	Zahl der Windkraftanlagen an Land	21.000	18.000	21.000	19.000	15.000	14.000	11.000	15.000	23.000	18.000	34.000	25.000			
Nutzung von Dachflächen in %	Installierte Leistung GW	27	35	42	39	41	38	31	41	75	53	100	75			
	Dachflächen für PV und Solarthermie	3,1%	6,7%	8,3%	6,7%	8,2%	8,1%	6,7%	8,2%	2,0%	2,5%	0,9%	7,5%			
Braunkohle Betriebsflächen	Nutzung von Freiland-PV-Anlagen	8.600	24.000	33.000	24.000	24.000	33.000	24.000	24.000	33.000	39.000	120.000	76.000			
	Oberirdische Hochspannungsstrassen	24.000	25.000	24.000	24.000	26.000	24.000	26.000	27.000	23.000	26.000	27.000	22.000			
Risiko	Braunkohle Betriebsflächen	53.000	51.000	55.000	54.000	51.000	55.000	47.000	33.000	39.000	40.000	45.000	3.700			
	Braunkohlentagebau, ungenutzte Flächen	120.000	130.000	130.000	130.000	150.000	150.000	140.000	150.000	170.000	160.000	150.000	190.000			
Unfallrisiko durch deutsche AKW	TWhel Kernenergie	150	68	68	68	44	45	39	44	36	23	30	30			
	Unfallrisiko weltweit (Mortalität innerhalb 30 Tage)	51	49	58	49	58	55	39	58	60	530	180	180			
Erdöl- Kontamination bei Förderung & Transport	TWh Import von Erdöl	960	850	790	850	900	960	700	530	330	530	170	37			
	CCS-Einlagerung Mio. t pro Jahr															

Tabelle 43

Ausgewählte Kriterien für die zusammenfassende Bewertung: Indikatoren und Zahlenwerte für die Szenarien *Referenz*, *RAS* und *Basis*

Kriterium	Indikator	2010			2020			2030			2040			2050		
		Basis	geNA	Regio	Basis	geNA	Regio									
Klimaschutz																
THG-Emissionen mit Vorkette	Mio. t CO2-e	1.100	940	940	940	940	710	710	710	490	490	490	350	360	350	
Luftqualität in Deutschland																
Sommersmog	Mio. t Ethen-e	0,77	0,58	0,58	0,58	0,58	0,43	0,43	0,43	0,31	0,31	0,31	0,21	0,22	0,21	
Kreisläufige Luftschadstoffe	1.000 t As-e	0,84	0,68	0,68	0,68	0,68	0,47	0,47	0,47	0,39	0,39	0,39	0,33	0,33	0,33	
Feinstaubemissionen	Mio. t PM10-e	2,00	1,70	1,70	1,70	1,70	1,20	1,20	1,20	0,82	0,83	0,82	0,59	0,61	0,59	
Wasserqualität in Deutschland																
Wasserenahme aus deutschen Flüssen	Anteil Flusswassermenge	19%	9,3%	9,3%	9,3%	9,3%	8,1%	8,1%	8,1%	7,4%	7,4%	7,4%	7,2%	7,2%	7,2%	
Erwärmung deutscher Flüsse	mittlere Erwärmung in °C	1,8	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Aquatische Eutrophierung	Mio. t PO4-e	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	
Flächenbeanspruchung in Deutschland																
Direkte Flächeninanspruchnahme	ha in Deutschland	190.000	220.000	220.000	220.000	220.000	230.000	230.000	230.000	250.000	270.000	230.000	280.000	320.000	280.000	
Indirekte Flächeninanspruchnahme	ha in Deutschland	330.000	470.000	460.000	480.000	480.000	440.000	400.000	460.000	660.000	630.000	700.000	700.000	870.000	740.000	
Flächen für Anbau Biomasse	Mio. ha in Deutschland	2,0	2,3	2,3	2,3	2,3	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	
Flächenbeanspruchung im Ausland																
Flächen durch Nettoimport	ha indirekt und indirekt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Import nicht erneuerbarer Energieträger	TWh aus Importen von NEE	2.600	2.200	2.400	2.200	2.200	1.500	1.500	990	1.000	1.000	990	630	680	620	
Flächen für importierte Anbau Biomasse	Mio. ha Importbiomasse	2,7	3,3	2,7	3,3	3,3	2,3	2,5	2,3	1,8	2,0	1,8	1,6	1,7	1,6	
Flora und Fauna in Deutschland																
Terrestrische Eutrophierung	Mio. t PO4-e	0,15	0,14	0,13	0,14	0,14	0,10	0,10	0,10	0,07	0,07	0,07	0,05	0,05	0,05	
Versauerung	Mio. t SO2-e	2,50	2,00	2,00	2,00	2,00	1,40	1,40	1,40	1,00	1,00	1,00	0,72	0,74	0,72	
Windkraftanlagen im Wald	Zahl der Anlagen	310	330	410	650	650	520	400	700	2.200	2.400	2.300	2.600	4.800	2.700	
Schäden durch WKA-Rotorflächen	Mio. m2 Rotorfläche	60	90	89	93	93	95	80	100	220	200	240	250	320	270	
Zerschneidung von Biotopen	ha direkt und indirekte Flächen	520.000	690.000	680.000	700.000	700.000	670.000	630.000	680.000	890.000	910.000	930.000	980.000	1.200.000	1.000.000	
Landchaftsbild in Deutschland																
Windkraftanlagen an Land	Zahl der Anlagen	21.000	21.000	12.000	12.000	12.000	14.000	12.000	22.000	23.000	22.000	33.000	25.000	33.000	27.000	
Windkraftanlagen an Land	installierte Leistung, GW	27	42	42	33	33	38	33	65	70	65	100	75	100	82	
Dachflächen für PV und Solarthermie	Nutzung von Dachflächen in %	3,1%	8,3%	8,3%	8,3%	8,3%	8,1%	8,1%	8,1%	7,8%	7,8%	7,8%	7,5%	7,5%	7,5%	
Fläche für Freiland-PV-Anlagen	ha Freiland-PV	8.600	33.000	33.000	33.000	33.000	33.000	33.000	33.000	33.000	33.000	33.000	33.000	120.000	76.000	
Oberirdische Hochspannungsstrassen	Trassen-km Hochspannung	74.000	75.000	75.000	74.000	74.000	76.000	76.000	74.000	76.000	77.000	73.000	76.000	77.000	72.000	
Braunkohle Betriebsflächen	ha Betriebsflächen	53.000	55.000	51.000	51.000	51.000	39.000	33.000	33.000	17.000	17.000	17.000	3.700	2.800	3.700	
Braunkohle Tagebau, umgenutzte Flächen	ha Flächen nach Umnutzung	120.000	130.000	130.000	130.000	130.000	150.000	150.000	150.000	170.000	170.000	170.000	190.000	190.000	180.000	
Risiko																
Unfallrisiko durch deutsche AKW	TWhel Kernenergie	150	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	
Unfallrisiko weltweit (Mortalität innerhalb 30 Tage)	Todesfälle pro Jahr	51	55	52	55	55	45	45	44	36	37	36	30	31	30	
Erdöl - Kontamination bei Förderung & Transport	TWh Import von Erdöl	960	790	790	790	790	550	550	550	330	330	330	180	180	180	
CCS-Pipeline-Risiko in Deutschland	CCS-Einlagerung Mio. t pro Jahr															

