

Anna Walter, Julia Wiehe, Gerrit Schlömer,
Ali Hashemifarzad, Tim Wenzel, Ingrid Albert,
Lutz Hofmann, Jens zum Hingst und
Christina von Haaren

Naturverträgliche Energieversorgung aus 100 % erneuerbaren Energien 2050



Naturverträgliche Energieversorgung aus 100 % erneuerbaren Energien 2050

**Anna Walter
Julia Wiehe
Gerrit Schlömer
Ali Hashemifarzad
Tim Wenzel
Ingrid Albert
Lutz Hofmann
Jens zum Hingst
Christina von Haaren**

Titelbild: Ziele der Studie „Naturverträgliche Energieversorgung aus 100 % erneuerbaren Energien 2050“ (Grafikgrundlage: T. Wehr)

Projektleitung:

Prof. Dr. Christina von Haaren
Dr. Julia Wiehe

Adressen der Autorinnen und Autoren:

Anna Walter	Leibniz Universität Hannover
Dr. Julia Wiehe	Institut für Umweltplanung
Tim Wenzel	Herrenhäuser Str. 2, 30419 Hannover
Ingrid Albert	E-Mail: info@umwelt.uni-hannover.de
Prof. Dr. Christina von Haaren	
Gerrit Schlömer	Leibniz Universität Hannover
Prof. Dr. Lutz Hofmann	Institut für Elektrische Energiesysteme
	Fachgebiet „Elektrische Energieversorgung“
	Appelstr. 9 a, 30167 Hannover
	E-Mail: GZ-EEV@ifes.uni-hannover.de
Ali Hashemifarzad	CUTEC-Institut GmbH
Dr. Jens zum Hingst	Leibnizstr. 21 + 23, 38678 Clausthal-Zellerfeld
	E-Mail: cutec@cutec.de

Fachbetreuung im BfN:

Kathrin Ammermann
Dr. Christoph Strauß

Fachgebiet II 4.3 „Naturschutz und erneuerbare Energien“

Das Projekt wurde gefördert durch das Bundesamt für Naturschutz mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (FKZ-Nr. 3515 82 4300).

Diese Veröffentlichung wird aufgenommen in die Literaturdatenbank „DNL-online“ (www.dnl-online.de).

BfN-Skripten sind nicht im Buchhandel erhältlich. Eine pdf-Version dieser Ausgabe kann unter http://www.bfn.de/0502_skripten.html heruntergeladen werden. Weitere Materialien sind als Anhang unter der Adresse www.umwelt.uni-hannover.de/ee100 verfügbar.

Institutioneller Herausgeber: Bundesamt für Naturschutz
Konstantinstr. 110
53179 Bonn
URL: www.bfn.de

Der institutionelle Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die in den Beiträgen geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des institutionellen Herausgebers übereinstimmen.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des institutionellen Herausgebers unzulässig und strafbar.

Nachdruck, auch in Auszügen, nur mit Genehmigung des BfN.

Druck: Druckerei des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU)

Gedruckt auf 100% Altpapier

ISBN 978-3-89624-238-6

DOI 10.19217/skr501

Bonn - Bad Godesberg 2018

Vorwort

Zwei Herausforderungen von globaler Bedeutung werden immer drängender: Der Rückgang der biologischen Vielfalt und der Klimawandel. Ein zentraler Baustein der deutschen Klimaschutzstrategie ist die Umstellung des Energiesystems auf erneuerbare Energiequellen. Um den Schutz der biologischen Vielfalt nicht deutlich zu erschweren, ist es notwendig, diese Transformation naturverträglich auszugestalten.

Trotz des dynamischen Ausbaus der erneuerbaren Energien in den vergangenen Jahren liegt der größte Teil der Energiewende noch vor uns: Bei gleichem Energiebedarf müsste der Ausbau etwa um den Faktor sieben gesteigert werden, um zu einer vollständig erneuerbaren Energieversorgung zu gelangen. Klar ist, dass ein solch enormer Ausbau bei einigen Technologien, wie z.B. der Bioenergie oder der Wasserkraft nicht naturverträglich sein kann. Eine wichtige Aufgabe ist es daher, den Energieverbrauch deutlich zu reduzieren.

Gleichzeitig muss der erforderliche Ausbau von Windkraft und Photovoltaik konstruktiv-kritisch durch den Naturschutz begleitet und naturverträglich ausgestaltet werden. Notwendig ist eine fortgesetzte Entwicklung besonders effizienter und naturverträglicher Technologien ebenso wie die Weiterentwicklung räumlich steuernder Instrumente.

Das Vorhaben „Naturverträgliche Energieversorgung aus 100% erneuerbaren Energien im Jahr 2050“ skizziert ein Bild der Zukunft, in dem Ziele der Energiewende und des Naturschutzes gleichermaßen erfüllt sind. Die Ergebnisse verdeutlichen die hohe Raumwirksamkeit des Ausbauprozesses bei gleichzeitiger Knappheit an wirklich konfliktfreien Flächen.

Obwohl im Vorhaben bewusst nicht alle sozio-ökonomischen Aspekte berücksichtigt wurden, leisten die Ergebnisse aus Sicht des BfN einen wichtigen Beitrag zur Diskussion. Sie stellen das Thema ‚Raum‘ ins Zentrum und binden unterschiedlichste Naturschutzziele ein. Es wird deutlich, dass die Energiewende weiterhin und noch stärker in der Fläche spürbar sein wird. Deshalb gilt es, die konfliktärmsten Standorte zu wählen.

Auch zeigen die Vorhabensergebnisse, wie Naturschutzziele und die Nutzung Erneuerbarer konkret vereinbar sind. Ein aussichtsreicher Ansatz ist es, in Zukunft große Anteile der Fläche im bebauten Innenbereich durch Photovoltaik zu nutzen – weiterentwickelt und über klassische Auf-Dach-Anlagen hinausgehend.

Eine höhere Bedeutung von erneuerbarem Strom im zukünftigen Energiesystem hat das Potenzial, zu einer Senkung des Energieverbrauchs beizutragen. Diese Reduktion und eine gleichzeitig naturverträgliche Produktion können als Chance begriffen werden: Die Solarzelle auf dem Dach, die das E-Bike im Hinterhof und das sparsame Carsharing-Auto um die Ecke betankt – auch das ist ein Beitrag zum Schutz von Natur und Landschaft!

Viel Freude beim Lesen!

Prof. Dr. Beate Jessel

Präsidentin des Bundesamtes für Naturschutz

Vorbemerkung der Autorinnen und Autoren

Die in dieser Studie vorgestellten Szenarien sind nicht als Leitbilder zu verstehen, sondern als besonders naturschutzkonforme Varianten eines Spektrums von Entwicklungsmöglichkeiten bis 2050. Die sehr klaren Zielannahmen sollen dazu dienen, die Konsequenzen einer ambitionierten Integration von Klima- und Naturschutz für politische Handlungsoptionen aus Sicht des Naturschutzes herauszuarbeiten, ohne dass deren Umsetzbarkeit in der politischen Aushandlung oder andere Belange wie die Kosten der Energiewende schon substantiell berücksichtigt wurden.

Die Studie war von Beginn an als ein erster explorativer Schritt konzipiert. Angesichts der kurzen Bearbeitungszeit war es nicht zu vermeiden, dass die Ergebnisse in vielen wichtigen Bereichen notwendiger Weise unvollständig bleiben.

Ergebnisse und Empfehlungen sind daher als Grundlagen für die Diskussion einer naturverträglichen Ausgestaltung des Energiewendeprozesses zu verstehen.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	1
Abstract.....	9

A – AUSGANGSBEDINGUNGEN EINER MENSCH- UND NATURVER- TRÄGLICHEN ENERGIEWENDE

1 Einleitung.....	11
1.1 Hintergrund: eine naturschutzgerechte Energiewende	11
1.2 Ziel des Vorhabens: Wissen für eine mensch- und naturverträgliche Gestaltung der Energiewende bereitstellen	13
1.3 Übersicht über das Vorgehen	16
1.4 Untersuchungsgrenzen und Einschränkungen	20
2 Endenergiebedarfsprojektion für 2050 und Speicherbedarf	22
2.1 Generelles Vorgehen bei der Energiebedarfsprojektion im Jahr 2050	22
2.2 Wesentliche Annahmen	24
2.3 Effizienzsteigerung	25
2.4 Projizierter Energiebedarf im Jahr 2050	26
2.5 Sensitivitätsanalyse.....	27
2.6 Vergleich mit bestehenden Energieszenarien für Deutschland.....	31
2.7 Speicherbedarfe.....	34
2.8 Schlussfolgerungen.....	37
3 Stand der Energiewende im Jahr 2016.....	38
3.1 Versorgung mit erneuerbaren Energien in Deutschland	38
3.2 Flächeninanspruchnahme und Energieerzeugung pro Flächeneinheit der Energieträger im Vergleich	39

B – VORGEHEN BEI DER BEARBEITUNG DER SZENARIEN

4 Methodik zur Ermittlung des Stromertragspotenzials aus Wind und Sonne	42
4.1 Grundlagen zur Berechnung des Stromertragspotenzials von Wind.....	42
4.2 Grundlagen zur Berechnung des Stromertragspotenzials von Photovoltaik auf Dachflächen	44
4.2.1 Ermittlung des Dachflächenpotenzials.....	45
4.2.2 Berechnung des Stromertragspotenzials von Photovoltaik auf Dachflächen	46

5	Ermittlung der Konsequenzen für die Netzinfrastruktur in 2050	48
5.1	Grundsätze der Netzplanung.....	48
5.2	Übertragungsnetz und europäisches Elektroenergiesystem	49
5.3	Verteilnetzebene	50
5.4	Auswirkungen der Zukunftsszenarien auf die Auslegung des Niederspannungsnetzes	51
6	Ermittlung des Raumwiderstands von Mensch und Natur gegen die Belastungen durch erneuerbare Energieanlagen	57
6.1	Grundsätze der Ermittlung und Klassifizierung des Raumwiderstands	57
6.2	Vorgehen bei der Klassifizierung des Raumwiderstands verschiedener Flächenkategorien gegenüber Windenergieanlagen.....	59
6.2.1	Flächenkategorien zur Berücksichtigung des „Schutzgutes Mensch“ (Gesundheit, Wohlbefinden) und von Infrastrukturen	61
6.2.2	Flächenkategorien zur Berücksichtigung der Biodiversität und der Entwicklungsziele des Naturschutzes für 2050	66
6.2.3	Flächenkategorien zur Berücksichtigung weiterer Belange	71
6.3	Zuordnung der Flächenkategorien zu den Raumwiderstandsklassen.....	71
6.3.1	Flächen mit sehr hohem Raumwiderstand	72
6.3.2	Flächen mit hohem Raumwiderstand	72
6.3.3	Flächen mit mittlerem Raumwiderstand	73
6.3.4	Flächen mit geringem Raumwiderstand	73
7	Auslegung der Szenarien	74
7.1	Übersicht über Szenarienauslegung und Annahmen.....	74
7.2	Annahmen zu Windenergieanlagentypen	77
7.3	Annahmen zum Schutzbedarf von Mensch und Infrastrukturen.....	79
7.3.1	Schutzabstände zu Siedlungsbereichen und Erholungsgebieten	79
7.3.2	Schutzabstände zu Infrastrukturen.....	81
7.4	Annahmen zum Naturschutz im Jahr 2050	82
7.5	Annahmen zur Berechnung des Stromertragspotenzials	84
7.5.1	Annahmen zu Windenergie auf See	84
7.5.2	Annahmen zur Windenergie an Land	85
7.5.3	Annahmen zu Photovoltaik im Innenbereich.....	87
7.6	Annahmen zur Berechnung des nichtelektrischen Energieertragspotenzials	89
7.7	Annahmen zum Netzausbau	91

C - ERGEBNISSE: SZENARIEN ZU DEN MÖGLICHKEITEN EINER MENSCH- UND NATURVERTRÄGLICHEN ENERGIEVERSORGUNG IM JAHR 2050

8	Ergebnisse zum Energieertragspotenzial in den drei Szenarien	95
8.1	Szenario I: heutige Technologien und Standards zum Schutz von Mensch und Natur	95
8.1.1	Stromertragspotenzial in Szenario I.....	95
8.1.2	Strommix und Flächeninanspruchnahme in Szenario I.....	97
8.1.3	Konsequenzen der Stromertragspotenziale aus Szenario I für den Netzausbau.....	99
8.1.4	Nichtelektrisches Energieertragspotenzial Szenario I.....	104
8.2	Szenario II: Absehbare Fortentwicklung heutiger Technologien	104
8.2.1	Stromertragspotenzial in Szenario II.....	104
8.2.2	Strommix und Flächeninanspruchnahme in Szenario II.....	106
8.2.3	Netzausbau bei fortentwickelter Technologie in Szenario II.....	108
8.2.4	Nichtelektrisches Energieertragspotenzial in Szenario II	112
8.3	Szenario III: Technische Innovation „plus“ für Mensch und Natur	113
8.3.1	Stromertragspotenzial in Szenario III.....	113
8.3.2	Strommix und Flächeninanspruchnahme in Szenario III.....	115
8.3.3	Nichtelektrisches Energieertragspotenzial Szenario III.....	117
8.4	Gegenüberstellung von Endenergiebedarf und Energieertragspotenzialen und Flächeninanspruchnahme	118
8.5	Reserven.....	122
8.5.1	Zusätzliche Windenergie an Land	123
8.5.2	Weitere Reserven	126
9	Politische Handlungsoptionen zur Umsetzung einer mensch- und naturverträglichen Energiewende	128
9.1	Die ambitionierten Szenariovoraussetzungen weisen den Weg zu ambitionierten politischen Handlungsoptionen.....	128
9.2	Handlungsbereich Reduzierung des Energiebedarfs.....	130
9.3	Handlungsbereich Erreichen der technischen Innovationsziele und Verbreitung der erneuerbaren Energie-Technologien	131
9.4	Handlungsbereich mensch- und naturverträgliche Allokation in der Fläche	134
9.5	Ausblick.....	140

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Bilanzierung des naturverträglichen Stromertragspotenzials und des Strombedarfs der Bundesrepublik Deutschland in den Szenarien I–III	5
Abb. 2:	Potenziale zur Deckung des nichtelektrischen Energiebedarfs in den Szenarien I–III (bei sehr ambitionierter Strombedarfsentwicklung und unter Berücksichtigung der Umwandlungsverluste).....	6
Abb. 3:	Potenzial zur Deckung des nichtelektrischen Energiebedarfs in den Szenarien I–III unter Berücksichtigung der Windenergieserven (bei ambitionierter und sehr ambitionierter Strombedarfsentwicklung und unter Berücksichtigung der Umwandlungsverluste).....	7
Abb. 4:	Ziele der Studie „Naturverträgliche Energieversorgung aus 100 % erneuerbaren Energien 2050“	14
Abb. 5:	Projektionsmöglichkeiten für die Transformation des Energiesystems bis 2050	15
Abb. 6:	Zur Ableitung von Handlungsoptionen werden die Energiebedarfsprojektion und das naturverträgliche Energieertragspotenzial gegenübergestellt.	17
Abb. 7:	Vorgehen bei der Ermittlung des mensch- und naturverträglichen Stromertragspotenzials	18
Abb. 8:	Zusammenarbeit der Projektpartner CUTECH GmbH, IfES und IUP (beide Leibniz Universität Hannover)	19
Abb. 9:	Ein sehr ambitioniertes Ziel des Energiebedarfs im Jahr 2050	27
Abb. 10:	Sensitivitätsanalyse des Endenergiebedarfs im Jahr 2050.....	29
Abb. 11:	Sensitivitätsanalyse des Strombedarfs im Jahr 2050	30
Abb. 12:	Prognostizierte Endenergiebedarfe in bestehenden Energieszenarien (rot: Studie EE100; blau: ausgewählte Referenzstudien).....	34
Abb. 13:	Vergleich des Speicherbedarfs (Kapazität) bei 100% EE in verschiedenen Studien, hochgerechnet auf Deutschland (rot: Studie EE100; blau: ausgewählte Referenzstudien).....	36
Abb. 14:	Varianten des projizierten Strombedarfs sowie des nichtelektrischen Energiebedarfs im Jahr 2050	37
Abb. 15:	Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energieträgern (2016).....	38
Abb. 16:	Insbesondere Windenergieanlagen treffen auf den Widerstand der Anwohner	39
Abb. 17:	Flächenerträge verschiedener erneuerbarer Energieträger.....	41
Abb. 18:	Rayleigh-Verteilung bei $v = 6 \text{ m/s}$	44
Abb. 19:	Vorgehen zur Ermittlung des Stromertragspotenzials aus Photovoltaik auf Dachflächen.....	45
Abb. 20:	Annahmen zur Ausrichtung der PV-Module auf Flachdächern	46
Abb. 21:	Nutzbare Globalstrahlung (in %) vom maximal höchsten Wert (100 %)	47
Abb. 22:	NOVA-Prinzip bei Netzverstärkungs- und Netzausbauplanungen	48
Abb. 23:	Entwicklung des deutschen Höchstspannungsnetzes 1948 - 1960 - 2012	49

Abb. 24:	Netzausbau in Deutschland (BNETZA 2015) und im ENTSO-E-Netzgebiet	50
Abb. 25:	Gemessener Lastgang eines modernen Zweipersonenhaushaltes	52
Abb. 26:	Durchschnittlicher Lastgang des ungesteuerten Ladeverhaltens von 20 privaten und zehn geschäftlichen E-KFZ im Vergleich zu H0-Standard- profil während einer Woche	53
Abb. 27:	Darstellung der Freiheitsgrade im Netzplanungsprozess der Niederspannungsebene	55
Abb. 28:	Ablauf der Heuristik für die NS-Netzoptimierung II	56
Abb. 29:	Ablauf der ökologischen Risikoanalyse	57
Abb. 30:	Potenzielle Überschwemmungsflächen (links) und potenzielle Flächen für die Sicherstellung der Funktion als Lebensraum (rechts)	69
Abb. 31:	Flächen des nationalen Biotopverbunds (links) und das Grüne Band Deutschland (rechts)	70
Abb. 32:	Funktionsweise der Beispiel-Kleinwindanlage (nach INVELOX 2017)	79
Abb. 33:	Unterschiedliche Technologien der Windenergieanlagen in den einzelnen Szenarien führen aufgrund der Schallausbreitung zu unterschiedlichen Schutzabständen zu den Siedlungen	80
Abb. 34:	Schutzabstände der Windenergieanlagen zu Bundesstraßen in den Szenarien I-III	81
Abb. 35:	Leistungskennlinien der Windenergieanlage 2016 und Windenergie anlage 2050 (nach ENERCON 2016 a & ENERCON 2016 b)	85
Abb. 36:	Leistungskennlinie Kleinwindanlage (nach INVELOX 2017)	86
Abb. 37:	Annahmen zur Berechnung des nutzbaren Dachflächenpotenzials in den Szenarien I-III	89
Abb. 38:	Nutzungskaskade der Biomassefraktionen	90
Abb. 39:	Darstellung des ungesteuerten Lastgangs der elektrischen Wärme- bereitstellung durch Wärmepumpen in den 76 Haushalten für eine Winter- und eine Sommerwoche	92
Abb. 40:	Darstellung des ungesteuerten Lastgangs für die vollständige Aus- stattung der Haushalte mit Elektrofahrzeugen	93
Abb. 41:	Darstellung eines detailliert untersuchten Netzbereichs	93
Abb. 42:	Darstellung des ländlichen Versorgungsgebietes einer Ortsnetzstation	94
Abb. 43:	Prozentuale Flächenanteile der einzelnen Raumwiderstandsklassen beim Einsatz der Windenergieanlage 2016 in Szenario I	95
Abb. 44:	Stromertragspotenziale der Flächen verschiedener Raumwiderstands- klassen beim Einsatz der Windenergieanlage 2016 aus Szenario I	96
Abb. 45:	Stromertragspotenzial und Strommix in Szenario I	97
Abb. 46:	Bilanzierung von potenziellem Stromertrag und Strombedarf in Szenario I	98
Abb. 47:	Bestehende Flächennutzung und potenzielle Flächeninanspruchnahme zur Stromerzeugung durch Windenergie an Land und Photovoltaik im Innen- bereich in Szenario I	99