Tabelle 44

Ausgewählte Kriterien für die zusammenfassende Bewertung: Indikatoren und Zahlenwerte für die Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio*

Kriterium	2010			2020			2030			2040			2050		
	Ref	RAS	Basis	Ref	RAS	Basis	Ref	RAS	Basis	Ref	RAS	Basis	Ref	RAS	Basis
Klimaschutz															
THG-Emissionen mit Vorkette	100%	92%	87%	80%	65%	66%	72%	55%	46%	64%	45%	33%			
Luftqualität in Deutschland															
Sommersmog	100%	77%	75%	64%	55%	56%	57%	40%	40%	50%	28%	28%			
Krebserzeugende Luftschadstoffe	100%	81%	81%	57%	56%	56%	46%	46%	46%	39%	39%	39%			
Feinstaubemissionen	100%	87%	85%	69%	60%	61%	56%	45%	42%	47%	35%	30%			
Wasserqualität in Deutschland															
Wasserentnahme aus deutschen Flüssen	100%	50%	50%	44%	43%	43%	43%	39%	40%	40%	38%	38%			
Erwärmung deutscher Flüsse	100%	31%	19%	9%	8%	8%	7%	2%	2%	3%	0%	0%			
Flächenbeanspruchung in Deutschland															
Direkte Flächeninanspruchnahme	100%	113%	118%	116%	115%	120%	110%	131%	123%	132%	177%	147%			
Indirekte Flächeninanspruchnahme	100%	124%	130%	109%	131%	123%	122%	198%	184%	152%	250%	195%			
Flächen für Anbaubiomasse	100%	115%	115%	130%	130%	130%	66%	130%	130%	37%	130%	130%			
Flächenbeanspruchung im Ausland															
Flächen durch Nettostromimport	109%	109%	109%	122%	115%	109%	132%	109%	109%	154%	141%	209%			
Import nicht erneuerbarer Energieträger	100%	88%	87%	69%	57%	58%	60%	37%	39%	50%	21%	24%			
Flächen für importierte Anbaubiomasse	100%	66%	123%	9%	80%	85%	0%	55%	67%	0%	39%	58%			
Flora und Fauna in Deutschland															
Terristische Eutrophierung	100%	93%	89%	72%	63%	64%	60%	50%	45%	50%	39%	33%			
Versauerung	100%	84%	82%	67%	56%	57%	58%	45%	40%	51%	36%	29%			
Windkraftanlagen im Wald	100%	74%	106%	71%	165%	168%	284%	806%	710%	452%	1355%	839%			
Schäden durch Wasserentnahme & Abwärme	100%	44%	34%	26%	25%	25%	25%	21%	21%	21%	19%	19%			
Schäden durch WKA-Rotorflächen	100%	136%	123%	119%	182%	158%	182%	381%	365%	265%	547%	414%			
Zerschneidung von Biotopen	100%	120%	125%	111%	125%	122%	118%	175%	163%	145%	228%	178%			
Landschaftsbild in Deutschland															
Zahl der Windkraftanlagen an Land	100%	93%	100%	53%	70%	65%	57%	119%	111%	84%	161%	120%			
Leistung der Windkraftanlagen an Land	100%	142%	129%	114%	150%	141%	132%	275%	256%	193%	372%	277%			
Dachflächen für PV und Solarthermie	100%	217%	267%	217%	264%	261%	80%	63%	252%	41%	27%	243%			
Fläche für Freiland-PV-Anlagen	100%	285%	380%	281%	281%	380%	64%	526%	380%	488%	1418%	886%			
Oberirdische Hochspannungstrassen	100%	103%	101%	107%	107%	98%	110%	111%	94%	109%	110%	93%			
Braunkohle Betriebsflächen	100%	102%	104%	88%	63%	73%	81%	68%	32%	76%	85%	7%			
Braunkohleabbau, umgenutzte Flächen	100%	106%	105%	118%	127%	124%	127%	129%	144%	134%	128%	156%			
Risiko															
Unfallrisiko durch deutsche AKW	100%	46%	46%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%			
Unfallrisiko weltweit (Mortalität 30 Tage)	100%	95%	112%	76%	85%	87%	56%	70%	70%	45%	59%	58%			
Erdöl - Kontamination bei Förderung & Transport	100%	88%	94%	73%	55%	34%	64%	34%	34%	55%	19%	19%			
CCS-Pipeline-Risiko in Deutschland	0%	0%	0%	0%	1%	1%	0%	75%	16%	0%	100%	22%			

Tabelle 45

Ausgewählte Kriterien für die zusammenfassende Bewertung: Veränderung in den Szenarien *Referenz*, *RAS* und *Basis* relativ zum Jahr 2010 (bei CCS relativ zu RAS im Jahr 2050)

Kriterium	2010			2020			2030			2040			2050		
	Basis	geNA	Regio	Basis	geNA	Regio	Basis	geNA	Regio	Basis	geNA	Regio	Basis	geNA	Regio
Klimaschutz															
THG-Emissionen mit Vorkette	100%	87%	88%	66%	66%	66%	46%	46%	46%	33%	34%	33%			
Luftqualität in Deutschland															
Sommersmog	100%	75%	75%	56%	56%	55%	40%	40%	40%	28%	29%	28%			
Kreberzeugende Luftschadstoffe	100%	81%	81%	56%	56%	56%	46%	46%	46%	39%	39%	39%			
Feinstaubemissionen	100%	85%	85%	61%	61%	61%	42%	42%	42%	30%	31%	30%			
Wasserqualität in Deutschland															
Wasserentnahme aus deutschen Flüssen	100%	50%	50%	43%	42%	43%	40%	40%	40%	38%	38%	38%			
Erwärmung deutscher Flüsse	100%	18%	19%	8%	6%	8%	2%	2%	2%	0%	0%	0%			
Flächenbeanspruchung in Deutschland															
Direkte Flächeninanspruchnahme	100%	118%	117%	120%	119%	120%	123%	146%	123%	147%	172%	146%			
Indirekte Flächeninanspruchnahme	100%	140%	139%	133%	122%	138%	193%	190%	212%	211%	261%	224%			
Flächen für Anbaubiomasse	100%	115%	115%	130%	130%	130%	130%	130%	130%	130%	130%	130%			
Flächenbeanspruchung im Ausland															
Flächen durch Nettostromimport	100%	109%	109%	109%	109%	109%	109%	109%	109%	203%	131%	209%			
Import nicht erneuerbarer Energieträger	100%	87%	87%	58%	59%	39%	39%	40%	39%	24%	27%	24%			
Flächen für importierte Anbaubiomasse	100%	123%	101%	85%	92%	84%	67%	73%	66%	58%	62%	57%			
Flora und Fauna in Deutschland															
Terrestrische Eutrophierung	100%	89%	88%	64%	65%	64%	45%	46%	45%	33%	33%	33%			
Versauerung	100%	82%	81%	57%	57%	57%	40%	40%	40%	29%	30%	29%			
Windkraftanlagen im Wald	100%	106%	132%	168%	129%	226%	710%	774%	742%	839%	1548%	871%			
Schäden durch Wasserentnahme & Abwärme	100%	34%	34%	25%	24%	25%	21%	21%	21%	19%	19%	19%			
Schäden durch WKA-Rotorflächen	100%	150%	148%	158%	133%	167%	367%	333%	400%	417%	533%	450%			
Zerschneidung von Biotopen	100%	132%	131%	128%	121%	131%	171%	174%	179%	188%	229%	196%			
Landschaftsbild in Deutschland															
Zahl der Windkraftanlagen an Land	100%	100%	99%	65%	56%	104%	111%	104%	159%	120%	159%	130%			
Leistung der Windkraftanlagen an Land	100%	154%	153%	141%	121%	241%	256%	241%	367%	277%	367%	300%			
Dachflächen für PV und Solarthermie	100%	267%	267%	261%	261%	261%	252%	252%	243%	243%	243%	243%			
Fläche für Freiland-PV-Anlagen	100%	380%	380%	380%	380%	380%	380%	380%	380%	886%	1418%	886%			
Oberirdische Hochspannungstrassen	100%	101%	101%	102%	102%	99%	103%	103%	98%	103%	103%	98%			
Braunkohle Betriebsflächen	100%	104%	96%	73%	62%	62%	32%	29%	32%	7%	5%	7%			
Braunkohlentagebau, umgenutzte Flächen	100%	105%	108%	124%	128%	127%	144%	144%	143%	156%	155%	154%			
Risiko															
Unfallrisiko durch deutsche AKW	100%	46%	46%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%			
Unfallrisiko weltweit (Mortalität 30 Tage)	100%	107%	101%	87%	88%	86%	70%	72%	70%	58%	60%	59%			
Erdöl - Kontamination bei Förderung & Transport	100%	82%	82%	57%	57%	57%	34%	34%	34%	19%	19%	19%			
CCS-Pipeline-Risiko in Deutschland	0%	0%	0%	1%	1%	1%	17%	17%	17%	22%	22%	22%			

Tabelle 46

Ausgewählte Kriterien für die zusammenfassende Bewertung: Veränderung in den Szenarien *Basis*, *geNA* und *Regio* relativ zum Jahr 2010 (bei CCS relativ zu RAS im Jahr 2050)

11 Auswirkungen der Szenarien auf die Schutzgüter des UVPG

Als Fazit sollen an dieser Stelle die Auswirkungen der Szenarien auf die einzelnen Schutzgüter des UVPG in kurzer und allgemeinverständlicher Form beschrieben werden.