Abb. 48:	Vereinfachte Darstellung der Netzverstärkungsmaßnahmen Nord-Süd in Norddeutschland.....	100
Abb. 49:	Darstellung des Haushaltslastgangs (ohne E-Mobilität und Wärmepumpen, oben) und die in Szenario I angenommene PV-Anlagenleistung (unten) einer Winter- und eine Sommerwoche in Szenario I	101
Abb. 50:	Überlagerung zum Gesamtlastgang (Haushalt + Wärmepumpe + Photovoltaik) sowie idealer Tag/Nacht-Ausgleich durch Batteriespeicher und Darstellung des zukünftigen Netzdimensionierungsbereichs	101
Abb. 51:	Grafik der Netzausbau- und Betriebskosten, der notwendigen Speicherkapazität und abgeregelten Energie in Abhängigkeit zur installierten PV-Leistung in dem Wohngebiet aus Abb. 41.....	102
Abb. 52:	Status Quo und Optimierungsergebnis für einen Beispielort für das Szenario I	103
Abb. 53:	Prozentuale Flächenanteile der einzelnen Raumwiderstandsklassen beim Einsatz der Windenergieanlage 2050 in Szenario II	105
Abb. 54:	Stromertragspotenziale der Flächen verschiedener Raumwiderstandsklassen beim Einsatz der Windenergieanlage 2050 aus Szenario II	105
Abb. 55:	Stromertragspotenzial und Strommix in Szenario II.....	107
Abb. 56:	Bilanzierung von potenziellem Stromertrag und Strombedarf in Szenario II ...	107
Abb. 57:	Bestehende Flächennutzung und potenzielle Flächeninanspruchnahme zur Stromerzeugung durch Windenergie an Land und Photovoltaik im Innenbereich in Szenario II	108
Abb. 58:	Vereinfachte Darstellung der Netzverstärkungsmaßnahmen Nord-Süd in Norddeutschland.....	109
Abb. 59:	Überlagerung zum Gesamtlastgang (Haushalt + Wärmepumpe + Photovoltaik) sowie idealer Tag/Nacht-Ausgleich durch Batteriespeicher und Darstellung des zukünftigen Netzdimensionierungsbereichs	110
Abb. 60:	Grafik der Netzausbau- und Betriebskosten, der notwendigen Speicherkapazität und abgeregelten Energie in Abhängigkeit zur installierten PV-Leistung in dem Wohngebiet aus Abb. 42.....	111
Abb. 61:	Status Quo und Optimierungsergebnis für einen Beispielort für das Szenario II.....	111
Abb. 62:	Potenzial zur Deckung des nichtelektrischen Energiebedarfs durch biogene Reststoffe und synthetische Grundstoffe aus Stromüberschüssen in Szenario II.....	113
Abb. 63:	Mensch- und naturverträgliches Stromertragspotenzial unter der Annahme der Eigenschaften der verschiedenen Windenergieanlagen in Szenario III	114
Abb. 64:	Stromertragspotenzial und Strommix in Szenario III.....	116
Abb. 65:	Bilanzierung von potenziellem Stromertrag und Strombedarf in Szenario III ..	116
Abb. 66:	Bestehende Flächennutzung und potenzielle Flächeninanspruchnahme zur Stromerzeugung durch Windenergie an Land und Photovoltaik im Innenbereich in Szenario III	117

Abb. 67:	Potenzial zur Deckung des nichtelektrischen Energiebedarfs durch biogene Reststoffe und Synthetische Grundstoffe aus Stromüberschüssen in Szenario III	118
Abb. 68:	Bilanzierung des naturverträglichen Stromertragspotenzials und des Strombedarfs der Bundesrepublik Deutschland in den Szenarien I–III	119
Abb. 69:	Potenziale zur Deckung des nichtelektrischen Energiebedarfs in den Szenarien I-III (bei sehr ambitionierter Strombedarfsentwicklung und unter Berücksichtigung der Umwandlungsverluste).....	120
Abb. 70:	Flächeninanspruchnahme der mensch- und naturverträglichen Stromerzeugung (geringer Raumwiderstand) durch Windenergie an Land und durch Photovoltaik im Innenbereich in den Szenarien I-III	121
Abb. 71:	Reserven der Energieproduktion in den Szenarien einer mensch- und naturverträglichen Energiewende.....	122
Abb. 72:	Gesamtstromertragspotenzial im Vergleich mit dem potenziellen Strombedarf in den Szenarien I–III bei weniger strengen Vorgaben zum Schutz der Menschen vor Lärm und visuellen Beeinträchtigungen	124
Abb. 73:	Potenzial zur Deckung des nichtelektrischen Energiebedarfs in den Szenarien I-III unter Berücksichtigung der Windenergiereserven (bei ambitionierter und sehr ambitionierter Strombedarfsentwicklung und unter Berücksichtigung der Umwandlungsverluste).....	126
Abb. 74:	Voraussetzungen für die Szenarien, die gleichzeitig die Richtung politischer Handlungsoptionen verdeutlichen	129
Abb. 75:	Zusammenspiel der politischen Entscheidungsebenen bei der Umsetzung bundesweiter Ziele und Monitoring	135
Abb. 76:	Regelungsoptionen Bund und Umsetzung in Ländern, Regionen und Kommunen	136
Abb. 77:	Die Ansiedlung von Windenergieanlagen verstärkt vielerorts soziale Konflikte und trifft auf den Widerstand von Teilen der lokalen Bevölkerung ...	140

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Übersicht über die Stromertragspotenziale der betrachteten Energieträger in den Szenarien I–III	4
Tab. 2:	Berücksichtigung der Naturschutzaspekte in anderen Energieszenarien (UBA 2010, DLR 2012, Prognos 2014, UBA 2014, Öko—Institut 2015)	13
Tab. 3:	Erforderliche Stromerzeugung zur Deckung des heutigen Energiebedarfs (-verbrauchs) mit erneuerbaren Energien unter Annahme unveränderter Nutzungspfade und Herstellung synthetischer Brennstoffe.	24
Tab. 4:	Der Endenergiebedarf im Jahr 2050 in den einzelnen Sektoren mit sehr ambitionierten Zielen zur Bedarfsreduzierung	27
Tab. 5:	Der projizierte Endenergiebedarf im Jahr 2050: Variante 2: Elektrifizierung 50 % und Gebäudesanierung 2,64 % pro Jahr.....	28
Tab. 6:	Der projizierte Endenergiebedarf im Jahr 2050: Variante 3: Elektrifizierung 88 % und Gebäudesanierung 1 % pro Jahr	29
Tab. 7:	Der projizierte Endenergiebedarf mit ambitionierten Zielen im Jahr 2050 Variante 4: Elektrifizierung 50 % und Gebäudesanierung 1 % pro Jahr	29
Tab. 8:	Wesentliche Parameter zur Berechnung des Endenergiebedarfs in bestehenden Energieszenarien.....	33
Tab. 9:	Prognostizierter Strombedarf zur Langzeitspeicherung im Jahr 2050	36
Tab. 10:	Die Bodenrauigkeit in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit der Landschaft (LUNDTANG PETERSEN & TOREN 1990:44).....	42
Tab. 11:	Flächenkategorien und Datensätze für die Einteilung der Raumwiderstände und die Flächenermittlung.....	60
Tab. 12:	Immissionsrichtwerte außerhalb von Gebäuden nach TA-Lärm	62
Tab. 13:	Annahmen bei der Berechnung der Szenarien I–III.....	75
Tab. 14:	Eigenschaften der Windenergieanlagen an Land in den Szenarien I–III	79
Tab. 15:	Schutzabstände zu Siedlungsbereichen, Erholungsgebieten und Landschaften mit besonderer ästhetischer Qualität in den Szenarien I–III	81
Tab. 16:	Schutzabstände der Windenergieanlagen zu Infrastrukturen in den Szenarien I–III	82
Tab. 17:	Einteilung der Raumwiderstandsklassen Windenergie in den Szenarien I–III ...	83
Tab. 18:	Aus Sicht des Naturschutzes unbedenkliche Reststoffe zur energetischen Nutzung (Potenziale nach UBA 2010).....	90
Tab. 19:	Mit naturschutzfachlichen Auflagen nutzbare Reststoffe	91
Tab. 20:	Stromertragspotenzial aus Photovoltaik im Innenbereich in Szenario I	96
Tab. 21:	Stromertragspotenzial der einzelnen Energieträger und Strommix in Szenario I	97
Tab. 22:	Ergebnis der Auswertung eines Versorgungsgebietes von 287 km ²	104
Tab. 23:	Stromertragspotenzial aus Photovoltaik im Innenbereich in Szenario II	106
Tab. 24:	Stromertragspotenzial der einzelnen Energieträger und Strommix in Szenario II.....	106
Tab. 25:	Ergebnis der Auswertung eines ländlichen Versorgungsgebietes von 287 km ²	112

Tab. 26:	Stromertragspotenzial aus Photovoltaik im Innenbereich in Szenario II	115
Tab. 27:	Stromertragspotenzial der einzelnen Energieträger und Strommix in Szenario III.....	115
Tab. 28:	Übersicht über die Stromertragspotenziale der betrachteten Energieträger in den Szenarien I–III	118
Tab. 29:	Bilanzierung des Gesamtstromertragspotenzials und des Strombedarfs in den Szenarien I–III	119
Tab. 30:	Annahmen zu Schutzabständen zu Siedlungsbereichen, Erholungs- gebieten - bei weniger strengen Vorgaben zum Schutz der Menschen vor Lärm und visuellen Beeinträchtigungen	123
Tab. 31:	Potenzielle Flächeninanspruchnahme und Stromerträge der Windenergie an Land bei weniger strengen Vorgaben zum Schutz der Menschen vor Lärm und visuellen Beeinträchtigungen	123
Tab. 32:	Übersicht potenzieller Stromerträge der einzelnen Energieträger in den Szenarien I–III bei weniger strengen Vorgaben zum Schutz der Menschen vor Lärm und visuellen Beeinträchtigungen.....	124

Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current Wechselstrom
BauGB	Baugesetzbuch
BBPlG	Bundesbedarfsplanungsgesetz
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
BNETZA	Bundesnetzagentur
CBD	Convention on Biological Diversity
DC	Direct Current Gleichstrom
DLM	Digitales Landschaftsmodell
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
ENTSO-E	Verbands der Europäischen Übertragungsnetzbetreiber, European Network of Transmission System Operators
FFH-VP	Fauna-Flora-Verträglichkeitsprüfung
GG	Grundgesetz
GIL	Gasisolierte Leitung
HDÜ	Hochspannungsdrehstromübertragung
HGÜ	Hochspannungsgleichstromübertragung
HöS	Höchstspannung
HS	Hochspannung
HTLS	High Temperature Low Sag, Hochtemperaturleiterseil mit verringertem Durchhang
HVDC	High Voltage Direct Current Hochspannungsgleichstrom
LCC	Line Commutated Converter
MI	Massimprägniert
MS	Mittelspannung
NABEG	Netzausbaubeschleunigungsgesetz
NaWaRo	Nachwachsender Rohstoff
NBS	Nationale Biodiversitätsstrategie
NE	Netzebene
NEP	Netzentwicklungsplan
NS	Niederspannung
ONS	Ortsnetzstation
PV	Photovoltaik
ROG	Raumordnungsgesetz
TSO	Transmission System Operator
UW	Umspannwerk
VPE	Vernetztes Polyethylen
VSC	Voltage Source Converter
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie

Glossar

Endenergiebedarfsprojektion	Die Endenergiebedarfsprojektion für das Jahr 2050 beinhaltet Annahmen darüber, welche Energiebedarfe in den Szenarien berücksichtigt werden müssen. Relevante Rahmenbedingungen sind z. B. die prognostizierte Bevölkerungsentwicklung, das Wirtschaftswachstum sowie das Potenzial zur Senkung des Energiebedarfs und zur Effizienzsteigerung auf der Nachfrageseite. Dabei wurden insbesondere derzeitige und zukünftige Technologieentwicklungen in den Energieverbrauchssektoren und Möglichkeiten der Substitution von Energieträgern einbezogen. Es werden zwei Varianten für den Endenergiebedarf projiziert: die sehr ambitionierte Endenergiebedarfsentwicklung sowie die ambitionierte Endenergiebedarfsentwicklung, bei der nicht alle Einsparziele erreicht werden.
Energieertragspotenzial	Das Energieertragspotenzial umfasst neben dem Stromertragspotenzial das Potenzial nichtelektrischer Energieträger (z. B. Biomasse) sowie die Umgebungswärme.
Energieerzeugung	Umwandlung von (gespeicherten) Energieformen in nutzbare Energie.
Nichtelektrischer Energiebedarf	Der zukünftige Endenergiebedarf weist auch nichtelektrische Anteile auf. In den Bereichen Prozesswärme und mobile Anwendungen sind dies weiterhin Brenn- bzw. Treibstoffe, die in einem auf erneuerbaren Energien beruhenden Energiesystem beispielsweise auch aus Bioenergieträgern bereitgestellt werden könnten. Darüber hinaus können synthetische Grundstoffe aus Strom hergestellt werden (Power-to-X), wobei momentan mit hohen Umwandlungsverlusten von 50 Prozent gerechnet werden muss.
Raumwiderstand	Der Raumwiderstand wird hier definiert als Aggregation einer projizierten negativen Beeinflussung von Mensch und Natur durch eine definierte Anlage (mitsamt ihren Belastungsfaktoren wie z. B. Lärmemissionen) in einem bestimmten Raum und der Relevanz dieser Veränderung aufgrund des Wertes der Schutzgüter Biodiversität, Naturhaushalt und Landschaftsbild. Das Ergebnis der Aggregation wird auf einer ordinalen Skala dargestellt (sehr hoch – hoch – mittel – gering). Die Raumwiderstandsanalyse bildet die Grundlage für die Bewertung der Mensch- und Naturverträglichkeit der verschiedenen erneuerbaren Energieträger und der Ermittlung der potenziellen Flächen zu ihrem mensch- und naturverträglichen Ausbau

Reserven	In bestimmten Feldern wie z. B. dem Energieimport, der Nutzung von Gebieten mittlerem Raumwiderstand, Geothermie oder möglichen Offshorewindenergieerträgen wurden die Potenziale noch nicht oder mit konservativen Annahmen in die Szenarien miteinbezogen. Dadurch ergeben sich weitere Optionen der Energieerzeugung, die in den bisherigen Betrachtungen aufgrund von Unsicherheiten in den Datensätzen oder weil die Naturverträglichkeit im Einzelfall geprüft werden muss, zunächst nicht berücksichtigt wurden. Diese „Reserven“ für die Zielerreichung in 2050 wurden überwiegend noch nicht quantifiziert.
Speicherbedarf	Da nur bilanzielle Betrachtungen zur Bedarfsdeckung durchgeführt werden konnten, wird der erforderliche Speicherbedarf mit einem sehr konservativen Ansatz von 50 % abgeschätzt. In den hier dargestellten Szenarien sind Speicher zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage beispielsweise innerhalb eines Tages oder über längere „Dunkelflauten“ notwendig. Unter der Annahme einer Wirkungsgradkette bei Ein- und Ausspeisung von 50 % für mittlere Speicherverluste von Speichersystemen aus Kurzzeitspeichern (65–90%) und Langzeitspeichern (36–50 %) ergeben sich in den vorgestellten Szenarien zusätzliche Energiebedarfe zur Deckung dieser angenommenen Speicherverluste.
Strombedarfsentwicklung	Durch die angenommene weitgehende Elektrifizierung der Bereiche Mobilität und Wärme steigt der Bedarf an elektrischer Energie (Strom). Bei der Strombedarfsprojektion für das Jahr 2050 wird zwischen mobilen Anwendungen, Prozess- und Gebäudewärme sowie Kraft-/Licht-/Information- und Kommunikationstechnologien (IKT)- und Kälte-Bereichen unterschieden. Aus den zwei Varianten des projizierten Endenergiebedarfs ergeben sich die sehr ambitionierte Strombedarfsentwicklung (1.362 TWh/a) sowie die ambitionierte Strombedarfsentwicklung (1.138 TWh/a).
Stromertragspotenzial Photovoltaik auf Dachflächen	Das Stromertragspotenzial für Photovoltaik im Innenbereich wurde auf Grundlage des Dachflächenpotenzials berechnet. Benötigt wurden hierzu der Wirkungsgrad der PV-Module sowie die standortbedingte PV-Strahlung. Anhand der Dachfläche und der Angaben über die benötigte Fläche der PV-Module für die Installation von 1 kWp wurde ermittelt, wie viel kWp Leistung auf einem Gebäude installiert werden kann. Anschließend wurde dies mit einer PV-Produktionskarte Deutschlands verschnitten. Die

	PV-Produktionskarte Deutschlands beinhaltet die Informationen über die produzierten kWh pro Jahr bei der Installation von 1 kWp
Stromertragspotenzial Wind	Überschlägige Berechnung des durchschnittlichen jährlichen Stromertrags einer Windenergieanlage. Der potenzielle Stromertrag einer Anlage an einem bestimmten Standort resultiert also aus dem Produkt der Stundenzahl ($8766 \text{ h} \triangleq 1 \text{ a}$), der relativen Häufigkeit der einzelnen Windgeschwindigkeiten und der Leistung der Anlage in Bezug auf die jeweilige Windgeschwindigkeit und der anschließenden Addition der Produkte der einzelnen Windgeschwindigkeiten.
Wirkfaktor	Zu den Wirkfaktoren zählen sämtliche Sachverhalte, Tätigkeiten und Eigenschaften eines Projektes, die bei Empfindlichkeit der Schutzgüter zu Auswirkungen auf Natur und Landschaft führen (RL 2001/42/EG). Sie wirken abhängig vom Energieträger in unterschiedlicher Art, Intensität und Dauer, so dass zwischen bau-, betriebs- und anlagebedingten Wirkfaktoren unterschieden wird. Als baubedingte Wirkfaktoren gelten alle Faktoren, deren Wirkung während der Bauzeit auftritt und zeitlich begrenzt ist (Baufelder, Material- und Maschinenstellplätze, Baustellenverkehr und -lärm oder Baubeleuchtung). Anlagebedingte Wirkungen gehen von den Vorhabensbestandteilen aus und wirken über die Bauphase hinaus. Zu den Vorhabensbestandteilen gehören sämtliche Anlagenteile, aber auch benötigte Zuwege und sonstige erforderliche Infrastruktur. Betriebsbedingte Wirkfaktoren sind Einflüsse, die nur (sequenziell) während des Betriebs der Anlage wirken

Zusammenfassung

Die Energiewende ist eine der zentralen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts – in Deutschland und weltweit. Sie zielt darauf ab, die internationalen Klimaschutzvereinbarungen (COP 21) einzuhalten und gleichermaßen die Energieversorgung nachhaltig und ohne den Einsatz von fossilen Brennstoffen sicherzustellen. Mit dem Klimaschutzplan 2050 des Bundes wird für 2050 eine vollständige Dekarbonisierung des Energiesektors angestrebt. Für den Ausbau der Energiegewinnung aus erneuerbaren Quellen ist unter anderem im Erneuerbare-Energien-Gesetz 2017 die Vorgabe formuliert, dass diese im Jahr 2050 mindestens 80 % des Strombedarfs decken; am Bruttoendenergieverbrauch wird ein Anteil von mindestens 60 % angestrebt. Bis zum Jahr 2050 müsste daher das Energieversorgungssystem nahezu vollständig auf erneuerbare Energien umgestellt werden.