11.1 Auswirkungen auf das Schutzgut Mensch

Die Beurteilung des Schutzgutes Mensch stützt sich vor allem auf die prognostizierten Veränderungen der Luftqualität und der Risikobewertung. Neben diesen gesundheitlichen Aspekten sind aber auch die Auswirkungen auf den für das menschliche Wohlbefinden notwendigen Erholungswert von Natur und Landschaft zu bewerten. Dieser ist Ausdruck der Wechselwirkungen zwischen dem Schutzgut Mensch und den Schutzgütern Tier und Pflanzen sowie Landschaftsbild.

Allen Szenarien gemein ist die prognostizierte Verbesserung bei der Situation der Luftbelastung. Deutlich werden starke Entlastungseffekte ab dem Stützjahr 2040. Im *Referenzszenario* wird dabei jedoch die Zielvorgabe der 80%igen Minderung der THG-Emissionen deutlich verfehlt, die Auswirkungen eines somit nicht verminderten Klimawandels werden negative Auswirkungen auf das Schutzgut Mensch haben. Im *Restriktionsarmen Szenario* sind negative Auswirkungen auf das Schutzgut Mensch durch das gesteigerte Risikopotenzial zu erwarten, welches mit der Notwendigkeit des Aufbaus eines CCS-Pipelinennetzes in Deutschland einhergeht. Durchweg positive Auswirkungen auf den Aspekt der menschlichen Gesundheit sind für das *Basisszenario* und die Szenarien *geNA* und *Regio* festzustellen.

Den positiven Effekten für die menschliche Gesundheit durch Verbesserung der Luftqualität und die Verringerung der Unfallrisiken (v.a. bei Atomenergie) stehen die durch die Wechselwirkungen mit dem Schutzgut Landschaftsbild entstehenden Auswirkungen auf die Erholungsaspekte des Menschen gegenüber. Wie im Schutzgut Landschaft ausführlich beschrieben, stehen negativ wahrgenommenen optischen Beeinträchtigungen (Ausbau von Windkraft und PV-Anlagen) auch positive Effekte (Verminderung von Kühlturmschwaden und Braunkohletagebauflächen) gegenüber. Diese sind in den Szenarien *geNA* und *Regio* größer als im *Basisszenario*. Die Diskrepanz zwischen Verbesserungen und Beeinträchtigungen variiert zwischen den untersuchten Szenarien, eine eindeutige Aussage über die Umweltauswirkungen auf das Schutzgut Landschaft wird erschwert.

In der Summe sind im *Basisszenario* und den Szenarien *geNA* und *Regio* überwiegend positive Auswirkungen auf das Schutzgut Mensch zu verzeichnen.

11.2 Auswirkungen auf das Schutzgut Tier, Pflanzen, Biodiversität

Die Beeinträchtigung des Schutzgutes Tiere, Pflanzen, Biodiversität über luftgetragene Schadstoffe vermindert sich in allen untersuchten Szenarien deutlich. Auch die Schädigung aquatischer Lebensgemeinschaften durch Wasserentnahme und Wärmeeintrag vermindert sich durch das Abschalten von Kraftwerken mit Durchflusskühlung deutlich. Kritisch für das Schutzgut Tiere, Pflanzen, Biodiversität ist insbesondere die Schädigung der Avifauna durch Windkraftanlagen zu beurteilen. Der starke Zubau der Rotorfläche bis zum Jahr 2050 birgt ein hohes Gefährdungs- bzw. Schadpotenzial für Vögel und Fledermäuse. Besonders stark betroffen ist das *Restriktionsarme Szenario*. Die Flächenbelegung nimmt in allen untersuchten Szenarien bis 2040 moderat zu und im *Restriktionsarmen Szenario*, durch den späten aber intensiven Zubau an Windkraftanlagen, noch einmal in einem stärkeren Maße als bei den beiden anderen Szenarien. Damit einher geht ein Verlust an Lebensräumen für Tiere und Pflanzen und ggf. nachteilige Effekte für den Biotopverbund.

Für eine abschließende Beurteilung der Auswirkungen auf das Schutzgut Tiere, Pflanzen, Biodiversität müssten die verschiedenen Untergruppen der potenziell betroffenen Biomassen gegeneinander aufgewogen werden. Im Direktvergleich der Szenarien *Referenz*, *RAS* und *Basis* erscheint das *Basisszenario* als am günstigsten, da hier die Verbesserungen bei den Kriterien „terrestrische Eutrophierung“, „Versauerung“ und „Schäden durch Wasserentnahme und Abwärme“ am deutlichsten ausgeprägt sind, die Schäden durch WKA Rotorflächen aber nicht auf dem Niveau des *Restriktionsarmen Szenario* liegen (wenngleich aber über dem des *Referenzszenarios*, bei dem jedoch die THG-Minderungsziele verfehlt werden).

In den Szenarien *geNA* und *Regio* werden durch die größere Zahl an Windkraftanlagen (dazu ein starker Ausbau von Anlagen im Wald) größere Auswirkungen auf Tiere, Pflanzen, Biodiversität als im *Basisszenario* erwartet. Durch den geringeren Nettostromimport im Szenario *geNA* sind die Auswirkungen im Ausland jedoch geringer.

11.3 Auswirkungen auf das Schutzgut Boden

Relevant für das Schutzgut Boden ist neben der direkten und sicherlich auch indirekten Flächeninanspruchnahme auch der Aspekt von Schadstoffeinträgen über den Luftpfad. Dem steigenden Maß an Flächenbelegungen für Infrastrukturmaßnahmen und dem Anbau energetisch genutzter Biomasse steht der Rückgang der großflächigen Landschaftsumwälzung der Braunkohleförderung gegenüber. Das Potenzial für die Deposi-

tion von Schadstoffen im Boden mindert sich in dem Maße, wie die Luftqualität verbessert wird.