Die Energiewende darf jedoch nicht auf Kosten anderer Nachhaltigkeitsziele gehen. Ebenso unerlässlich sind höhere Anstrengungen zum Schutz der biologischen Vielfalt, denn der Biodiversitätsverlust ist alarmierend. Internationale Abkommen wie die Biodiversitätskonvention (CBD) sowie die nationale Biodiversitätsstrategie müssen umgesetzt werden. Die grundsätzliche Notwendigkeit der Energiewende ist zwar unbestritten, die konkreten Wege sind jedoch hart umkämpft, vor allem weil die räumlichen Auswirkungen erheblich und für jeden sichtbar sind: So wehren sich Bürgerinnen und Bürger gegen den Bau von Leitungstrassen und Windenergieanlagen – besonders aufgrund von Lärmbelastungen und raschen, grundlegenden Landschaftsbildveränderungen. Ein nachhaltiger Umbau des Energieversorgungssystems muss also vor allem auch natur- und landschaftsverträglich unter Berücksichtigung der menschlichen Ansprüche gestaltet werden.

Den Herausforderungen einer solchen mensch- und naturverträglichen Energieversorgung können die heute etablierten Erzeugungspfade noch nicht genügen. Die starken Anreizmechanismen der vergangenen Jahre haben zwar zu einer hohen Dynamik im Ausbau der erneuerbaren Energien geführt, die Belange des Naturschutzes wurden aber nicht hinreichend in die Ausbaustrategie in die räumlich steuernden Vorgaben und Beteiligungsinstrumente integriert.

Zielsetzung der Studie

Um die Klimaschutzziele zu erreichen, muss der weitere Ausbau der erneuerbaren Energien bis 2050 in völlig neuen Größenordnungen stattfinden. Ein effizienter und naturverträglicher Umgang mit natürlichen Ressourcen und eine umfassende gesellschaftliche Einbettung sind daher erforderlich. Zielsetzung des Vorhabens „Naturverträgliche Energieversorgung aus 100 % erneuerbaren Energien 2050 – EE 100“ war es zu untersuchen, ob eine naturverträgliche Energiewende in Deutschland möglich ist und ob bzw. wie die Ziele der Energiewende und die Ziele des Naturschutzes miteinander verbunden werden können. Damit sollte eine erste Informationsbasis für eine naturverträgliche Gestaltung des Energiewendeprozesses geschaffen werden. Auf der Grundlage der Ergebnisse sollte diskutiert werden, welche Leitplanken bzw. Herausforderungen dafür wesentlich wären. Die Studie stellt einen ersten explorativen Schritt dar, der Entwicklungsperspektiven unter Naturschutzgesichtspunkten aufzeigt, aber in vielen Bereichen noch ergänzungsbedürftig ist und keine abschließenden Lösungskonzepte beschreibt.

Vorgehen und Annahmen der Szenarien

Zentrales Darstellungsmittel der Studie sind **Szenarien**, die einen Blick auf die Energieversorgung im Jahr 2050 ermöglichen sollen. Auch wenn sie naturgemäß mit Unsicherheiten behaftet sind, verdeutlichen sie potenzielle Entwicklungen sowie Ansatzpunkte für Handlungsoptionen. Um diese Handlungsoptionen scharf herauszuarbeiten wurde von ambitionierten Voraussetzungen z.B. bei Strombedarf und Umsetzung der Naturschutzziele ausgegangen, deren zukünftige Entwicklung stark von politischen Rahmensetzungen abhängig ist. In drei Szenarien wurde ermittelt, ob der Schutz von Mensch und Natur mit einer erfolgreichen Energiewende im Jahr 2050 in Einklang gebracht werden kann. Gemessen wird dies an zwei alternativen Endenergiebedarfsprojektionen für das Jahr 2050. Die Szenarien unterscheiden sich vor allem bezogen auf das angenommene technische Innovationsniveau und die Naturschutzanforderungen. Sie stellen Momentaufnahmen des Zustandes im Jahr 2050 dar, ohne dass Zeitreihen gerechnet oder konkrete Entwicklungspfade bis 2050 beschrieben wurden.

In den Szenarien wurden Risiken für Mensch und Natur berücksichtigt, indem nur Flächen für die Nutzung durch erneuerbare Energien vorgesehen wurden, auf denen keine relevanten Beeinträchtigungen erwartet werden. Dabei wurde der Fokus auf die Windkraft und Photovoltaik im Innenbereich gerichtet. Weitere Potenziale wie Geothermie, Wasserkraft oder ausgewählte Biomassepotenziale wurden überschlägig in die Szenarien aufgenommen.

Für die Ermittlung der mensch- und naturverträglichen Stromerzeugung wurde ein räumlicher Ansatz gewählt, da die verfügbare Fläche ein entscheidender begrenzender Faktor ist und sich erst an den spezifischen Standorten die Herausforderungen und Konflikte des Naturschutzes konkretisieren.

Folgende Annahmen gingen in die Szenarien ein. Sie können als Variablen behandelt werden, die sich in einer Weiterentwicklung der Szenarien anpassen lassen.

Zum Endenergiebedarf:

- Für das Jahr 2050 wurde angenommen, dass der Endenergiebedarf soweit möglich durch Elektrizität gedeckt wird. Grundlagen der Projektion waren u.a. die extrapolierte Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung, eine Elektrifizierungsrate im Verkehrssektor sowie eine Gebäudesanierungsrate berücksichtigt. Die Raten wurden bei der Berechnung der Varianten für den Endenergiebedarf unterschiedlich hoch angesetzt.
- Es werden zwei Varianten für den Endenergiebedarf projiziert: bei der sehr ambitionierten Endenergiebedarfsentwicklung werden 1.362 TWh/a benötigt, zusammengesetzt aus 818 TWh/a Strom, 229 TWh/a Umgebungswärme in elektrischen Wärmepumpen und ca. 315 TWh/a nicht elektrische Energie (Grundstoffe für nicht-elektrifizierbare Prozesse). Bei der ambitionierten Endenergiebedarfsentwicklung werden nicht alle Einsparziele erreicht, so dass ein höherer Strombedarf von 1.138 TWh/a (Endenergiebedarf: 1.682 TWh/a) projiziert wird.
- Ferner wurde davon ausgegangen, dass 50 % des Stromertrags gespeichert werden müssen, um Schwankungen im Tagesgang und Jahresverlauf auszugleichen. Aufgrund von Umwandlungs- und Speicherverlusten (ca. 50 %) würde dies bedeuten, dass sich der Strombedarf bei der sehr ambitionierten Endenergiebedarfsprojektion auf 1.227 TWh/a erhöht.

- Es wurde davon ausgegangen dass der Gebäudewärmebedarf im Jahr 2050 vollständig aus Umgebungswärme gedeckt wird. Der dabei entstehende Stromverbrauch wurde in die Abschätzung einbezogen.
- Es wird von einer energetischen Alleinversorgung Deutschlands ohne bilanzielle Netto-Energieimporte aus anderen Ländern ausgegangen.
- Die Berechnungen unterscheiden sich damit im Gesamtergebnis (einschließlich des Gebäudewärmebedarfs) nicht wesentlich von Annahmen in anderen veröffentlichten Projektionen.

Für den Schutz von Mensch und Natur:

- Für den Schutz von Mensch und Natur wurde davon ausgegangen, dass die Abstände zu Siedlung und Infrastrukturen eingehalten werden, dass alle Landschaften mit hoher oder mittlerer ästhetischer Qualität (im Bundesvergleich) von Windenergieanlagen freigehalten werden und dass die Ziele der deutschen Biodiversitätsstrategie im Jahr 2050 umgesetzt worden sind.
- Im Siedlungsbereich wird auf allen sinnvoll nutzbaren Dächern Photovoltaik eingesetzt. Der Außenbereich wird zunächst nur zur Windenergieerzeugung genutzt. Biomasse wird nur in Form von Rest – und Abfallstoffen als Brennstoff für den nichtelektrischen Energiebedarf berücksichtigt. Eine direkte energetische Nutzung von Energiepflanzen geht wegen deren vergleichsweise sehr geringen Flächen-Energieeffizienz nicht in die Szenarien für 2050 ein.
- Die Belange der Siedlungsgestalt (u. a. Denkmalschutz) oder der sozialen Gerechtigkeit und Teilhabe an der Energieerzeugung konnten noch nicht berücksichtigt werden. Ebenfalls fehlt die ökonomische Analyse in diesen ersten explorativen Szenarien, bei denen speziell die Naturschutzansprüche differenziert betrachtet wurden.
- In bestimmten Feldern wie z.B. dem Energieimport, der Nutzung von Gebieten mittlerer Empfindlichkeit, Geothermie oder möglichen Offshore Windenergieerträgen wurden die Potentiale noch nicht oder mit konservativen Annahmen in die Projektionen miteinbezogen. Dadurch ergeben sich weitere Optionen der Energieerzeugung, die in den bisherigen Betrachtungen aufgrund von Unsicherheiten in den Datensätzen oder weil die Naturverträglichkeit im Einzelfall geprüft werden muss, zunächst nicht berücksichtigt wurden. Diese „Reserven“ für die Zielerreichung in 2050 wurden überwiegend noch nicht quantifiziert.

Die Szenarien sind somit erste explorative Zukunftsbilder, an denen nun neue und weitere noch nicht berücksichtigt Eingangsziele und -voraussetzungen hinsichtlich ihrer Eignung getestet werden könnten. Bis dato wurden auch noch keine ökonomische Betrachtung der Szenarien durchgeführt.

Vorgehen

Mittels flächenbasierter GIS-Analysen wurden diejenigen Bereiche in Deutschland identifiziert, die für eine Nutzung durch erneuerbare Energien geeignet sind (geringer Wert der Schutzgüter und geringe Empfindlichkeit gegenüber bau-, betriebs- und anlagenbedingten Wirkungen der Energieerzeugungsanlagen). Anschließend wurde das Stromertragspotenzial auf diesen Flächen berechnet.

Durch die Gegenüberstellung von potenzieller naturverträglicher Stromerzeugung und dem zukünftigen Strombedarf, wird in den Szenarien offensichtlich, welche Szenarioannahmen zu einer möglichen Versorgungslücke oder einem bilanziellen Überschuss führen könnten. Zu-

dem wurde beispielhaft analysiert, wie sich die deutlich steigende Bedeutung des Stroms auf die Verteilnetzebene auswirkt.

Auf Basis dieser Ergebnisse wurden Handlungsoptionen abgeleitet, die bereits heute umgesetzt werden können.

Ergebnisse

In **Szenario I** (vgl. Tab. 1) ergibt sich für das Zieljahr 2050 ein mensch- und naturverträgliches Gesamtstromertragspotenzial von 1.023 TWh/a. Den größten Anteil am potenziellen Strommix macht Photovoltaikstrom mit 54 % aus. Das mensch- und naturverträgliche Stromertragspotenzial aus Onshore-Windenergieanlagen hat einen Anteil von 18 %, hinzu kommen 14 % Stromertragspotenzial von bereits heute genutzten Windenergieanlagenstandorten sowie 7 % aus der Offshore-Windenergie.

Um bei hohem Aufkommen von erneuerbaren Energien einen Transport der Leistung von Norddeutschland in den Süden sicherzustellen, sind weitere Leitungsbauten im Übertragungsnetz notwendig. Doch auch auf Verteilnetzebene muss ein Ausbau von Netzstationen und Leitungen im Umfang von 10 bis 20 % erfolgen. Ein intelligenter Netzbetrieb (z. B. durch den Einsatz von dezentralen Spannungsregelungen) und Batteriespeicher können den konventionellen Netzausbau deutlich reduzieren.

In **Szenario II** steigt das mensch- und naturverträgliche Gesamtstromertragspotenzial auf 1.363 TWh/a (vgl. Tab. 1). Der Anteil von Solarenergie am potenziellen Strommix liegt aufgrund des erhöhten Wirkungsgrades der Module bei 67 % (vgl. Tab. 1). Der Einsatz von leistungsstärkeren Windenergieanlagen erhöht potenziell die Erträge der einzelnen Anlagen. Die größeren Masten verstärken allerdings die Umweltwirkungen, so dass ein im Vergleich zu Szenario I geringerer Flächenanteil als mensch- und naturverträglich nutzbar eingestuft wurde.

Um zu illustrieren, wie sich der Einsatz innovativer Technologien auf das mensch- und naturverträgliche Stromertragspotenzial auswirken würde, und um die Variationsmöglichkeit des Modells aufzuzeigen, werden in **Szenario III** verschiedene Windenergieanlagentypen kombiniert. Durch deutlich effektivere und standortangepasste Anlagen ist eine merkbar höhere mensch- und naturverträgliche Stromerzeugung grundsätzlich möglich, weil mehr Fläche genutzt werden kann. Das Ertragspotenzial von Windenergieanlagen an Land kann sich dadurch auf 233 TWh/a erhöhen (vgl. Tab. 1).

Tab. 1: Übersicht über die Stromertragspotenziale der betrachteten Energieträger in den Szenarien I–III

Energieträger	Szenario I	Szenario II	Szenario III
Stromertragspotenzial Windenergie auf See	68 TWh/a	113 TWh/a	113 TWh/a
Windenergie an Land: mensch- und naturverträgliches Stromertragspotenzial	186 TWh/a	122 TWh/a	233 TWh/a
Windenergie an Land: bestehende Anlagen	142 TWh/a	142 TWh/a	142 TWh/a
Stromertragspotenzial Photovoltaik im Innenbereich	553 TWh/a	912 TWh/a	912 TWh/a
Wasserkraft	24 TWh/a	24 TWh/a	24 TWh/a
Geothermie	50 TWh/a	50 TWh/a	50 TWh/a
Gesamtstromertragspotenzial	1.023 TWh/a	1.363 TWh/a	1.474 TWh/a

Das menschen- und naturverträgliche Stromerzeugungspotenzial der Szenarien II und III wäre ausreichend, um auch unter Berücksichtigung der Speicherverluste in Höhe von 50 % den sehr ambitioniert angenommenen Strombedarf von 818 TWh/a (+409 TWh/a Stromspeicherung) im Jahr 2050 abzudecken (vgl. Abb. 1).

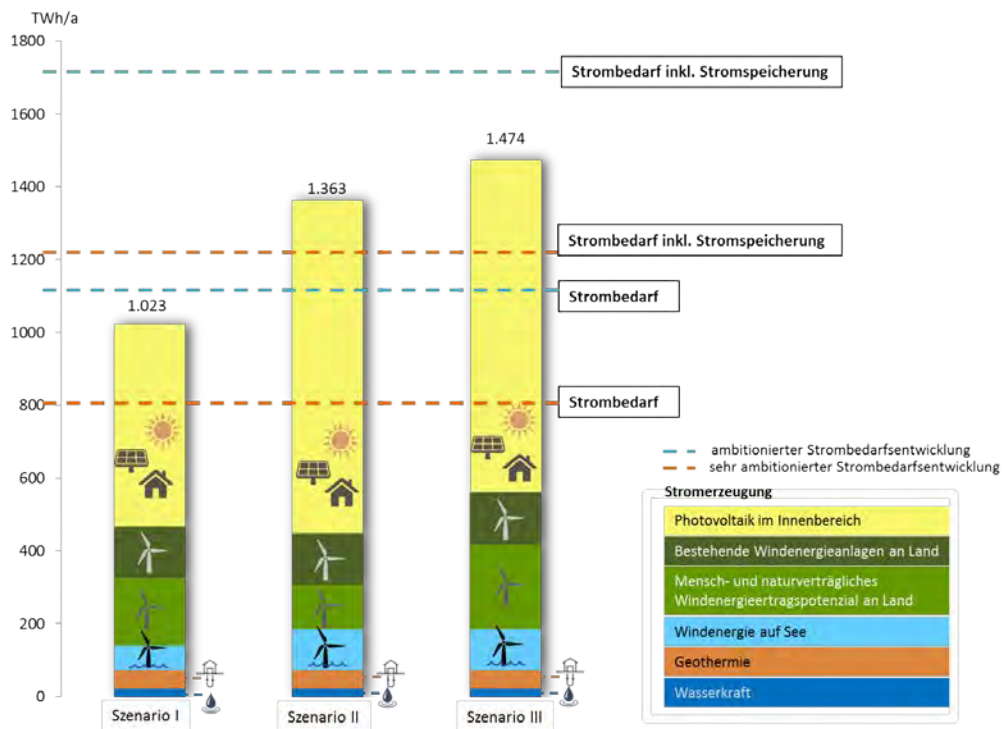


Abb. 1: Bilanzierung des naturverträglichen Stromerzeugungspotenzials und des Strombedarfs der Bundesrepublik Deutschland in den Szenarien I–III

Zuzüglich zum Strombedarf muss der nichtelektrische Energiebedarf (315 TWh/a) gedeckt werden. Hierfür können biogene Rest- und Abfallstoffe genutzt werden. Legt man derzeit anfallende Mengen und naturschutzkonforme Primär-Quellen der Abfallstoffe zu Grunde ergibt sich ein geschätztes Potenzial von 60 TWh/a. Die verbleibenden 255 TWh/a können in Power-to-X-Verfahren aus Strom hergestellt werden. Bilanziell wird hierfür der in den Szenarien ermittelte Stromüberschuss eingerechnet. Aufgrund der Umwandlungsverluste des Power-to-X von ca. 50 % wären hierfür weitere 510 TWh/a Strom notwendig. Ein solcher Überschuss wurde in keinem der drei Szenarien ermittelt (vgl. Abb. 2).

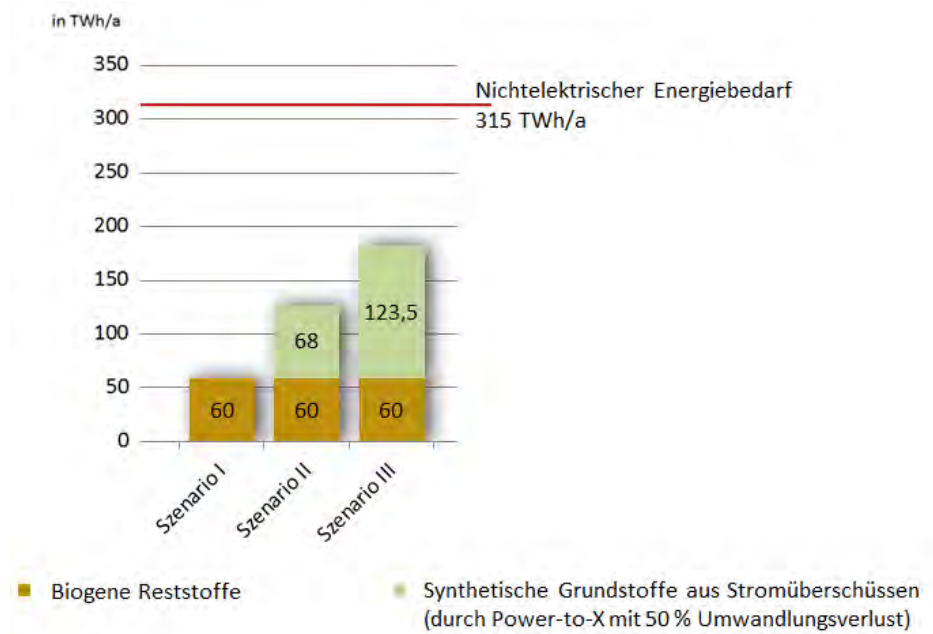


Abb. 2: Potenziale zur Deckung des nichtelektrischen Energiebedarfs in den Szenarien I-III (bei sehr ambitionierter Strombedarfsentwicklung und unter Berücksichtigung der Umwandlungsverluste)

Reserven

Bei Berücksichtigung der Umwandlungsverluste durch Speicherung und PtX-Verfahren sind die mensch- und naturverträglichen Stromertragspotenziale aller drei Szenarien nicht ausreichend um den projizierten Bedarf in 2050 zu decken. Ist eine technische Lösung zur Reduzierung der Umwandlungsverluste nicht möglich, bestehen **Reserven** der Stromproduktion. Dies sind weitere Optionen der Energieerzeugung, die in den bisherigen Betrachtungen aufgrund von Unsicherheiten in den Datensätzen oder weil die Naturverträglichkeit im Einzelfall geprüft werden muss, zunächst nicht berücksichtigt worden.

Eine der Reserven der Onshore-Windenergie wurde für alle Szenarien bereits gerechnet, indem die simulierten Abstände zu Siedlungen verkleinert wurden. Diese waren im Modell zunächst höher als in der derzeitigen Planungspraxis angesetzt worden, um Unsicherheiten bei den Berechnungsverfahren und über Lärmbelastungen hinausgehenden z. B. visuellen Beeinträchtigungen Rechnung zu tragen. Würden die Berechnungen allein auf Grundlage der Abstandsregelungen nach TA-Lärm durchgeführt, stünden z. B. in Szenario I weitere 155 TWh/a Stromertragspotenzial zur Verfügung, in Szenario II ca. 266 TWh/a und in Szenario III rund 307 TWh/a. Rein bilanziell betrachtet könnte somit in Szenario III (Gesamtstromüberschuss: 554 TWh/a) auch der nichtelektrische Energiebedarf über Power-to-X gedeckt werden (vgl. Abb. 3).

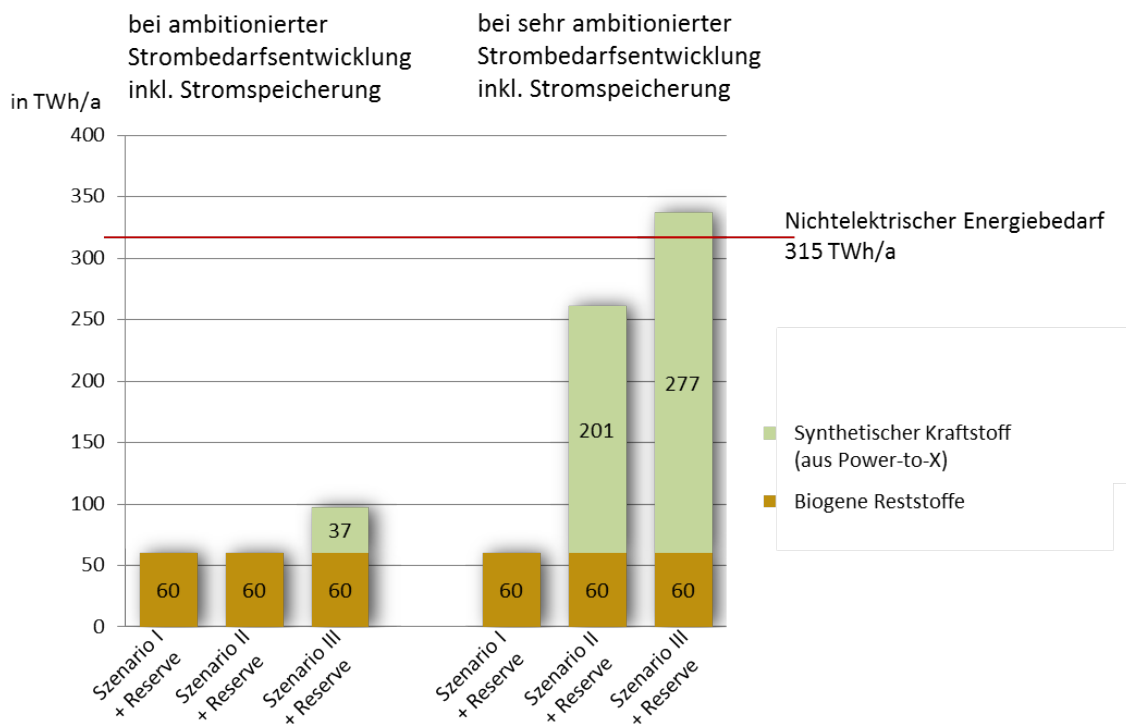


Abb. 3: Potenzial zur Deckung des nichtelektrischen Energiebedarfs in den Szenarien I-III unter Berücksichtigung der Windenergiereserven (bei ambitionierter und sehr ambitionierter Strombedarfsentwicklung und unter Berücksichtigung der Umwandlungsverluste)

Als weitere Reserve besteht bis zum Jahr 2050 noch ein über die in dieser Studie getroffenen Annahmen hinaus gehendes technisches Innovationspotenzial, um die Anlagen menschen- und naturverträglich auszugestalten und somit die nutzbare Fläche für die Energieproduktion zu erhöhen. Im Bereich der Offshore-Windenergie und der Geothermie wurde noch nicht das gesamte voraussichtlich nutzbare Potential einbezogen. Ferner können weitere Solarpotenziale und die Nutzung von Flächen mittlerer Empfindlichkeit unter Auflagen genutzt werden. Schließlich sind auch bisher nicht quantifizierte Energieimporte aus dem Ausland möglich, wenn gewährleistet wäre, dass diese unter ähnlich anspruchsvollen Nachhaltigkeitskriterien erzeugt würden. In der Summe ergibt dies ein erhebliches, bisher in den Szenarien nicht berücksichtigtes Reserveenergieertragspotenzial.

Strategische Handlungsoptionen

Mithilfe der Szenarien konnte verdeutlicht werden, dass eine menschen- und naturverträgliche Energiewende machbar ist, selbst wenn einige der ambitionierten Annahmen nicht erfüllt werden. Es wird ebenfalls deutlich, dass politische Rahmensetzungen und ein gesellschaftlicher Aufbruch notwendig sind, damit die Energiewende nachhaltig verläuft und bis 2050 erreichbar ist. Die Annahme eines hohen Schutzniveaus einerseits und einer hohen Umsetzungsdynamik bei Bürgerinnen und Bürgern, Wissenschaft und Industrie andererseits dient dazu, die Entwicklungsrichtung sowie die Breite und Dringlichkeit der vielfach schon heute einzuleitenden Umsetzungsmaßnahmen zu verdeutlichen.

So sollten auf Bundesebene die Voraussetzungen für eine naturverträgliche Umsetzung der Energiewende auf Landes-, Regions- und Gemeindeebene geschaffen und die Rahmenbe-

dingungen für alle Bausteine der Energiewende verbessert werden. Dazu gehören z. B. die Voraussetzungen für die Entwicklung von Erzeugungs- oder Speichertechnologien sowie – hier im Vordergrund stehend - die Sicherstellung einer naturverträglichen Entwicklung. Zu diesem Ziel können auf Bundesebene Informationen über die Flächenkulisse der Biodiversitätsstrategie bereitgestellt werden, um den Ländern eine abgestimmte Umsetzung der Ziele zu erleichtern. Quantitative Zielvorgaben zur Gesamtenergiebilanz von Räumen (z. B. in der Bundesraumordnung und/oder einer Fachplanung Energieerzeugung) würden als Voraussetzung für eine naturschutz-optimierte Allokation der Anlagen bei gleichzeitiger Erfüllung der Energieziele dienen. Ebenso sind solche quantitativen Vorgaben, gepaart mit einer Planungspflicht für die Länder, die Voraussetzung dafür, dass auf Regions- und Gemeindeebene die Handlungsziele, aber auch -spielräume deutlich werden. Nur so können Bürgerbeteiligungsprozesse stattfinden, bei denen die Gesamtziele nicht aus dem Blick geraten.

Damit ist ein Handlungsprogramm aus Naturschutzsicht skizziert, das mit anderen gesellschaftlichen Belangen abgestimmt werden muss und viele Umsetzungshürden zu bewältigen hat. Es verspricht aber, dass die Ziele der Energiewende erreicht und gleichzeitig Bevölkerung und empfindliche Naturressourcen geschützt werden. Die nun bereitstehenden Modelle können diesen Prozess unterstützen, indem Strategien in Bezug auf seine Naturverträglichkeit untersucht oder der Stand der Umsetzung bewertet werden.

Abstract

The transition to energy supply from renewables is one of the central challenges of the 21st century. It is a major component of any strategy for achieving the goals of the Paris climate protection agreement. However, energy transition must not be realized at the expense of other sustainability goals. The energy transition and the goals for biodiversity conservation must not be played off against each other. Greater efforts to protect biodiversity remain just as indispensable, because the biodiversity loss in Germany and around the world is alarming (TANENTZAP et al. 2015, BfN 2015). In no other problem area, the planetary boundaries are thus clearly exceeded (ROCKSTRÖM et al. 2009). Although the necessity of the energy transition is undisputed, the concrete ways are discussed intensively, above all because the spatial effects are significant and visible to all. Citizens resist the construction of grids and wind turbines in the vicinity of residential areas and in recreational landscapes. People fear noise pollution and a fundamental change in the landscape. A sustainable reorganization of the energy supply system should therefore be balanced and made compatible with nature and the landscape and take other human demands into account.

The aim of the study "Nature-compatible energy supply from 100% renewable energies 2050 (EE100)" was to investigate whether and how the goals of the energy transition could be combined with those of nature conservation and landscape conservation. Included was also the protection of the people from noise pollution and from impairments to the quality of the landscape. Furthermore, an information base for a nature-friendly design of the energy transition process should be created.

Methodology

In the study three scenarios or snapshots of 2050 have been projected, that allow a look into the future. Naturally, these snapshots are subject to uncertainties - but they clarify what is possible and point out possible options for action. All three scenarios could be labeled as extreme scenarios, taking as a starting point a very consequent protection of nature and humans against possible impairments by wind turbines or photovoltaic. The ambitious assumptions serve as a reference and guideline for the direction, which political action should take. Furthermore, realistic additional options for energy generation or saving have not yet been included in order to be able to maintain a reserve that enables flexible development.

The scenarios differ in terms of the assumed renewable energy technology. It was examined whether the high protection demands could be reconciled with a successful energy transition in 2050. In Germany the area is claimed by many interests at the same time and is thus taken as the limiting factor in the exploration of the energy transition process. The challenges of this process are manifested in the overlapping of the land-based calculated energy generation potential with the areas that are important for the protection of humans and nature.

The scenarios contain the following assumptions: The total energy demand in 2050 was calculated under ambitious assumptions concerning technical development and their use. Massive electrification is necessary if fossil energy sources are to be replaced. Therefore, as far as possible, energy demand has to be covered by electricity. For the year 2050 the calculations were based on an estimated demand for electrical energy of about 818 TWh. This demand considers population and economic development extrapolated according to the current state of knowledge, under ambitious assumptions about technical developments and their use. In addition, about 315 TWh of fuel (eg for aircraft, shipping, industrial processes, conservatively calculated on the basis of current techniques) are required. As a final energy de-

mand, which also includes the ambient heat (229 TWh) used in electrical heat pumps, a total of 1,362 TWh is assumed for Germany. Changes in behavioral or consumption patterns in electricity consumption are only indirectly taken into account, eg. for example, by assuming a comparatively slight increase in energy demand through economic growth. For the protection of humans and nature from noise emitted by the wind turbines and for protecting beautiful landscapes safety distances between vulnerable areas and wind turbines are implemented in the model. Productive agricultural area is spared for food production. In residential areas, photovoltaic systems are implemented on all reasonably usable roofs (according to exposure and inclination). The outdoor area is initially only used for wind power generation.

Results

The project has shown for Germany that energy supply can be ensured sustainably, without the use of fossil fuels in Germany and without breaching the requirements of protecting nature and human needs. As a result of the subsequent bilateral comparison of generation and demand, it becomes clear in the scenarios which scenario assumptions lead to a potential energy supply gap or to an energy surplus. A 100% human- and nature-compatible power supply including the coverage of the storage related conversion losses would be possible in the scenarios in which a technological development is assumed (Scenarios II and III). Thus, the potential for generating electricity that can be activated in a nature and landscape friendly way, with already existing and foreseeable technology, is sufficient to meet the estimated demand in 2050, both for electricity and remaining fuel demands. This target can also be met by taking into account transmission and conversion losses during electricity storage - albeit under the condition of ambitious reductions of energy demand until 2050. In 2050, the area used for wind power plants in the scenarios is only about 0.5% of Germany's land area. Excluded from energy production will be around 355.8 tsd. km².

For this purpose, it is necessary to expand network stations and lines especially at the distribution network level (medium and low voltage), addition to the expansion of the transmission network. Since photovoltaic electricity has a high share in the energy mix, in order to ensure supply in the winter at demand peaks of heat pumps and e-mobility, the extent of the expansion of the power lines is calculated in a local case study at about 10 % to 20 %. An intelligent network operation and battery storage can significantly reduce conventional grid expansion.

Reserves, which have been not been considered in the scenarios so far, are: The expected increase in the use of wind energy in the North Sea; open space photovoltaic plants, which could be implemented for instance on part of area currently occupied by energy crops; changes in lifestyle, which lead to reduction of energy demand and finally the import of electricity from surplus areas abroad, where energy may be produced more sustainably. Furthermore, reserves could also be calculated for the use of such areas, which, from a nature conservation point of view, only have a medium vulnerability and which can be developed with appropriate technology if local precautions and compensation are taken.

Finally, it has been demonstrated, that the established energy generation paths and instruments are not yet sufficient to meet the challenges of such a human and nature-friendly energy supply. Energy transition requires ambitious political frameworks for the planning of the energy system and rapid implementation of energy technology innovations..

A – AUSGANGSBEDINGUNGEN EINER MENSCH- UND NATURVERTRÄGLICHEN ENERGIEWENDE

1 Einleitung

1.1 Hintergrund: eine naturschutzgerechte Energiewende

Die Energiewende ist eine der zentralen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts – in Deutschland und weltweit. Sie zielt darauf ab, die internationalen Klimaschutzvereinbarungen (COP 21) einzuhalten und gleichermaßen die Energieversorgung nachhaltig und ohne Einsatz fossiler Brennstoffe oder Kernenergie sicherzustellen. „Energieversorgung“ umfasst dabei die Bereiche Strom- und Wärmeerzeugung, Verkehr, Energieübertragung, -verteilung und -speicherung. Die Ziele der COP 21 sehen für Deutschland eine Minderung des Klimagasausstoßes von „80 bis 95 %“ bis 2050 vor. Aus wissenschaftlicher Sicht sollte dazu angestrebt werden, das Energieversorgungssystem bis zum Jahr 2050 nahezu vollständig auf erneuerbare Energien (EE) umzustellen, da eine vollständige Reduktion der Emissionen in den nicht-Energie-Sektoren (z. B. chemische Industrie, Lachgasemissionen aus Düngung etc.) voraussichtlich schwieriger ist, als in den von der Energiewende erfassten Emissionsbereichen.

Die Energiewende darf jedoch nicht auf Kosten anderer Nachhaltigkeitsziele gehen. Ebenso unerlässlich wie die Energieumstellung sind stärkere Anstrengungen zum Schutz der biologischen Vielfalt. Der Biodiversitätsverlust ist global und in Deutschland alarmierend (STEFEN et al. 2015; vgl. auch TANENTZAP et al. 2015 sowie deutschlandweit BFN 2008). Die globalen Grenzen werden in diesem Problemfeld wie in keinem anderen überschritten (ROCKSTRÖM et al.). Internationale Abkommen wie die Biodiversitätskonvention (CBD) sowie die (per Kabinettsbeschluss verabschiedete) nationale Biodiversitätsstrategie (BMUB 2007) müssen umgesetzt werden. Letztere legt mit Bezug auf die Energiegewinnung aus erneuerbaren Energien fest, dass deren Erzeugung und Nutzung nicht zulasten der biologischen Vielfalt gehen darf. Hinzu kommt, dass die grundsätzliche Notwendigkeit der Energiewende zwar unbestritten ist, die konkreten Wege zu diesem Ziel sind jedoch umkämpft. Insbesondere die räumlichen Auswirkungen sind erheblich und für jeden sichtbar, was dazu führt, dass sich Bürgerinnen und Bürger gegen den Bau von Leitungstrassen und Windenergieanlagen in ihrer Wohnumgebung oder in Erholungslandschaften wehren. Konflikte entstehen vor allem aufgrund von Lärmbelastungen und starken Landschaftsbildveränderungen.