In der Summe können daher für das Schutzgut Boden in allen Szenarien deutliche Verbesserungen festgestellt werden.

11.4 Auswirkungen auf das Schutzgut Wasser

Durch die Verminderung der Wasserentnahme und die Reduktion der Wärmeabgabe in die Gewässer verbessert sich die Wasserqualität bis zum Jahre 2050 im *Referenz-* und *Basisszenario* (ebenso *geNA* und *Regio*) deutlich, für das *Restriktionsarme Szenario* immerhin noch sichtbar. In Verbindung mit den Verbesserungen hinsichtlich der Luftqualität und der damit verbundenen Minimierung der Schadstoffeinträge in die Gewässer über den Luftpfad verbessert sich die Umweltsituation in Bezug auf das Schutzgut Wasser für alle Szenarien.

11.5 Auswirkungen auf das Schutzgut Luft

Mit dem Rückgang fossil befeuerter Verbrennungsanlagen in allen Sektoren verbessert sich die Luftqualität für alle untersuchten Wirkungskategorien. Die Emissionsminderungen im *Restriktionsarmen Szenario* und *Basisszenario* (ebenso *geNA* und *Regio*) sind dabei deutlicher als im *Referenzszenario*.

Insgesamt kann für das Schutzgut Luft eine Verbesserung der Umweltsituation festgestellt werden.

11.6 Auswirkungen auf das Schutzgut Klima

Das Sub-Schutzgut Klima wird hier im Sinne des globalen Klimas verstanden. Somit ist die Summe an Treibhausgasemissionen der für die Bewertung relevante Faktor. Zwar werden in allen untersuchten Szenarien Minderungen bei den THG-Emissionen sichtbar, doch wird im *Referenzszenario* die Mindestzielvorgabe von 80% Minderung deutlich verfehlt. In diesem Szenario können daher erhebliche nachteilige Effekte auf das Schutzgut Klima festgestellt werden.

Das *Restriktionsarme Szenario* und das *Basisszenario* erfüllen die Minderungsvorgaben ebenso wie die Szenarien *geNA* und *Regio*. Für nachhaltig positive Effekte auf das globale Klima wäre eine stärkere Minimierung in Richtung 95% Minderung jedoch wünschenswert.

11.7 Auswirkungen auf das Schutzgut Landschaft

Für das Schutzgut Landschaftsbild sind vor allen Dingen optische Beeinträchtigungen beim Zubau von Windkraftanlagen bzw. des Repowerings bestehender Windparks und dem Ausbau der PV-Aufdachanlagen und PV-Freiflächenanlagen zu bewerten. Doch sind auch positive Effekte auf das Landschaftsbild durch den Rückgang der Betriebs- und Gesamtflächen für den Braunkohletagebau und die Reduktion der Kühlturmschwaden zu verzeichnen. Die stärksten Beeinträchtigungen zeigt das *Restriktionsarme Szenario*, den größten Verbesserungseffekt das *Basisszenario*. Das *Referenzszenario* zeigt sich hinsichtlich der detaillierten Bewertung der Kriterien des Schutzguts Landschaft vergleichsweise ausgeglichen ohne große Ausschläge weder in den positiven noch in den negativen Bereich. Eine Besonderheit ist der Zubau der PV-Aufdachanlagen, der im *Basisszenario* nicht über ca. 39 GW installierter Leistung hinausgeht; im *Restriktionsarmen Szenario* geht die installierte Leistung sogar deutlich zurück. Im *Basisszenario* sorgen sowohl die Windkraftanlagen als auch die Freiflächen-PV Anlagen für eine sichtbare Veränderung des Landschaftsbildes. Dem steht jedoch im *Basisszenario* sowie den Szenarien *geNA* und *Regio* der Rückgang der großflächigen Landschaftsumformung durch die Braunkohleförderung gegenüber.

In der Summe kann festgehalten werden, dass die Energiewende zu sichtbaren Auswirkungen auf das Schutzgut Landschaftsbild führen wird. Im Falle des *Referenzszenarios* fallen die Zubaumaßnahmen zwar am geringsten aus, doch nur im *Basisszenario* sowie im Szenario *geNA* und *Regio* stehen dem Zubau auch deutlich positive Änderungen durch Schließung der Braunkohletagebauflächen gegenüber. Bei den Übertragungsnetzen ist die Veränderung der Auswirkungen auf das Landschaftsbild vergleichsweise gering.

11.8 Auswirkungen auf das Schutzgut Kultur- und sonstige Sachgüter

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 die Emissionen, die in Verbindung mit Wasser Säuren bilden, welche die verschiedenen Baumaterialien angreifen. Allerdings sind die an Gebäuden oder Skulpturen vorkommenden Schadensmechanismen insgesamt sehr komplex, so dass ein verallgemeinerbarer Wirkungszusammenhang zwischen Schadstoffkonzentration und Schadenshöhe kaum hergestellt werden kann. Auch gibt es bisher zur Beurteilung der Wirkung von Luftschadstoffen, im Gegensatz zu anderen Schutzgütern, für Kulturdenkmale keine rechtlichen Vorgaben. Allerdings ist durch die allge-

meine Reduktion von Emissionen keine Verschlechterung durch Schadstoffe mit versauernder Wirkung, die korrosiv auf Gebäude wirken, zu befürchten.

Insofern ist für alle untersuchten Szenarien keine nachteilige Beeinträchtigung des Schutzgutes Kultur- und sonstige Sachgüter zu erwarten.