Dieser Herausforderung können die derzeit angewendeten Instrumentarien und Techniken noch nicht genügen. Die starken Anreizmechanismen der vergangenen Jahre, führten zu einer hohen Dynamik des Ausbaus der erneuerbaren Energien, wurden aber nicht in allen Fällen hinreichend durch Instrumente zur Minderung und Vermeidung negativer Wirkungen flankiert. Der nun anstehende weitere Ausbau der erneuerbaren Energien bis 2050, der in neue Größenordnungen vorstößt, muss sehr effizient mit den natürlichen Ressourcen umgehen und gesellschaftlich umfassend eingebettet werden, um eine nachhaltige Transformation zu erreichen. Ein nachhaltiger Umbau des Energieversorgungssystems muss also die Herausforderung meistern, die Energiewende „mensch- und naturverträglich“ zu gestalten. Angesichts der starken Nutzungskonkurrenzen um die Fläche in ländlichen wie urbanen Räumen bedeutet dies auch, dass die erneuerbaren Energien in höchstem Maße flächeneffizient ausgebaut werden müssen. Zudem gilt es zu bedenken, dass Deutschland rund 62 % des derzeitigen Endenergiebedarfs aus Einfuhren deckt, deren Nachhaltigkeit bisher nicht an

strengen Nachhaltigkeitskriterien geprüft wird (DESTATIS 2017). Der „Druck auf die Fläche“ würde also schon allein durch eine höhere Erzeugung im eigenen Land wachsen.

Ein intelligentes Konzept für die Energiewende in Deutschland sollte anstreben, diese Konflikte zu minimieren und die knappe Fläche sowie die öffentliche Förderung nachhaltig und effizient einzusetzen. Dafür wird eine zukunftsweisende Strategie benötigt, die gesellschaftliche Kräfte mobilisiert und den politischen, rechtlichen und finanziellen Rahmen dafür schafft.

In der jüngeren Vergangenheit haben sich verschiedene Studien damit beschäftigt, wie mögliche Entwicklungspfade aussehen können. Dabei haben sie sehr unterschiedliche Schwerpunkte gesetzt. Bisher liegt keine Studie vor, die ihr Hauptaugenmerk auf die Naturverträglichkeit der Entwicklung bis 2050 gelegt hat (vgl. Tab. 2):

Die Studie „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei der Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global“ des DLR (2012) beleuchtet die Naturverträglichkeit nur im Bereich der Nutzung von Biomassepotenzialen. Eigene Berechnungen oder Bewertungen werden dabei nicht durchgeführt, sondern Bezug genommen auf die „ökologisch verträglichen inländischen Potenziale“ bestehender Studien des BMU (2004, 2008). In diesen Studien wurden die Energiepotenziale aus Energiepflanzenanbau, sonstigen Biogassubstraten, Reststroh sowie forstlichen Rückständen oder der Biotoppflege unter Berücksichtigung von Naturschutz, Bodenschutz sowie Gewässerschutz berechnet. In die Studie des DLR werden diese Auswirkungen also nur indirekt aufgenommen.

Die PROGNOSE Studie (2014) „Entwicklung der Energiemärkte“ berücksichtigt die Naturverträglichkeit bei der Nutzung der Potenziale aus Biomasse und aus dem Fracking. Während das Energiepotenzial aus Fracking aufgrund der ökologischen Risiken aus der Betrachtung ausgeschlossen wurde, wird bei der Biomasse auf die begrenzte Verfügbarkeit von Anbaufläche und auf die Konkurrenz mit dem Naturschutz eingegangen. Diese Faktoren führen zu einer Einschränkung des nutzbaren Energiepotenzials.

Auch das Öko-Institut geht in seiner Studie „Klimaschutzszenario 2050“ (ÖKO-INSTITUT 2015) nur bei der Herleitung der Energiepotenziale von Biomasse auf die Naturverträglichkeit ein. Die Studie erwähnt dabei den Naturschutz, sieht das Potenzial von Anbaubiomasse aber vor allem abhängig von der zur Verfügung stehenden Fläche und der Erträge. Bei der zur Verfügung stehenden Fläche wird unter anderem auf die Konkurrenz mit dem Naturschutz hingewiesen, aber keine detaillierten Analysen durchgeführt.

Die UBA Studie „2050: 100 %, Energieziel 2050: 100 % Strom aus erneuerbaren Quellen“ (UBA 2010) berücksichtigt bei der Potenzialabschätzung mehrerer Energieträger naturschutzfachliche Belange. So wird von Freiflächen-Photovoltaik abgesehen und die Photovoltaiknutzung ausschließlich auf Dächer, Fassaden und versiegelte Flächen beschränkt. Berücksichtigt wird zudem keine Anbaubiomasse auf landwirtschaftlichen Flächen sondern lediglich die energetische Nutzung von Reststoffen. Bei der Abschätzung des Potenzials der Windenergie werden neben den Siedlungsflächen Wälder sowie weitere Flächen zum Schutz der Natur ausgenommen, dabei werden allerdings keine weitergehenden Entwicklungsziele des Naturschutzes berücksichtigt

Der Schwerpunkt der Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“ (UBA 2014) liegt auf dem Einsatz technischer Lösungen unter Berücksichtigung ökologischer und gesundheitlicher Grenzen. Die Grundlagen für die Berechnung der Energiepotenziale für Rest- und Abfallstoffe wurden den technischen Potenzialen des DLR-Basis Szenarios für das Jahr 2050 entnommen (DLR 2012) und diese um aus ökologischen Gründen nicht nutzbare Po-

tenziale reduziert. Hinzu kommen Zuschläge die aus der Nutzung von Material aus Naturschutzmaßnahmen zu erwarten sind. Die Potenziale der Anbaubiomasse werden für das Jahr 2050 nicht mehr berücksichtigt, da diese anderer stofflicher Nutzung zugeführt werden. Das UBA macht Aussagen zum Potenzial der Wasserkraft, welches als bereits ausgeschöpft angesehen wird. Die zusätzliche Nutzung naturbelassener Flüsse wird aufgrund ökologischer Bedenken ausgeschlossen. Bei der Potenzialabschätzung von Windenergie wird u.a. der Artenschutz berücksichtigt und pauschale Abzüge im nutzbaren Potenzial vorgenommen.

Tab. 2: Berücksichtigung der Naturschutzaspekte in anderen Energieszenarien (UBA 2010, DLR 2012, Prognos 2014, UBA 2014, Öko-Institut 2015)

	UBA 2010 2050: 100%	DLR 2012 Langfristszenarien	Prognos 2014 Entwicklung der Energiemärkte	UBA 2014 Treibhausgasneutrales Deutschland	Öko-Institut 2015 Klimaschutzszenario 2050
Wind an Land	Ausschlusskriterien für Naturschutz-, Wald- und Siedlungsflächen	Keine Angaben	Keine Angaben	- Nach UBA (2013): Potenzial der Windenergie an Land - inkl. WKA in Wald = 2.900 TWh/a - U.a. Berücksichtigung des besonderen Artenschutzes: 1.000 TWh/a	Keine Angaben
Sonne	- Kein Freiflächen-PV - Nur Dach, Fassade, Versiegelte Flächen	Keine Angaben	Keine Angaben	Keine Angaben	Keine Angaben
Biomasse	- Keine Anbaubiomasse - stoffliche Nutzung hat Vorrang	Ökologisch „verträgliche“ inländische Potenziale nach BMU 2004 und BMU 2008	- Ab 2020 bleibt die Erzeugung nahezu konstant - Ein weiterer Zuwachs der Stromerzeugung aus Biomasse wird durch die begrenzte Verfügbarkeit von Anbauflächen und Nutzungskonkurrenzen - mit anderen Sektoren eingeschränkt.	- Keine Anbaubiomasse - Konkurrenz zu stofflicher Nutzung sollte vermieden werden - Potenziale ergeben sich aus den technischen Potenzialen des DLR-Basiszenarios für 2050, - abzüglich der Beiträge, die aus ökologischen Gründen auszuschließen sind - zzgl. Beiträge, die Naturschutzmaßnahmen erwarten lassen	Verfügbarkeit von Biomasse aus Abfall- und Reststoffen durch die zukünftigen Massenströme und alternative Verwendungen bestimmt
Wasser	Keine Angaben	Keine Angaben	Keine Angaben	- Potenzial ausgeschöpft - Naturbelassene Flüsse wegen ökologischer Bedenken ausgeschlossen	Keine Angaben

Die hier vorgelegte Studie EE100 ist ein erster Ansatz, die Wissenslücke im Bereich der Naturverträglichkeit des Ausbaus erneuerbarer Energien zu schließen. Sie stellt den Schutz von Mensch und Natur bei der Ermittlung der Ausbaupotenziale in den Vordergrund und bezieht dabei auch die Entwicklungsziele des Naturschutzes gemäß vorliegender Biodiversitätsstrategien ein.

1.2 Ziel des Vorhabens: Wissen für eine mensch- und naturverträgliche Gestaltung der Energiewende bereitstellen

Ziel des Vorhabens war es, die Möglichkeiten einer mensch- und naturverträglichen Energiewende aufzuzeigen. Dazu sollten unter anspruchsvollen Nachhaltigkeitsvoraussetzungen wesentliche Stellschrauben und Zukunftspfade einer Energieversorgung aus 100 % erneuerbaren Energien im Jahr 2050 identifiziert werden.

Dabei wurde davon ausgegangen, dass eine vollständige Versorgung aus erneuerbaren Energien allein auf der deutschen Fläche realisiert werden müsste. Diese vollständige Eigenversorgung ist nicht im Sinne einer echten Autarkie zu verstehen, sondern im Sinne eines „bilanziellen Ausgleichs“ im Rahmen des europäischen Strommarktes. Dennoch unterscheiden sich die Szenarien in EE100 mit dieser weitgehenden Annahme von den meisten

anderen Projektionen. Diese enthalten in der Regel Netto-Energieimporte aus Ländern, die vergleichsweise bessere Bedingungen z. B. für die Erzeugung von Solarenergie aufweisen. Die angenommene Beschränkung auf das Energieerzeugungspotenzial in Deutschland in den hier gerechneten explorativen Szenarien, ist einem konsequenten Nachhaltigkeitsansatz geschuldet: Zunächst soll ermittelt werden, was in Deutschland selbst nachhaltig und in eigener Verantwortung erzeugt werden kann. Erst in zweiter Linie würde in der Logik dieses Vorgehens auf Importe zurückgegriffen. Für diese müsste aber zunächst untersucht werden, inwieweit sie den strengen Nachhaltigkeitsanforderungen gerecht werden, die in dieser Studie für die deutsche Energiewende angenommen wurden.

Bei allen Zukunftsprojektionen sollte gewährleistet werden, dass das ambitionierte Ziel einer 100%igen Versorgung durch erneuerbare Energien nicht auf Kosten der Lebensqualität der Menschen, der Biodiversität oder der Flächen für die Nahrungsmittelerzeugung geht (vgl. Abb. 4).



Grafikgrundlage: Tanja Wehr

Abb. 4: Ziele der Studie „Naturverträgliche Energieversorgung aus 100 % erneuerbaren Energien 2050“

Diese Festlegungen erforderten auf der einen Seite die Auseinandersetzung mit zukünftigen Technologien und Optimierungspotenzialen im Energiesektor. Auf der anderen Seite galt es, die höchst anspruchsvollen Ziele des Naturschutzes und die Anforderungen an den Schutz des menschlichen Wohlbefindens aufzugreifen. Abschließend sollten aus den Ergebnissen erste Vorschläge für politische Handlungsoptionen zur Umsetzung einer menschen- und naturverträglichen Energiewende abgeleitet werden.

Die Szenarien sind nicht als Leitbilder zu verstehen sondern als besonders menschen- und naturschutzkonforme, risikoarme Varianten eines Spektrums von Entwicklungsmöglichkeiten

bis 2050 (vgl. Abb. 5). Die sehr klaren und anspruchsvollen Zielannahmen sollten dazu dienen, die Konsequenzen einer ambitionierten Integration von Klima- und Naturschutz für politische Handlungsoptionen aus Sicht des Naturschutzes herauszuarbeiten, ohne dass deren Umsetzbarkeit in der politischen Aushandlung oder andere Belange wie Kosten schon substanziell berücksichtigt wurden. Schließlich sollte das entwickelte Modell in der Zukunft die Berechnung weiterer Varianten mit mehr oder weniger hohen Naturschutzanforderungen ermöglichen.

Die Studie war von Beginn an als ein erster explorativer Schritt konzipiert. Angesichts der kurzen Bearbeitungszeit war es nicht zu vermeiden, dass die Ergebnisse in vielen wichtigen Bereichen unvollständig bleiben. Ergebnisse und Empfehlungen sind daher als Grundlagen für die Diskussion einer naturverträglichen Ausgestaltung des Energiewendeprozesses zu verstehen, nicht als Grundlage für eine konkrete Planung.

Das Vorhaben ist dabei konsequent auf das Zieljahr 2050 ausgerichtet (im Sinn einer alternativen Zukunft) und betrachtet nicht näher den Pfad dorthin, kann aber dazu benutzt werden, einen solchen Pfad mit Etappenzielen in einem Prozessszenario zu entwerfen (vgl. Abb. 5).

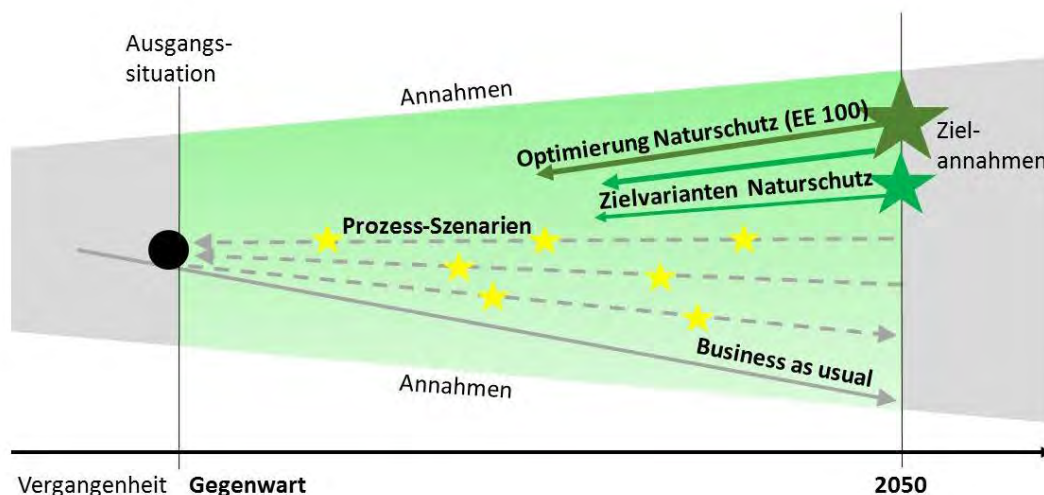


Abb. 5: Projektionsmöglichkeiten für die Transformation des Energiesystems bis 2050

Für die Gestaltung der Energiewende werden darüber hinaus sowohl die Berücksichtigung der Ausgangsbedingungen in der Gegenwart, die Projektion möglicher Pfade und Zeitreihen bis zum Ziel als auch die hier im Vordergrund stehenden Ziel-Projektionen mit ihren Konsequenzen für die Energiebedarfsentwicklung, die technische Innovation sowie den Netz- und Speicherausbau benötigt. Die Studie EE100 bezieht den Prozess dieser Transformation nur insofern ein, als dass Handlungsoptionen für politischen Rahmenbedingungen entwickelt werden, die eine Berücksichtigung des Naturschutzes ermöglichen und damit den Weg zu einem naturschutzkonformen Energiesystem in 2050 ebnen könnten. Ferner führen die sehr ambitionierten und z.T. sehr vorsichtigen Annahmen zum Naturschutz und Energieertragspotenzial dazu, dass auf dem Weg nach 2050 noch viele Spielräume bestehen zum Ziel zu gelangen - auch wenn Bedarfs- oder Allokationsziele teilweise verfehlt werden.

1.3 Übersicht über das Vorgehen

Der Endenergiebedarf im Jahr 2050 war die Kenngröße, anhand derer gemessen wurde, ob ausreichend Energie mensch- und naturverträglich erzeugt werden kann. Er setzt sich aus dem Strombedarf, dem nichtelektrischen Energiebedarf sowie dem Wärmebedarf zusammen (vgl. Kap. 2). Der Fokus der Studie lag zunächst auf dem Strombedarf, da für das Jahr 2050 ein überwiegend strombasiertes Energiesystem und damit eine Strombedarfssteigerung angenommen wird, bei einem insgesamt sinkenden Endenergiebedarf. Es wurde jedoch ebenfalls ein verbleibender Bedarf nach nichtelektrischen Brennstoffen berücksichtigt.

Ob der für 2050 projizierte Endenergiebedarf gedeckt werden kann, wurde in drei Szenarien getestet, die aufzeigen, wie viel Energie mit verschiedenen Techniken unter unterschiedlich ausgelegten mensch- und naturverträglich Bedingungen erzeugt werden kann (vgl. Abb. 6). Die Szenarien wurden bewusst sehr anspruchsvoll gestaltet, um die Richtung der notwendigen politischen Interventionen klar herausarbeiten zu können.

Für die Berechnungen der Szenarien wurde ein räumlicher Untersuchungsansatz gewählt, da die verfügbare Fläche in Deutschland ein entscheidender Faktor der Energiewende sein wird und sich erst anhand der spezifischen Flächeneigenschaften an einem Standort die Herausforderungen und Konflikte konkretisieren. In den bisher vorgelegten Szenarien wurde ein konsequenter Vermeidungsansatz verfolgt, um das Konfliktpotenzial zwischen Energiewende und den menschlichen sowie Naturschutzansprüchen gering zu halten. Nach Abzug verschiedener Schutzanforderungen wurde das verfügbare Flächenpotenzial mit dem dort flächenspezifisch vorhandenen Stromertragspotenzial verschiedener Erzeugungstechnologien verknüpft. Hierfür wurde ein Modell entwickelt, das verschiedene Varianten der Schutzansprüche, der eingesetzten Techniken und des resultierenden naturverträglichen Stromertragspotenzials berechnet. Damit einen Beitrag zur Diskussion unterschiedlicher Schwerpunktsetzungen und deren Integration mit anderen gesellschaftlichen Zielen liefert. Das Modell wurde mit dem Programm ArcGIS 10 als Desktop-Lösung umgesetzt und ist so angelegt, dass die Eingangsdaten zur Berechnung verschiedener Szenarien laufend aktualisiert, variiert und entsprechend verschiedener Politikpfade angepasst werden können. Die Methodik hat damit über die Projektlaufzeit hinaus Bestand und kann zu einem Instrument der kontinuierlichen Erfolgsmessung und Entscheidungsunterstützung ausgebaut werden.



Abb. 6: Schematische Darstellung zum Ablauf der Szenarienentwicklung des Projektes EE100 und die Ableitung des Handlungsbedarfs

Ausgehend von dem erreichten Zielzustand der vollständigen erneuerbaren Energieversorgung im Jahr 2050, wurden heutige Handlungsoptionen zu seiner Erreichung rückblickend abgeleitet. Dieses Vorgehen ermöglicht im Gegensatz zu anderen Szenario-Methoden, die eine Fortschreibung des gegenwärtigen Trends in Richtung zunehmender Anteile regenerativer Energien in Form von Prognosen verfolgen, die Identifizierung der zur Zielerreichung notwendigen bzw. möglichen Entwicklungspfade. Abhängigkeiten zwischen dem Ausbau von erneuerbaren Energien, dem Netzausbau und den Auswirkungen auf Mensch und Natur wurden dargestellt und können nun prinzipiell bei Vorliegen ausreichender Netzdaten unter verschiedenen Eingangsbedingungen für das Jahr 2050 aber noch nicht als Prozessszenarien modelliert werden.

Um den Aspekt der Naturverträglichkeit und Flächeneffizienz bei der Formulierung des möglichen Ausbaus operationalisieren zu können, standen besonders die Wirkungen bzw. Risiken für die Schutzgüter Biodiversität und die Qualität der Landschaft für die menschliche Erholung - einschließlich Lärmfreiheit - im Vordergrund. Auf dieser Grundlage wurde das Beeinträchtigungsrisiko der Flächen im Falle einer Belastung durch EE- Anlagen definiert. Dabei wurde nach dem Prinzip eines modifizierten DPSIR- Ansatzes (EUROPÄISCHE UMWELTAGENTUR 1999) vorgegangen. Die literaturbasierte Risikoeinschätzung ist methodisch die Grundlage für die Bewertung des „Raumwiderstands“. Dieser wurde auf Grundlage der Empfindlichkeit der Schutzgüter gegenüber verschiedenen Belastungen durch EE-Anlagen (je nach Belastungsstärke unterschiedliches Risiko) sowie des Wertes der Schutzgüter (und damit der Relevanz einer möglichen Beeinträchtigung) auf einer vierstufigen Skala klassifi-

ziert (vgl. Abb. 7, Kap. 6.1). Auf dieser Grundlage konnten in der GIS-Analyse die für die naturverträgliche Erzeugung von Energie geeigneten Bereiche (mit dem geringsten Raumwiderstand) räumlich identifiziert werden.

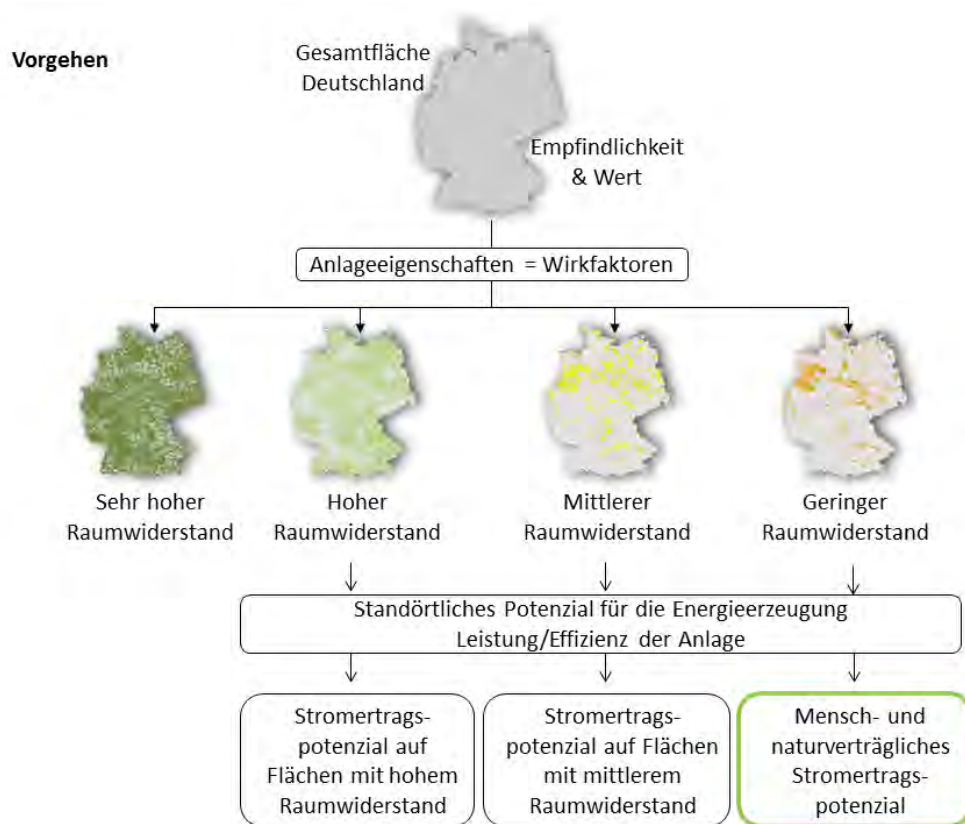


Abb. 7: Vorgehen bei der Ermittlung des mensch- und naturverträglichen Stromertragspotenzials

Das anschließend errechnete Stromertragspotenzial ergibt sich aus den natürlichen Gegebenheiten am Standort, wie z. B. Solarstrahlung und Windhöffigkeit, und den technischen Eigenschaften der gewählten Energieerzeugungsanlagen (vgl. Kap. 4.1). Schwerpunkt der Bearbeitung war die Ermittlung der für eine mensch- und naturverträgliche Windenergienutzung geeigneten Flächen. Die Nutzung von Photovoltaik erfolgt im Modell zunächst ausschließlich auf Dachflächen im Innenbereich, da dieses Potential prioritär ausgeschöpft werden sollte bevor eine Nutzung des Freilandes erwogen wird.

Die Berechnung des standörtlichen Stromertragspotenzials auf den für Windenergie und Photovoltaik geeigneten Flächen erfolgte in drei Szenarien, die sich sowohl hinsichtlich der angenommenen Ziele des Naturschutzes als auch der angenommen technologischen Weiterentwicklungen bis zum Jahr 2050 unterscheiden (vgl. Kap. 7). Die Erträge anderer erneuerbarer Energieträger wurden aktuellen Studien über den Ausbau und das Potenzial erneuerbarer Energien entnommen und an die getroffenen Annahmen zu den technischen Entwicklungen angepasst (vgl. Kap. 7.1).

Die aus den Szenarien ermittelten drei Varianten des mensch- und naturverträglichen Stromertragspotenzials wurden abschließend dem für das Jahr 2050 projizierten Strombedarf bilanziell gegenübergestellt. Damit wurden entsprechend der verschiedenen Szenarioan-

nahmen jeweils bilanzielle Versorgungslücken bzw. Überschüsse offensichtlich (vgl. Kap. 8.4). Schließlich wurden die Möglichkeiten zur Deckung des nichtelektrischen Energiebedarfs untersucht, die einerseits durch die stoffliche Nutzung von biogenen Reststoffen, andererseits durch die Produktion synthetischer Brennstoffe (PtX) aus den bilanziellen Stromüberschüssen oder aus der Nutzung zunächst nur überschlägig berechneter Reserven der Energieproduktion (vgl. Kap. 8.5) erreicht werden kann.

In bestimmten Feldern wie z.B. dem Energieimport, der Nutzung von Gebieten mittlerer Empfindlichkeit, Geothermie oder möglichen Offshore Windenergieerträgen wurden die Potentiale noch nicht oder mit konservativen Annahmen in die Projektionen miteinbezogen. Dadurch ergeben sich weitere Optionen der Energieerzeugung, die in den bisherigen Betrachtungen aufgrund von Unsicherheiten in den Datensätzen oder weil die Naturverträglichkeit im Einzelfall geprüft werden muss, zunächst nicht berücksichtigt wurden. Auf dieser Grundlage wurden Handlungsoptionen aufgezeigt, um die Umsetzung einer mensch- und naturverträglichen Energiewende im Jahr 2050 zu erreichen (vgl. Kap. 9).

Die Erarbeitung erfolgte über eine Laufzeit von 19 Monaten interdisziplinär (vgl. Abb. 8) in Zusammenarbeit des Instituts für Umweltplanung der Leibniz Universität Hannover (IUP) mit dem Institut für Elektrische Energiesysteme Fachgebiet Elektrische Energieversorgung der Leibniz Universität Hannover (IfES) und der Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH (CUTEC).

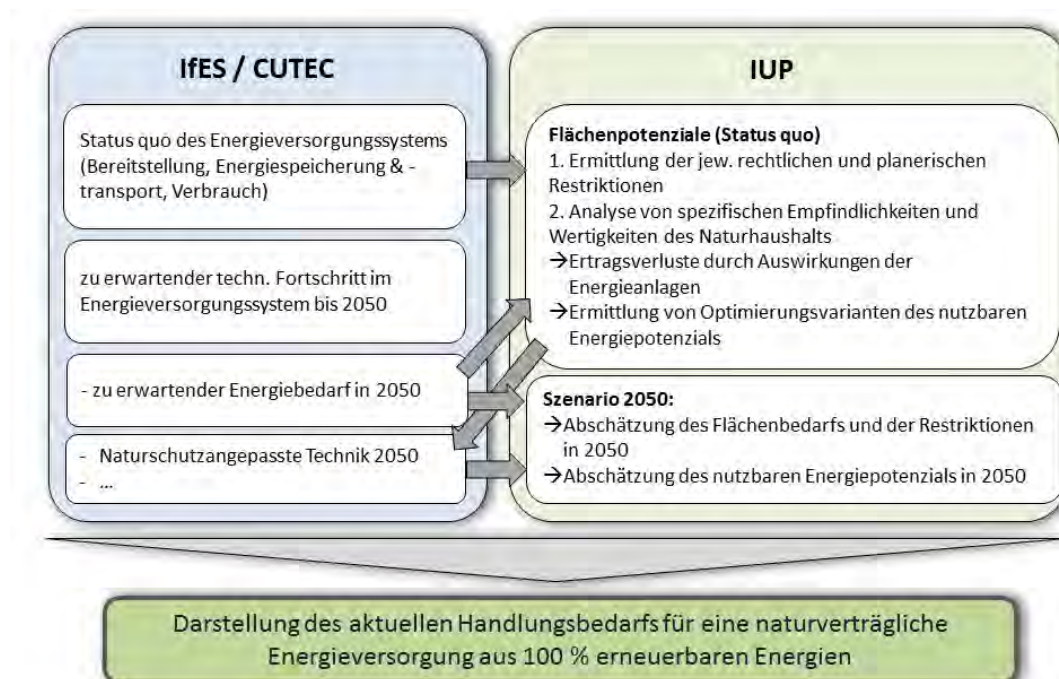


Abb. 8: Zusammenarbeit der Projektpartner CUTEC GmbH, IfES und IUP (beide Leibniz Universität Hannover)

Die Inhalte wurden mehrfach mit der projektbegleitenden Arbeitsgruppe abgestimmt und darüber hinaus im Rahmen zweier Expertenworkshops der Fachöffentlichkeit zur Diskussion gestellt. Zum ersten Workshop wurden Expertinnen und Experten aus verschiedenen Tech-

nologiebereichen eingeladen und ihre Einschätzungen zur Entwicklung bis zum Jahr 2050 erörtert. Während der zweiten Veranstaltung wurden die Naturschutzziele der Szenarien, die Szenarioannahmen sowie erste Ergebnisse der Berechnungen mit Expertinnen und Experten aus Naturschutz und Energietechnik diskutiert. Die Ergebnisse der Workshops sowie kleinere in Auftrag gegebene schriftliche Expertisen zu den einzelnen Technologiebereichen (siehe Anhang) wurden in die Szenarioannahmen zur Technologieentwicklung bis zum Jahr 2050 aufgenommen und trugen zur Unterstützung weiterführender Diskussionen der Handlungsempfehlungen bei.

1.4 Untersuchungsgrenzen und Einschränkungen

In den Analysen dieses Projekts erfolgten bilanzielle Betrachtungen des Endenergiebedarfs und der Energiebereitstellung für ein zukünftiges Energiesystem im Jahr 2050. Die Ergebnisse sind nicht als Leitbilder oder konkrete Planungsgrundlagen zu verstehen, sondern als besonders naturschutzkonforme Varianten eines Spektrums von Entwicklungsmöglichkeiten bis 2050. Aufgrund der der eingenommenen Naturschutzperspektive und der hohen Komplexität der Thematik wurden folgende Schwerpunkte gesetzt, die gleichzeitig die Grenzen der Studie markieren:

(1) In den Szenarien wird generell von einem Primat des effizienten Umgangs mit der Fläche ausgegangen und zunächst Windenergie im Außenraum als flächensparende Lösung bevorzugt, da in den kommenden Jahren steigende Anforderungen an die Flächennutzung zu erwarten sind. Dazu zählen zum Beispiel die steigende Nachfrage nach Nahrungsmitteln aufgrund der Entwicklung der Weltbevölkerung oder verschlechterte Produktionsbedingungen aufgrund des Klimawandels. Gleichzeitig streben die EU und Deutschland mit der Biodiversitätsstrategie an, den Anteil des ökologischen Landbaus zu steigern (mit der Folge einer etwas geringeren Flächenproduktivität aber geringeren Umweltwirkungen). Weitere Vorgaben wurden nicht gesetzt, da es konkrete politische Ziele zwar zum Anteil des ökologischen Landbaus und zur Flächeninanspruchnahme durch Besiedelung gibt, nicht aber dazu welcher Anteil der auf der Fläche erzeugbaren Energieeinheiten (Joule) in den Nahrungspfad und welcher in andere Verwertungspfade gehen soll oder darf.

(2) Auch wenn sie zunächst im größeren Umfang als Regelernergie und Übergangstechnologie noch benötigt werden sollten, wurden Biomassepotenziale für den Energiemix im Jahr 2050 auf die nutzbaren Rest- und Abfallstoffe beschränkt. Für das Jahr 2050 wird davon ausgegangen, dass nachwachsende Rohstoffe vor allem in der stofflichen Produktion genutzt werden müssen und für die energetische Nutzung erst nach Durchlaufen einer Nutzungskaskade zur Verfügung stehen (vgl. Kap. 7.6).

(3) Für das Energieertragspotenzial von Offshore-Windenergieanlagen werden die Ausbauziele des EEGs herangezogen, während bei Geothermie und Wasserkraft die Ergebnisse aus der UBA Studie „2050: 100 %, Energieziel 2050: 100 % Strom aus erneuerbaren Quellen“ verwendet werden (vgl. Kap. 7.5).

(4) Raum-zeitlich differenzierte Betrachtungen der Netzkapazitäten und Speicherbedarfe konnten in der bundesweiten Analyse nicht vorgenommen werden. Für eine Ermittlung der bundesweiten Speicherbedarfe wurden daher überschlägige Annahmen aus den beauftragten Expertengutachten übernommen. Diese Schätzung hat die Versorgungssicherheit in den Vordergrund gestellt und ist somit konservativ. Anhand eines ausgewählten Verteilnetzes und den aus den Szenarien resultierenden Verbräuchen und Einspeisemengen wurden zu-

dem exemplarisch die optimale Größe der netzdienlichen Speicher sowie der Netzausbaubedarf für eine Ortschaft bestimmt.

(5) Volkswirtschaftliche Betrachtungen wurden bisher nicht durchgeführt, sind aber essenziell für die Beurteilung verschiedener Energiepfade und die Konzipierung von Umsetzungswegen.

(6) Die „Reserven“ wurden bisher nicht umfassend quantifiziert. Zu den Reserven gehören unter anderem die Nutzung von Gebieten mit mittlerem Raumwiderstand oder mehr Offshore Windenergieerzeugung. Eine über Deutschland hinausgehende Untersuchung würde die Quantifizierung von Energieimporten erfordern, die auch unter Nachhaltigkeitskriterien möglich bzw. gleichwertig sind.

(7) Das Vorhaben ist streng auf das Zieljahr 2050 ausgerichtet (im Sinn einer alternativen Zukunft) und betrachtet nicht näher den Pfad dorthin, kann aber dazu benutzt werden, einen solchen Pfad mit Etappenzielen in einem Prozessszenario zu entwerfen.

2 Endenergiebedarfsprojektion für 2050 und Speicherbedarf

2.1 Generelles Vorgehen bei der Energiebedarfsprojektion im Jahr 2050

Eine wesentliche Grundlage für die Erarbeitung eines Szenarios „naturverträgliche Energieversorgung aus 100 % erneuerbaren Energien im Jahr 2050“ ist es, Annahmen dazu zu treffen, auf welche Energiebedarfe sich die Versorgungsszenarien beziehen müssen. Dafür wurden zunächst (in Anlehnung an CUTEK 2016) relevante Rahmenbedingungen gesichtet, wie die prognostizierte Bevölkerungsentwicklung oder auch das Wirtschaftswachstum, das in der Vergangenheit ein wesentlicher Treiber für die Steigerung von Energiebedarfen war.

Darüber hinaus wurde das Potenzial zur Senkung des Energiebedarfs und zur Effizienzsteigerung auf der Nachfrageseite ermittelt. Dabei wurden insbesondere derzeitige und zukünftige Technologieentwicklungen in den Energieverbrauchssektoren und Möglichkeiten der Substitution von Energieträgern anhand vorhandener Studien einbezogen. Diese – teils auf Prognosen, teils auf Potenzialannahmen beruhenden – Annahmen zum Energiebedarf im Jahr 2050 gehen in die Szenarien ein und bilden dort die Grundlage für einen Vergleich mit den mensch- und naturverträglich produzierbaren erneuerbaren Energiemengen.

Es werden neben dem klassischen Stromsektor auch die Bereiche Wärme, Kraft- und Grundstoffe in den Verbrauchssektoren Haushalte, Gewerbe/Handel/Dienstleistungen, Industrie und Verkehr berücksichtigt. Bei einer 100 % Versorgung aus erneuerbaren Energien müssen auch die derzeit auf (fossilen) Treib- und Brennstoffen basierenden Bereiche fast vollständig auf den Energieträger Strom umgestellt werden.

Die weitgehende Elektrifizierung ist notwendig, wenn fossile Energieträger in allen Verbrauchssektoren durch erneuerbare Energien ersetzt werden sollen. Elektrische Energie wird dabei dominieren, weil die größten Potenziale für erneuerbare Energien in der direkten und transformationsverlustfreien Stromproduktion aus Wind und Sonne liegen. Es wird daher angenommen, dass Strom in Zukunft flexibel in allen Energieverbrauchssektoren eingesetzt und gespeichert werden kann. Die Annahme einer weitgehenden Sektorkopplung hat große Vorteile, weil so das Problem des zeitlich schwankenden Angebots (insbesondere von Windenergie und Sonnenenergie) durch eine Verbindung der Sektoren wesentlich verringert werden kann (PASCHOTTA 2017). Langfristig wird diese Sektorkopplung zu einer deutlichen Steigerung des Stromverbrauchs (trotz verbesserter Energieeffizienz bei der Stromnutzung) führen. Gleichzeitig werden aber wegen des Ersatzes der fossilen durch erneuerbare Energien bei der Stromerzeugung die klimaschädlichen CO₂-Emissionen erheblich gesenkt (ebd.). Es ist daher davon auszugehen, dass die Verbindung von Elektrifizierung, Sektorkopplung und der Umstellung auf erneuerbare Energiequellen, ein vielversprechender Weg zur Dekarbonisierung des Energiesystems ist.