12 Literatur

[50Hertz kein Datum]

<http://www.50hertz.com/Portals/3/Content/Dokumente/Netzausbau/Freileitung-vs-Kabel/10-Systemige-Kabeltrasse-Bau-Und-Fertigstellung.pdf>

(Zugriff am 14.07.2014)

[50Hertz 2012] Freileitung oder Erdkabel – Hintergrundinformationen

<http://www.50hertz.com/Portals/3/Content/Dokumente/Netzausbau/Freileitung-vs-Kabel/Hintergrundinformationen-Erdkabel-Freileitung-201203.pdf>

(Zugriff am 14.07.2014)

[AEE 2009] Agentur für erneuerbare Energien. ERNEUERBARE ENERGIEN 2020 POTENZIALATLAS DEUTSCHLAND. November 2009

http://www.unendlich-viel-energie.de/media/file/319.Potenzialatlas_2_Auflage_Online.pdf (Zugriff am

11.09.2014)

[AAE 2010] Agentur für erneuerbare Energien. Erneuerbare Energien Deutschland

2020. http://www.mo-portal.de/websites/photovoltaik/ee_potenzialatlas_2020.pdf

[AGEB 2015] Bilanz 2014 - AG Energiebilanzen e.V. [http://www.ag-](http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=bilanz14d.xls)

[energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=bilanz14d.xls](http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=bilanz14d.xls)

(Zugriff am 02.11.2016)

[BBSR 2006] BBSR Flächen 2006. Flächeninanspruchnahme privilegiert zulässiger Vorhaben um Außenbereich, Bearbeitung: M. Schmitt, G. Beckmann, unter Mitwirkung von E. Bergmann, F. Dosch, Bonn 2006

<http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Raumentwicklung/EnergieKlimaschutzpolitik/ErneuerbareEne->

[gien/Projekte/Flaecheninanspruchnahme/Bericht.pdf?_blob=publicationFile&v=3](http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Raumentwicklung/EnergieKlimaschutzpolitik/ErneuerbareEne-gien/Projekte/Flaecheninanspruchnahme/Bericht.pdf?_blob=publicationFile&v=3) (Zugriff am: 10.07.2014)

[BDEW 2011] Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken (2011).

Retrieved from <http://docplayer.org/30154913-Erneuerbare-energien-und-das-eeg-zahlen-fakten-grafiken-2011.html>

[BDEW 2017] Anlage zur Presseinformation vom 24. April 2017 (BDEW Kraftwerkliste Auswertung) [https://www.bdew.de/media/documents/170424-bdew-](https://www.bdew.de/media/documents/170424-bdew-kraftwerkliste-auswertung.pdf)

[kraftwerkliste-auswertung.pdf](https://www.bdew.de/media/documents/170424-bdew-kraftwerkliste-auswertung.pdf) (Zugriff am: 11.01.2018)

- [BMU 2010] Leitfaden zur Strategischen Umweltprüfung (SUP). Umweltbundesamt Berlin. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. März 2010
http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Umweltpruefungen/sup_leitfaden_lang_bf.pdf
- [BMWi 2014] Zahlen und Fakten Energiedaten - Nationale und Internationale Entwicklung, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
<http://bmwi.de/BMWi/Redaktion/Binaer/energie-daten-gesamt.property=blob,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.xls>
(Zugriff am 13.07.2014)
- [BSH 2015] Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. Bundesfachplan Offshore für die deutsche ausschließliche Wirtschaftszone der Nordsee 2013/2014 und Umweltbericht. Hamburg und Rostock. 12. Juni 2015
http://www.bsh.de/de/Meeresnutzung/BFO/Dokumente/Umweltbericht_BFON2013_2014.pdf (Zugriff am 29.04.2016)
- [Bundesnetzagentur 2012] Umweltbericht zum Bundesbedarfsplan – Entwurf der Bundesnetzagentur 2012
http://nvonb.bundesnetzagentur.de/netzausbau/Umweltbericht_zum_Bundesbedarfsplan-Entwurf_2012.pdf (Zugriff am 14.04.2016)
- [Bundesnetzagentur 2014] Kraftwerkliste der Bundesnetzagentur - Referenzjahr 2012/2013.
http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerkliste/Kraftwerkliste_2014.xlsx?blob=publicationFile&v=14
(Zugriff am 19.05.2014)
- [Bundesnetzagentur 2015] Methodenpapier - Die Strategische Umweltprüfung in der Bundesfachplanung
<http://www.netzausbau.de/SharedDocs/Downloads/DE/2015/Bundesfachplanung/MethodenSUP.pdf?blob=publicationFile> (Zugriff am 14.04.2016)
- [CML 1992] Environmental life cycle assessment of products, Guide and backgrounds, Center of Environmental Science (CML), Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (TNO), Fuels and Raw Materials Bureau (B&G), Leiden, 1992
- [CML 2010] CML-IA database that contains characterisation factors for life cycle impact assessment (LCIA) for all baseline characterisation methods mentioned in [CML 2002]. Database CML-IA v3.7, Institute of Environmental Sciences, Leiden

University, Leiden, November 2010; <http://www.cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html>

[De Leeuw 2002] De Leeuw, F.D.: A set of emission indicators for long-range trans-boundary air pollution, Bilthoven 2002

[Derwent et al. 1999] Derwent, R., R. Friedl, I.L. Karol, V.W.J.H. Kirchhoff, T. Ogawa, M.J. Rossi, P. Wennberg, 1999: Impacts of aircraft emissions on atmospheric ozone. – In J.E.Penner, D.H. Lister, D.J. Griggs, D.J. Dokken, M.McFarlandD (Eds): Aviation and the Global Atmosphere. A Special Report of IPCC Working Groups I and III. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 27–64