Analog zu entsprechenden Szenarien (CUTEK 2016) die für das Land Niedersachsen erstellt wurden, wird deshalb eine strombasierte Infrastruktur im Zieljahr 2050 zugrunde gelegt. Hier werden zwei für den Wechsel auf erneuerbare Energien grundlegende Aspekte berücksichtigt. Zum einen erfolgt eine möglichst umfangreiche Umstellung heute brennstoffbasierter Anwendungen auf Strom. Zum anderen wird die Erzeugung von Wasserstoff aus Strom durch Elektrolyse als Grundlage für synthetische Kraftstoffe, Grundstoffe und zur Stromspeicherung berücksichtigt. Damit können auch Bereiche die nicht direkt elektrifiziert werden können auf erneuerbare Energien umgestellt werden. Allerdings treten dabei prozessbedingt Verluste auf die ebenfalls aus den erneuerbaren Energien zu decken sind und somit den Energiebedarf zusätzlich erhöhen. Vor diesem Hintergrund sind direkte Stromanwendungen immer zu bevorzugen, wenn diese technisch umsetzbar sind. Beispielsweise könnten für

Mobilitätsanwendungen auch Elektrofahrzeuge mit wasserstoffbasierter Strombereitstellung vorgesehen werden da diese gegenüber Elektrofahrzeugen mit direkter Strombereitstellung Vorteile aufweisen, wie unter anderem längere Reichweiten und kürzere Tankzeiten. Gegenüber der Elektrotraktion mit direkter Strombereitstellung umfasst die Wandlungskette dieser Option allerdings zwei zusätzliche verlustbehaftete Schritte: die Wasserelektrolyse einschließlich Wasserstoffkompression bzw. -Verflüssigung und -Verteilung mit einem angenommenen Wirkungsgrad von 60 % und die Brennstoffzelle mit einem angenommenen Wirkungsgrad von 48 % (CUTEC 2016, FRAUNHOFER 2011). Diese Verluste müssten durch eine erhöhte Stromerzeugung ausgeglichen werden, die eine Ausweitung der Erzeugungsflächen erfordern würden. In den Berechnungen für die Szenarien wurde deshalb neben einer weiteren Umstellung des bereits zu großen Teilen elektrisch betriebenen Schienenverkehrs auch von einer umfassenden Umstellung des Straßenverkehrs auf E-Mobilität ausgegangen.

Neben der Umstellung der Energiebereitstellung auf strombasierte Infrastruktur, wird ebenfalls das Potenzial für Bedarfsreduktionen also für Änderungen bei der Energienutzung betrachtet, die in Form der Effizienzsteigerungen im Kapitel 2.3 ausgeführt ist.

Vorteil eines auf elektrischer Energie beruhenden sektorgekoppelten Systems ist ferner, dass Technologien zum Einsatz kommen können die Energieeffizienzvorteile gegenüber heutigen – auf Verbrennungsprozessen basierten – Systemen aufweisen.

Die Elektromotoren haben einen besseren Wirkungsgrad im Vergleich zu Verbrennungsmotoren (Energie im Brennstoff -> Bewegungsenergie), d.h. ein großer Anteil der elektrischen Energie bei Elektromotoren kann in Bewegungsenergie umgesetzt werden.

Im Wärmesektor erreichen Brennwertsysteme zwar inzwischen gute Wirkungsgrade. Elektrische Wärmepumpen haben aber über die Nutzung der Umgebungswärme den Vorteil, ein Mehrfaches der eingesetzten elektrischen Energie als Wärmeenergie nutzbar zu machen.

Sollte der Wandel von einer brennstoffbasierten Energieversorgung auf Strom nicht erfolgen und die erforderlichen Brennstoffe dennoch von erneuerbaren Energien bereitgestellt und über Power-to-Gas-Verfahren beispielsweise mit dem oben dargelegten Wirkungsgrad von 60 % produziert werden, wären nach einer überschlägigen Rechnung etwa 4.000 TWh jährliche Stromerzeugung notwendig um den heutigen Endenergiebedarf (2.554 TWh, davon 520 TWh Strom im Jahr 2012) über diese Variante zu decken, d.h. eine Steigerung von etwa 53 %.

Tab. 3 zeigt im Detail, wie viel Ersatzstrom in verschiedenen Sektoren benötigt wird, um die gleiche Menge an Energie über Power-to-Gas-Verfahren mit dem erwähnten Wirkungsgrad zu erzeugen.

Tab. 3: Erforderliche Stromerzeugung zur Deckung des heutigen Energiebedarfs (-verbrauchs) mit erneuerbaren Energien unter Annahme unveränderter Nutzungspfade und Herstellung synthetischer Brennstoffe.

Status-Bilanz, Deutschland, 2012 (100% erneuerbar)		Kraft/Licht/ IKT/Kälte	Gebäudewärme	Prozesswärme	Mobile Anw.	Insgesamt
Endenergieträger	Verbrauch Strom	378.194 GWh	39.667 GWh	84.944 GWh	16.500 GWh	519.306 GWh
	Ersatzstrom (Verbrauch Brennstoffe Gesamt)	0 GWh	1.147.935 GWh	630.139 GWh	1.270.301 GWh	3.048.375 GWh
	Ersatzstrom (Verbrauch Brennstoffe Gasförmig)		667.593 GWh	383.657 GWh	10.815 GWh	1.062.065 GWh
	Ersatzstrom (Verbrauch Brennstoffe Flüssig)		320.648 GWh	44.769 GWh	1.259.486 GWh	1.624.903 GWh
	Ersatzstrom (Verbrauch Brennstoffe Fest)		159.694 GWh	201.713 GWh	0 GWh	361.407 GWh
	Ersatzstrom (Verbrauch Wärme)	0 GWh	247.364 GWh	95.231 GWh	0 GWh	342.596 GWh
Verbrauch gesamt (100% erneuerbar)		378.194 GWh	1.434.966 GWh	810.315 GWh	1.286.801 GWh	3.910.277 GWh

Wesentliche Annahmen zur Bestimmung der zukünftigen Energiebedarfe wurden dabei direkt aus den für das Land Niedersachsen erstellten Szenarien (CUTEC 2016) übernommen, da gemäß dem dort verwendeten Solidaransatz durchschnittliche Werte für Deutschland auch auf Niedersachsen projiziert sind. Die Werte in den folgenden Abschnitten sind damit unter den gleichen Randbedingungen und Annahmen zur zukünftigen Entwicklung wie für Niedersachsen (in CUTEC 2016) abgeleitet, beziehen sich aber auf den gesamtdeutschen Bedarf an Energie. Als Ausgangsdaten werden die des Bezugsjahres 2012 berücksichtigt, denn hierfür konnte eine vollständige Datenbasis über die gesamten Verbrauchssektoren abgebildet werden. Um derzeitige Veränderungstendenzen des Energiebedarfs zu zeigen, wurden auch die Daten für das Jahr 2015 berücksichtigt und verglichen.

2.2 Wesentliche Annahmen

Bevölkerungsdegression

Der Endenergiebedarf wird pro Kopf ermittelt. Deshalb hat die zukünftige Bevölkerungsentwicklung einen großen Einfluss auf den zu deckenden Endenergieverbrauch. Laut Statistischem Bundesamt ist in Deutschland bis zum Jahr 2050 mit einer Bevölkerungsdegression von rund 12 % gegenüber 2012 zu rechnen (STATISTA 2015). Eine derartige Entwicklung würde zu einem entsprechend geringeren Energiebedarf führen.

Wirtschaftliche Entwicklung

Der Energiebedarf hängt von dem Bruttoinlandsprodukt (BIP) als Maß der wirtschaftlichen Leistung einer Volkswirtschaft ab. Dieses beschreibt den Gesamtwert von Waren und Dienstleistungen, die binnen eines Jahres innerhalb der Landesgrenzen einer Volkswirtschaft als Endprodukte hergestellt wurden (abzgl. Vorleistungen). Steigt das Pro-Kopf-BIP bedeutete dies auch einen steigenden Energiebedarf durch die zusätzliche Produktion. Seit vielen Jahren ist in Deutschland allerdings eine abnehmende Tendenz des Primärenergieverbrauchs bei steigendem BIP feststellbar und die Prognose zeigt, dass bis 2050 der Primärenergieverbrauch weiter sinkt und das BIP noch wächst. Hier ist jedoch keine vollständige

ge Entkoppelung zu erwarten und ein steigendes BIP würde weiterhin einen ggf. kleineren Anstieg des Energiebedarfs bedeuten (DESTATIS 2015).

Nach den Szenarien von WWF und UBA steigt das BIP in Deutschland zwischen 2012 und 2050 um 0,7 % pro Jahr (WWF 2009; UBA 2014). Zusammen mit der angenommenen Bevölkerungsdegression steigt das Pro-Kopf-BIP bis zum Jahr 2050 damit insgesamt um 48 % gegenüber heute.

Energie Importe/Exporte

Da die Machbarkeit einer zu 100 % auf erneuerbaren Energien beruhenden Energieversorgung nur für Deutschland geprüft werden soll, werden in den Betrachtungen zur Energiebedarfsdeckung zunächst keine Energieimporte oder -exporte berücksichtigt. Ziel ist die bilanzielle Deckung des deutschen Energiebedarfs allein auf Basis im Land nutzbarer Energiequellen um zu prüfen ob eine Versorgung auf Basis der national verfügbaren Quellen möglich ist.

2.3 Effizienzsteigerung

Die regenerativen Energiequellen brauchen zur Energieerzeugung Fläche. Durch die angenommene weitgehende Elektrifizierung der Bereiche Mobilität und Wärme steigt der Bedarf an elektrischer Energie (Strom). Deshalb ist eine möglichst weitgehende Ausschöpfung der Effizienzpotenziale erforderlich um den gestiegenen Energiebedarf auf der begrenzten Fläche zu decken.

Im Folgenden wird zwischen mobilen Anwendungen, Prozess- und Gebäudewärme sowie Kraft-/Licht-/Information- und Kommunikationstechnologien (IKT)- und Kälte-Bereichen unterschieden.

Mobile Anwendungen

Mit Blick auf die mobilen Anwendungen benötigt die Antriebsenergie den größten Energieeinsatz. Infolge der angenommenen Elektrifizierung mit einem Anteil von 88 % des Personen- und Güterverkehrs auf Straßen und Schiene wird der Endenergiebedarf um mehr als die Hälfte gemindert (CUTEC 2016). Diese Minderung beruht auf der höheren Effizienz des Elektroantriebes im Vergleich zu Verbrennungsmotoren. Die hohe Effizienz des Elektroantriebes resultiert aus dem Verzicht auf mit Wasserstoff gespeiste Elektrofahrzeuge, die erhebliche Verluste bei Wasserelektrolyse und Brennstoffzelle aufweisen. Somit sinkt der Energiebedarf 2050 in den hier berechneten Szenarien von 779 TWh im Jahr 2012 (etwa 728 TWh im Jahr 2015) auf 365 TWh (davon 223 TWh Strom) im Jahr 2050.

Auch hinsichtlich der verbleibenden Verbrennungsmotoren im nichtelektrifizierten Anteil der mobilen Anwendungen wird von einer Effizienzsteigerung in Form eines um 11 % verminderten Kraftstoffbedarfs ausgegangen (IFEU 2009).

Gebäudewärme

Der Gebäudewärmebedarf setzt sich aus der Raumwärme und Warmwasserzubereitung zusammen. Gegenwärtig wird hierfür rund 40 % der Endenergie eingesetzt. Im Jahr 2050 wird von einem verminderten Raumwärmebedarf von 45 kWh/m² ausgegangen – heute liegt er noch bei 125 kWh/m². Damit der gesamte Gebäudebestand bis 2050 vollständig saniert ist, ist eine jährliche Sanierungsrate von 2,6 % notwendig. Durch weitere Effizienzmaßnahmen kann der Endenergiebedarf für die Warmwasserzubereitung um rund 20 % gesenkt werden. Die gegenwärtig mit Brennstoff betriebenen Kessel und Öfen werden in Zukunft durch elekt-

rische Wärmepumpen ersetzt (CUTEC 2016). Anstelle von (fossilen) Brennstoffen werden damit die Energieträger Strom und Umgebungswärme zur Deckung des Bedarfs an Gebäudewärme eingesetzt. Durch die so erzielte energetische Sanierung des gesamten Gebäudebestandes sinkt der Endenergiebedarf 2050 auf rund ein Drittel des heutigen Wertes, und zwar von 877 TWh im Jahr 2012 (etwa 780 TWh im Jahr 2015) auf 295 TWh (davon 66 TWh Strom und 229 TWh Umgebungswärme).

Prozesswärme

Hochtemperaturwärme oberhalb von 100°C kommt insbesondere in der Industrie zum Einsatz. Durch effizientere Produktionsprozesse lässt sich im Industriesektor der Prozesswärmebedarf gegenüber heute senken. Ein weiterer Effizienzgewinn resultiert aus der Ablösung der heutigen, überwiegend mit Brennstoff betriebenen und Abgasverlusten behafteten Öfen durch annähernd verlustfreie elektrische Beheizung. Im Gegensatz zur Anwendung für Niedertemperaturwärme erscheint die elektrische Widerstandsheizung im Hochtemperaturwärmebereich vertretbar, da hier Wärmepumpenprozesse auf Grund der zu erzeugenden hohen Temperaturen nur bedingt einsetzbar und die bei der Umwandlung auftretenden Exergieverluste wesentlich kleiner sind. Werden die Potenziale in den Produktionsbereichen mit Hilfe von Effizienzsteigerungsmaßnahmen ausgeschöpft, kann der Prozesswärmebedarf von 520 TWh im Jahr 2012 (etwa 532 TWh im Jahr 2015 (BMWI 2015)) in den hier berechneten Szenarien auf 393 TWh (davon 219 TWh Strom) im Jahr 2050 gesenkt werden. Somit wäre eine Reduzierung des Prozesswärmebedarfs um 24 % gegenüber 2012 zu erzielen. Die Umstellung der Industrieprozesse auf erneuerbare Energien beinhaltet für den Zeitraum bis 2050 allerdings noch weitere Unsicherheiten, da auch Prozessumstellungen (beispielsweise Direktreduktion von Stahl mittels Wasserstoff) im Vergleich zu den derzeitigen Prozessketten denkbar sind. Die Entwicklung dieser Prozesse im industriellen Maßstab befindet sich derzeit vielfach noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium, was detaillierte Einschätzungen zur potenziellen Höhe des zukünftigen Energiebedarfs erschwert.

Kraft-/Licht-/IKT/Kälte-Bereiche

Die klassischen Stromanwendungsbereiche werden unter Kraft/Licht/IKT und Kälte zusammengefasst. Nutzungs-Effizienz-Maßnahmen ermöglichen es, den Energiebedarf in Haushalten, Gewerbe/Handel/Dienstleistungen sowie in der Industrie zu senken. Damit sind von den 378 TWh im Jahr 2012 (etwa 426 TWh im Jahr 2015) rund 82 % notwendig, also 309 TWh im Jahr 2050. Die demographische Entwicklung und die des BIP (mit einer Steigerung von 0,7 %/a) sind hierbei schon berücksichtigt.

2.4 Projizierter Energiebedarf im Jahr 2050

Die in Kapitel 2.2 und 2.3 beschriebenen Annahmen hinsichtlich der Bevölkerungsentwicklung, des Wirtschaftswachstums und der Effizienzsteigerungspotenziale führen insgesamt zu einer Verminderung des Endenergiebedarfs um etwa 47 %, und zwar von 2.554 TWh (davon 519 TWh Strom) im Jahr 2012 (2.466 TWh im Jahr 2015) auf 1.362 TWh (davon 818 TWh Strom) im Jahr 2050 (vgl. Abb. 9), was in der gleichen Größenordnung wie der Energieszenarien für Deutschland liegt.

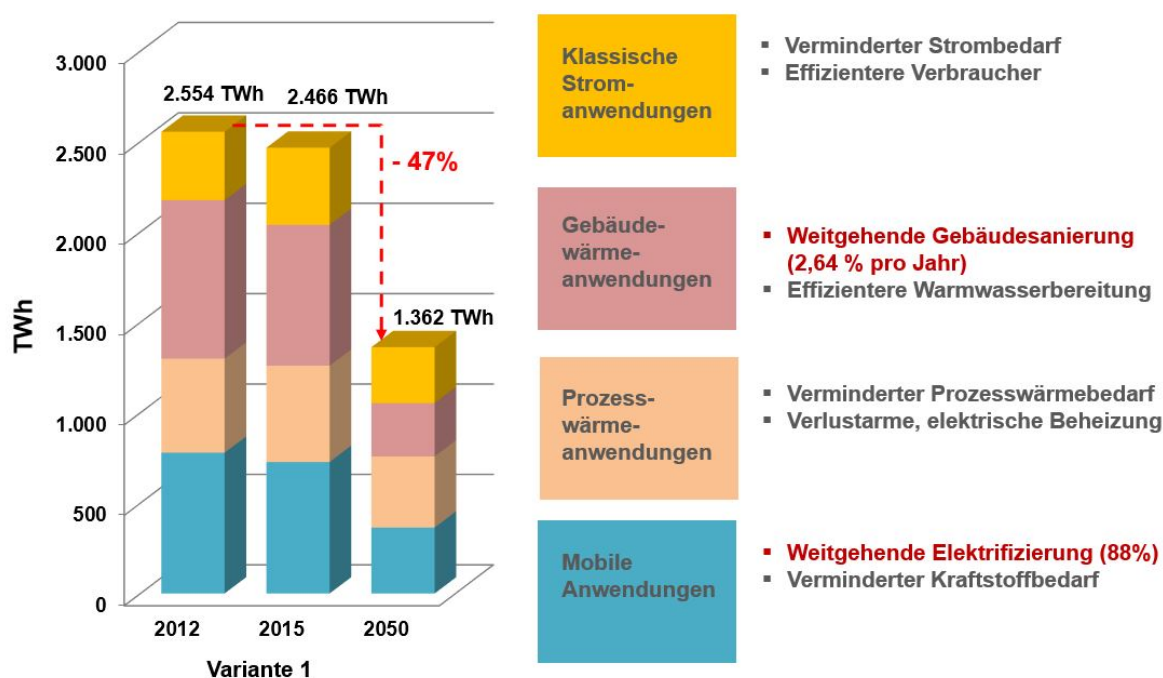


Abb. 9: Ein sehr ambitioniertes Ziel des Energiebedarfs im Jahr 2050

Tab. 4 gibt einen Überblick über den Endenergiebedarf in den vier Sektoren mit ambitionierten Zielen im Jahr 2050 (Elektrifizierung 88% und Gebäudesanierung 2,64% pro Jahr), es ist eine deutliche Verminderung in den Sektoren Gebäudewärme und mobile Anwendungen zu erkennen (vgl. Tabelle „Basis“ im Anhang).

Neben dem Energieträger Strom werden dabei die Energieträger „Umgebungswärme“ zur Nutzung in Elektrowärmepumpen (Gebäudewärme) und verbleibende Brennstoffe für schwer elektrifizierbare Industrieanwendungen und restliche auf Treibstoffen basierende mobile Anwendungen eingesetzt.