[DIN/EN/ISO 14040ff]

[EEA 2013] EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013. EEA Technical report No 12/2013. <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013>

[ENBW 2009] Das Rheinkraftwerk Iffezheim. Retrieved June 4, 2014, from https://www.enbw.com/media/konzern/docs/energieerzeugung/enbw-flyer_wasserkraftwerk_Ifiezheim.pdf

[ENBW 2011] Rudolf-Fettweis-Werk Forbach. Retrieved June 4, 2014, from https://www.enbw.com/media/konzern/docs/energieerzeugung/enbw-flyer_rudolf-fettweis-werk.pdf

[ENBW 2014] EnBW Energie Baden-Württemberg AG. Retrieved June 4, 2014, from <https://www.enbw.com/privatkunden/energie-und-zukunft/erneuerbare-energien/wasserkraft/standorte.html>

[Energieatlas Bayern 2014a]

http://www.energieatlas.bayern.de/thema_energie/stromnetz/uebertragung/freileitungen.html (Zugriff am 14.07.2014)

[Energiedienst 2012] Wasserkraftwerk Wyhlen. Retrieved June 4, 2014, from www.energiedienst.de/cms/medienboard/pdf/Unternehmen/wasserkraft/flyer_wasserkraftwerk_Wyhlen.pdf

[EON 2010] Brokdorf - Informationen zum Kraftwerk.

http://www.eon.com/content/dam/eon-content-pool/eon/company-asset-finder/asset-profiles/brokdorf-power-plant/Info_Standort_KBR.pdf
(Zugriff am 27.08.2014)

- [FA Wind 2016] Entwicklung der Windenergie im Wald - Ausbau, planerische Vorgaben und Empfehlungen für Windenergiestandorte auf Waldflächen in den Bundesländern, Berlin
http://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/FA-Wind_Analyse_Wind_im_Wald_06-2016.pdf (Zugriff am 07.10.2016)
- [Fehrenbach 2016] Fehrenbach H, Köppen S, Markwardt S, Vogt R. Aktualisierung der Eingangsdaten und Emissionsbilanzen wesentlicher biogener Energienutzungspfade (BioEm). Umweltbundesamt Dessau. UBA-Texts 09/2016
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_09_2016_aktualisierung_der_eingangsdaten_und_emissionsbilanzen_wesentlicher_biogener_energienutzungspfade_1.pdf
- [Furchtgott-Roth 2013] Furchtgott-Roth D. Pipelines are Safest for Transportation of Oil and Gas. Manhattan Institute for Policy Research. Issue Brief No. 23. June 2013. http://www.manhattan-institute.org/pdf/ib_23.pdf
- [GRS 1981] Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS). Deutsche Risikostudie Kernkraftwerk. Fachband 8, Unfallfolgenrechnung und Risikoergebnisse. TÜV Rheinland 1981
- [Hauschild & Wenzel 1998] Michael Hauschild & Henrik Wenzel, 1998: Environmental Assessment of Products, Volume 2: Scientific Background London, Chapman & Hall
- [Heijungs et al. 1992] Heijungs, R., J. Guinée, G. Huppes, R.M. Lankreijer, H.A. Udo de Haes, A. Wegener Sleeswijk, A.M.M. Ansems, P.G. Eggels, R. van Duin, H.P. de Goede, 1992: Environmental Life Cycle Assessment of products. Guide and Backgrounds. Centre of Environmental Science (CML), Leiden University, Leiden.
- [Heldstab et al. 2003] Heldstab, J. et al.: Modelling of PM10 and PM2.5 ambient concentrations in Switzerland 2000 and 2010. Environmental Documentation No.169. Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape SAEFL. Bern, Switzerland, 2003.
- [Hötker 2006] Hötker H. Auswirkungen des „Repowering“ von Windkraftanlagen auf Vögel und Fledermäuse. NABU Oktober 2006
https://bergenhusen.nabu.de/imperia/md/images/.../windkraft_endbericht.pdf
Zugriff am 27.11.2017
- [HSK 1991] Gutachten zum Gesuch um unbefristete Betriebsbewilligung und Leistungserhöhung für das Kernkraftwerk Mühleberg. HSK 11/250, 1991

- [IE 2015] Leipziger Institut für Energie. Marktanalyse – Windenergie an Land. Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Hamburg 18.02.2015
http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/studie-windenergie-an-land.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- [IFEU 2006] Ökobilanzieller Vergleich von Getränkekartons und PET-Einwegflaschen, ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, im Auftrag des Fachverband Kartonverpackungen (FKN), Heidelberg, 2006
- [IFEU 2008] Characterisation factors for group emissions VOC, NMVOC for the impact category Summer Smog (POCP). Heidelberg, 2008. (unpublished)
- [IKSR 2004] Auswirkungen von Wasserkraftanlagen in den Rheinzufüssen auf den Wanderfischabstieg, 70. Plenarsitzung – 8./9. Juli 2004 - Bern. Retrieved from http://www.iksr.org/uploads/media/IKSR-Bericht_Nr._140_01.doc
- [Ingenieurbüro Floecksmühle 2010] Ingenieurbüro Floecksmühle, IHS Stuttgart, Hydrotec, Fichtner, 2010. Potentialermittlung für den Ausbau der Wasserkraftnutzung in Deutschland als Grundlage für die Entwicklung einer geeigneten Ausbaustrategie. Im Auftrag des BMUB. Schlussbericht. Aachen, September 2010
- [IPCC 1995] IPCC (Publisher): Intergovernmental panel on the climatic change. Climatic Change, Report to the United Nations 1996, New York (USA) 1995.
- [IPCC 2001] Climate Change 2001 – Third Assessment Report. Cambridge UK, 2001
- [IPCC 2007] IPCC Fourth Assessment Report – Contribution of Working Group I: Technical Summary 2007; 31.03.2008
- [IRIS 2017] IRIS - Integrated Risk Information System; U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Washington D.C. (2000) - <http://www.epa.gov/iris/stand-al.htm>
- [ISO 14040&14044] Deutsches Institut für Normung e.V. (German Institute for Standardization):ISO 14040:2006(E) & ISO 14044:2006(E). Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. Beuth Verlag, Berlin, 2006
- [Klöpper & Renner 1995] Methodik der Wirkungsbilanz im Rahmen von Produkt-Ökobilanzen unter Berücksichtigung nicht oder nur schwer quantifizierbarer Umwelt-Kategorien, UBA-Texte 23/95, Berlin, 1995.

- [Koldrack 2013] Koldrack N. Flächeninanspruchnahme für Energieinfrastrukturen. Verteilung und Flächeninanspruchnahme der erneuerbaren Energien in Deutschland. Masterarbeit Universität Rostock |Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät | Umweltingenieurwissenschaften, eingereicht am 19.08.2013
http://www.rtg.bv.tum.de/files/Foerderpreis/2014/Blankenbach/Koldrack/Masterarbeit_Nils_Koldrack.pdf
- [Kraftwerk Reckingen AG 2012] Kraftwerk Reckingen AG. Kraftwerk Reckingen. 2012. Retrieved June 4, 2014, from <http://www.kraftwerk-reckingen.com/images/Geschftsbericht%2012.pdf>
- [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/eingriffsregelung/Downloads/Empfehlungen.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (Zugriff am 15.04.2016)
- [NewExt 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
- [NLÖ 2001] Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch - Weser- und Ems-Gebiet, 1999. 1.11.98-31.12.99.
- [PÖRY 2013] Wasserkraftwerke August, Wyhlen, Laufenburg. Retrieved from <http://www.poyry.ch/de/wir-uber-uns/publikationen/projektreferenzen>
- [Quaschnig 2000] Quaschnig, V. Systemtechnik einer klimaverträglichen Elektrizitätsversorgung in Deutschland für das 21. Jahrhundert. Düsseldorf: VDI Verlag. 2000. Retrieved from <http://www.volker-quaschnig.de/klima2000/Kapitel3.html>
- [RADAG 2009] Rheinkraftwerk Albrück-Dogern AG (RADAG). Retrieved June 4, 2014, from http://www.radag.de/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&g=0&t=1406128744&hash=34fbf56165fb33c1639963868cce61f84034bfb9&file=uploads/media/TechnischeDaten_RADAG.pdf
- [RSK 2007] Rheinkraftwerk Säckingen AG. 2007. Retrieved June 4, 2014, from <http://www.rksag.de/Unternehmen/Kerndaten>

- [Serpa 2011] Serpa J., Morbee J., Tzimas E. Technical and Economic Characteristics of a CO₂ Transmission Pipeline Infrastructure. JRC Scientific and Technical Reports. EUR 24731 EN – 2011.
http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/111111111/16038/1/regno_jrc62502_aspublished.pdf
- [Sprengel 1997] Verluste an Organismen im Bereich der deutschen Küsten von Nord- und Ostsee einschließlich der Ästuare durch die Entnahme von Wasser für großtechnische Kühlsysteme. Umweltbundesamt Berlin. 1997. Forschungsbericht 20204258, UBA-FB 99-055
- [Statistisches Bundesamt 2013] Statistisches Bundesamt. Umwelt - Nichtöffentliche Wasserversorgung und nichtöffentliche Abwasserversorgung Fachserie 19 Reihe 2.2. 2013.
https://www.destatis.de/GPStatistik/servlets/MCRFileNodeServlet/DEHeft_derivate_00012248/2190220109004.pdf (Zugriff am 18.07.2014)
- [TenneT 2013] TenneT. Umspannwerke – Die Knotenpunkte der Energieverteilung. Februar 2013
http://www.tennet.eu/de/index.php?eID=pmkfdl&file=fileadmin%2Fdownloads%2FNetz-Projekte%2FRund%2F13-033-brosch_uw_01-2013-v2-mf.pdf&ck=be124ed206202d07e45c7af640cdde69&forcedl=1&pageid=721
(Zugriff am 10.07.2014)
- [TenneT 2014a] TenneT. Freileitungen im Bau.
[http://www.tennet.eu/de/fileadmin/downloads/Netz-Projekte/Rund um den/15_09_Baubroschuere Version2015 V1.pdf](http://www.tennet.eu/de/fileadmin/downloads/Netz-Projekte/Rund%2F15_09_Baubroschuere_Version2015_V1.pdf) (Zugriff am 14.04.2016)
- [UBA 1999] Umweltbundesamt: Bewertung in Ökobilanzen. UBA-Texte 92/99, Berlin, 1999.
- [UBA 2013a] Positionspapier „Ressourcenschutzrecht“. Umweltbundesamt Berlin.
http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/ressourcenschutzrecht_07.01.2014.pdf
- [UBA 2013b] Datenbank "Kraftwerke in Deutschland", 15.02.2013
<http://www.umweltbundesamt.de/dokument/datenbank-kraftwerke-in-deutschland>
(abgerufen am 20.08.2014)

[UBA 2014] Wasserkraftpotenzial in Deutschland. 2014. Retrieved July 24, 2014, from <http://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/fluesse/nutzung-belastungen/nutzung-von-fluessen-wasserkraft>

[WHO 2005] Air Quality Guidelines Global Update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. World Health Organization. Geneva. http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf (Zugriff am 02.11.2016)