Tab. 4: Der Endenergiebedarf im Jahr 2050 in den einzelnen Sektoren mit sehr ambitionierten Zielen zur Bedarfsreduzierung

EEV		Kraft/Licht/IKT/Kälte	Gebäudewärme	Prozesswärme	Mobile Anw.	Insgesamt
Energieträger	Bedarf Strom	309.011 GWh	66.166 GWh	219.901 GWh	222.668 GWh	817.746 GWh
	Bedarf Brennstoffe			173.243 GWh	142.221 GWh	315.464 GWh
	Gesamt					
	Genutzte Umgebungswärme		229.013 GWh			229.013 GWh
Bedarf Gesamt		309.011 GWh	295.179 GWh	393.145 GWh	364.889 GWh	1.362.223 GWh

2.5 Sensitivitätsanalyse

Um die Unsicherheit der oben angenommenen Werte annäherungsweise zu veranschaulichen und gleichzeitig die Relevanz einzelner Maßnahmen z.B. der Umstellung der Mobilität zu prüfen, wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Mit dieser wird geprüft wie stark sich

Änderungen bei den Eingangsbedingungen auf das Ergebnis auswirken. Die in Kap 2.2 und Kap. 2.3 angenommenen Zahlenwerte werden im Folgenden deshalb variiert und der resultierende Energiebedarfswert errechnet. Hierdurch soll der Einfluss einzelner Parameter auf dem zu deckenden Endenergiebedarf ermittelt werden.

Durch die Variation der Elektrifizierungshöhe bei mobilen Anwendungen erhöht sich auch der Endenergiebedarf. So beträgt der Energiebedarf bei einer 50-prozentigen Elektrifizierung etwa 633 TWh/a (davon 491 TWh/a Strom). Wie in der Tab. 5 dargestellt, beträgt der Gesamtbedarf in dieser Variante 1.630 TWh/a (davon 1.086 TWh/a Strom), d.h. eine Steigerung um etwa 20% im Vergleich zur ersten Variante mit sehr ambitionierten Zielen (vgl. Anhang 2, Tab. 2).

Vergleichbare Betrachtungen über die Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors sind in (BMU 2016) dargestellt. In dieser Studie wurden anhand verschiedener Szenarien der elektrische Fahranteil der PKW im Jahr 2050 und der Endenergiebedarf des nationalen sowie internationalen Verkehrs in 2050 angegeben. Trotz unterschiedlicher Annahmen insbesondere zu den Brennstoffanteilen am Endenergiebedarf kommt die Studie hinsichtlich der Größenordnung des notwendigen Endenergiebedarfs zu ähnlichen Ergebnissen wie in der hier dargestellten Variante 2.

Unter den beschriebenen Annahmen hinsichtlich der Elektrifizierung im Verkehr mit einem Anteil von 88 % des Personen- und Güterverkehrs auf Straßen und Schiene ergibt sich ein Anteil an elektrischer Energie von 61 % des Endenergiebedarfs in Variante 1. Der restliche Anteil von etwa 39 % des Endenergiebedarfs für mobile Anwendungen ist weiterhin durch Kraftstoffe (beispielsweise biomassebasierte Kraftstoffe der ersten oder zweiten Generation oder synthetische Power-to-Liquid-Kraftstoffe) abzudecken. Bei einer 50-prozentigen Elektrifizierung und unter der Annahme keiner zusätzlichen Nutzung von Kraftstoffen (beispielsweise Biomasse), sind die zusätzlich notwendigen Kraftstoffe über sogenannte Power-to-X Verfahren ebenfalls aus Strom bereitzustellen. So sind in diesem Fall in den in Tab. 3 und Tab. 5 angegebenen 491 TWh Strom für mobile Anwendungen bereits die Anteile enthalten, die zur Bereitstellung dieser Kraftstoffe notwendig sind. Diese strombasierten Brennstoffe führen über die verlustbehaftete Wandlungskette zu zusätzlichen Bedarfen an elektrischer Energie. Diese Ergebnisse sind analog zur Studie BMU 2016 in der ebenfalls Szenarien mit verschiedenen Anteilen an Brennstoffen, strombasierten Brennstoffen und Direktstromnutzung gegenüber gestellt sind.

Tab. 5: Der projizierte Endenergiebedarf im Jahr 2050: Variante 2: Elektrifizierung 50 % und Gebäudesanierung 2,64 % pro Jahr

EEV		Kraft/Licht/ IKT/Kälte	Gebäudewärme	Prozesswärme	Mobile Anw.	Insgesamt
Energieträger	Bedarf Strom	309.011 GWh	66.166 GWh	219.901 GWh	491.049 GWh	1.086.128 GWh
	Bedarf Brennstoffe Gesamt			173.243 GWh	142.221 GWh	315.464 GWh
	Genutzte Umgebungswärme		229.013 GWh			229.013 GWh
Bedarf Gesamt		309.011 GWh	295.179 GWh	393.145 GWh	633.270 GWh	1.630.605 GWh

Wenn die Gebäudesanierungsrate 1 % statt 2,64 % beträgt, ist ein höherer Gebäudewärmebedarf (Strom und Umgebungswärme) erforderlich. Unter den weniger ambitionierten Annahmen liegt der Energiebedarf zur Deckung der Raumwärme und Warmwasserzubereitung um

rund 80 % höher, also anstelle von 295 TWh/a bei 528 TWh/a (davon 118 TWh/a Strom). Der gesamte Energiebedarf in dieser Variante (Variante 3) beträgt 1.595 TWh/a (davon 870 TWh/a Strom) (vgl. Tab. 6) (vgl. Anhang 2, Tab. 3).

Tab. 6: Der projizierte Endenergiebedarf im Jahr 2050: Variante 3: Elektrifizierung 88 % und Gebäudesanierung 1 % pro Jahr

EEV		Kraft/Licht/ IKT/Kälte	Gebäudewärme	Prozesswärme	Mobile Anw.	Insgesamt
Energieträger	Bedarf Strom	309.011 GWh	118.491 GWh	219.901 GWh	222.668 GWh	870.072 GWh
	Bedarf Brennstoffe Gesamt			173.243 GWh	142.221 GWh	315.464 GWh
	Genutzte Umgebungswärme		410.122 GWh			410.122 GWh
	Bedarf Gesamt	309.011 GWh	528.613 GWh	393.145 GWh	364.889 GWh	1.595.658 GWh

Unter gleichen Annahmen wie in Kapitel 2.2 und Kapitel 2.3, abgesehen von einer geringeren Elektrifizierung von 50 % statt 80 % und einer niedrigeren Sanierungsrate von 1 % statt 2,6 %, liegt der Endenergiebedarf bei 1.362 TWh/a anstelle von 1.864 TWh/a (davon 1.138 TWh Strom) (vgl. Tab. 7) (vgl. Anhang 2, Tab. 4).

Tab. 7: Der projizierte Endenergiebedarf mit ambitionierten Zielen im Jahr 2050 Variante 4: Elektrifizierung 50 % und Gebäudesanierung 1 % pro Jahr

EEV		Kraft/Licht/ IKT/Kälte	Gebäudewärme	Prozesswärme	Mobile Anw.	Insgesamt
Energieträger	Bedarf Strom	309.011 GWh	118.491 GWh	219.901 GWh	491.049 GWh	1.138.452 GWh
	Bedarf Brennstoffe Gesamt			173.243 GWh	142.221 GWh	315.464 GWh
	Genutzte Umgebungswärme		410.122 GWh			410.122 GWh
	Bedarf Gesamt	309.011 GWh	528.613 GWh	393.145 GWh	633.270 GWh	1.864.038 GWh

Abb. 10 präsentiert alle vier Varianten mit dem jeweiligen Energiebedarf in den vier genannten Sektoren.

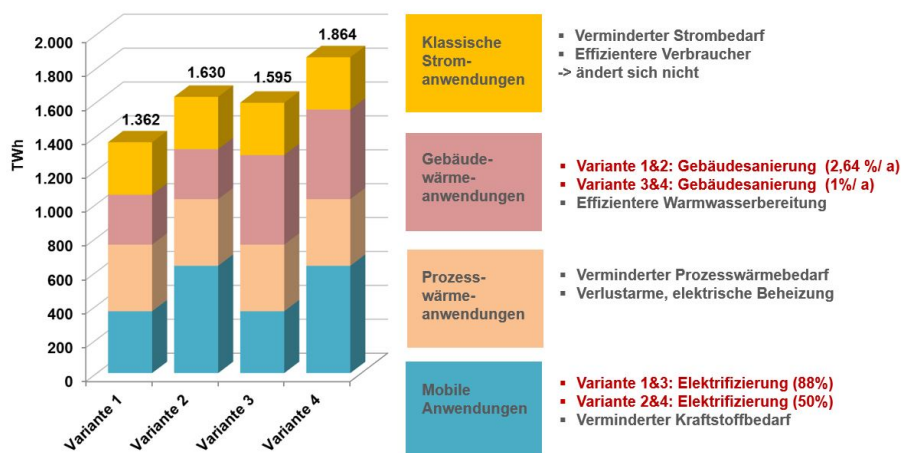


Abb. 10: Sensitivitätsanalyse des Endenergiebedarfs im Jahr 2050

Eine weitere Quelle der Unsicherheit sind Rebound-Effekte. Diese treten auf wenn die angenommen Effizienzsteigerungen zu sinkenden Strompreisen und dadurch wiederum zu Erhöhungen der Nachfrage nach Strom führen. Auch indirekte Rebound-Effekte sind denkbar, wenn durch Effizienzsteigerungen die Strompreise sinken und die Verbraucher das Geld in anderen Wirtschaftsbereichen ausgeben, was dort wiederum zu erhöhten Stromverbräuchen führen kann. Da Rebound-Effekte nur schwer berechenbar sind wurden sie hier zunächst nicht berücksichtigt. Sie müssen vorhergesehen und durch Politikmaßnahmen verhindert werden (vgl. Kap. 9).

Neben dem zukünftig dominierenden Bedarf an elektrischer Energie (Strom) weisen die zuvor diskutierten Varianten des zukünftigen Energiebedarfs auch nichtelektrische Anteile auf. Im Bereich der Gebäudewärme ist das die Umgebungswärme, die mittels der elektrischen Wärmepumpen entnommen wird. In den Bereichen Prozesswärme und mobile Anwendungen sind dies weiterhin Brenn- bzw. Treibstoffe, die dann in einem auf erneuerbaren Energien beruhenden Energiesystem bereitgestellt werden müssten. Bereitstellungsmöglichkeiten bestehen über die Nutzung von Biomasse (Biokraftstoffe der ersten oder zweiten Generation) oder auch über Power-to-X-Verfahren.

Dabei führen verlustbehaftete Wandlungsketten bei den stromgenerierten Kraftstoffen zu einem höheren Bedarf an elektrischer Energie.

Für die folgenden Betrachtungen zur Bereitstellung elektrischer Energie sind insbesondere die zukünftig zu deckenden Strombedarfe von Interesse. Dabei wurde für die weiteren Bilanzierungen in der Studie angenommen, dass die gegenüber Variante 1 jeweils höheren Energiebedarfe über strombasierte Bereitstellungspfade (d.h. über Wärmepumpen im Wärmebereich und über PtX-Kraftstoffe im Verkehrsbereich) gedeckt werden.

In Abb. 11 sind dazu die Anteile an elektrischer Energie unter den getroffenen Annahmen dargestellt.

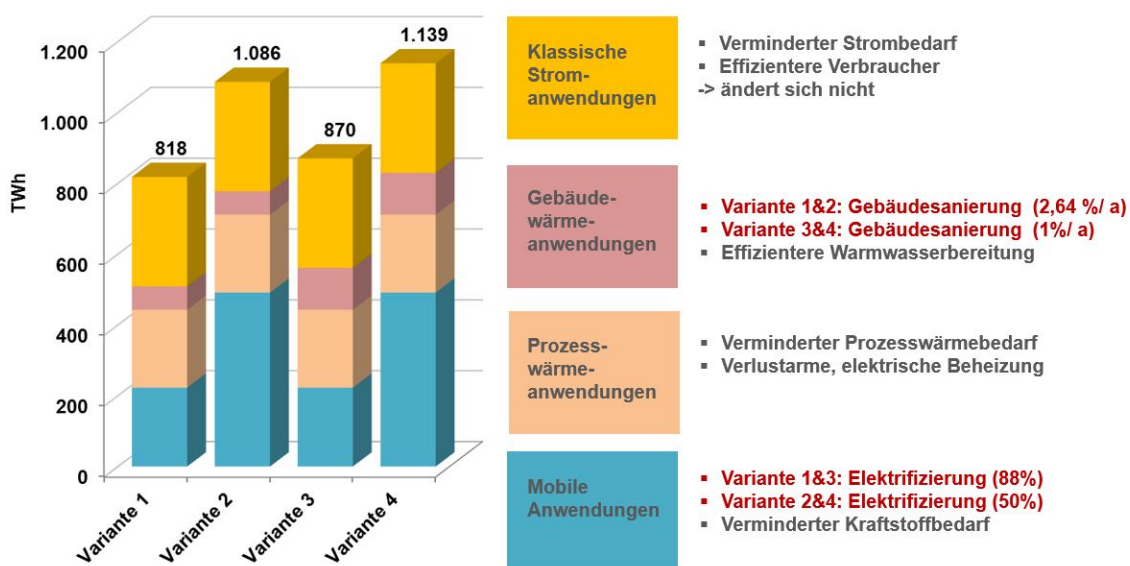


Abb. 11: Sensitivitätsanalyse des Strombedarfs im Jahr 2050

Wie aus der Abb. 11 ersichtlich ist, ist der Einfluss der Elektrifizierung des Verkehrsbereichs auf die Höhe des Strombedarfs unter den getroffenen Annahmen deutlich stärker als der Einfluss der Sanierung.

In den folgenden Betrachtungen und Szenarien wird die Basis-Variante 1 (Gebäudesanierungsrate 2,64 % und Elektrifizierung 88 %) als "sehr ambitioniert" und die Variante 4 (Gebäudesanierungsrate 1 % und Elektrifizierung 50 %) als "ambitioniert" bezeichnet.

Der verbleibende nichtelektrische Bedarf in Form von Brenn- bzw. Treibstoffen in Höhe von 315 TWh pro Jahr ist in den Varianten dann jeweils gleich. Eine Betrachtung zur Bereitstellung erfolgt in Kapitel 7.6.

2.6 Vergleich mit bestehenden Energieszenarien für Deutschland

Im Folgenden werden die Aussagen verschiedener Studien zur Entwicklung des Endenergiebedarfs in Deutschland verglichen. Da die ausgewählten Studien sich in den Zielsetzungen, Methodik und Annahmen unterscheiden, sind die Daten nur bedingt vergleichbar. Die unterschiedlichen Aussagen zur Entwicklung des Endenergiebedarfs sind daher eine Konsequenz der verschiedenen Herangehensweisen.

Die hier dargestellten Szenarien beziehen sich in der Regel auf die im Energiekonzept der Bundesregierung dargelegten energie- und klimapolitischen Zielsetzungen. Der Zeithorizont aller Studien erstreckt sich mindestens bis zum Jahr 2050.

GROKO II: NITSCH, JOACHIM (2014): "GROKO II Szenarien der deutschen Energieversorgung auf der Basis des EEG-Gesetzentwurfs – insbesondere Auswirkungen auf den Wärmesektor“:

Das Szenario GROKO-II bildet die im neuen EEG-Entwurf (EEG-Gesetzentwurf vom 8. April 2014 und des EEG-Gesetzestexts vom 4. Juli 2014) vorgesehenen Zubauraten für Wind, PV und Biomasse ab. In diesem Szenario werden die bisherigen Impulse zur Energieeffizienzsteigerung und der Einsatz von Biomasse in der Wärmeversorgung berücksichtigt. Um die Erreichbarkeit der Klimaschutzziele zu untersuchen, wird angenommen, dass die Verbrauchsentwicklung mittelfristig einen ähnlichen Trend wie in den letzten Jahren hat.

KS AMS:ÖKO-INSTITUT, FRAUNHOFER ISI (2015): "Klimaschutzszenario 2050 2. Endbericht" - Aktuelle-Maßnahmen-Szenario

Die Erstellung der Szenarien *KS AMS*, *KS 80* und *KS 95* erfolgt auf der Basis von Annahmen für Bevölkerungsentwicklung, Wirtschafts- und Wirtschaftsstrukturentwicklung, Energiepreis-, und Emissionsentwicklung für den Zeithorizont bis 2050, die für alle Szenarien gleich sind.

Das „Aktuelle-Maßnahmen-Szenario“ (*KS AMS*), analysiert den Ist-Stand der bereits umgesetzten Maßnahmen bis Oktober 2012. Hier wurde beispielsweise von einer gesamten Sanierungsrate von 1,9 % ausgegangen. In diesem Szenario werden die langfristigen Klimaschutzziele nicht erreicht.

KS 80: ÖKO-INSTITUT, FRAUNHOFER ISI (2015): "Klimaschutzszenario 2050 2. Endbericht" – Szenario 80 %

Ziel dieses Szenarios ist es, die im Energiekonzept der Bundesregierung festgelegten Ziele für Treibhausgasemissionen, erneuerbare Energien und Energieeffizienz zu erreichen, wobei für das Treibhausgasziel der weniger ambitionierte Wert (Emissionsminderung um 80 % bis zum Jahr 2050 gegenüber 1990) in Ansatz gebracht wird.

Der Hauptunterschied zwischen dem KS 80 und dem KS 95 ist die um den Faktor 1,4 angehobene Sanierungsrate. Bis 2050 werden im KS 80 im Schnitt 2,6 % der Gebäude pro Jahr saniert, während es im KS 95 3,6 % der Gebäude sind.

KS 95: ÖKO-INSTITUT, FRAUNHOFER ISI (2015): "Klimaschutzszenario 2050 2. Endbericht" – Szenario 95 %

Ziel dieses Szenarios ist es, das ambitioniertere Treibhausgasziel des Energiekonzepts, eine Emissionsminderung um 95 % bis zum Jahr 2050 gegenüber 1990 zu erreichen.

LS 2011A: DLR, FRAUNHOFER IWES, IFNE (2012): "Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global"

Auch in dieser Studie bilden die quantifizierten Ziele der Energiewende die wesentlichen Rahmenbedingungen. Ziel der Studie ist, verschiedene Entwicklungspfade zu analysieren, mit denen die langfristigen, energiepolitischen Ziele der Bundesregierung erfüllt werden können (Emissionsminderung von mindestens 80 % in 2050). Die Studie präsentiert drei Hauptszenarien, die sich im Wesentlichen bezüglich der Annahmen zur strombasierten Erzeugung von Wasserstoff und Methan unterscheiden.

Hier ist nur das Szenario 2011 A dargestellt. In diesem Szenario steigt der Anteil elektrisch betriebener Fahrzeuge an der gesamten Verkehrssektor auf 50% bis zum Jahr 2050. Der übrige Verkehr wird mit Biokraftstoffen und Wasserstoff gedeckt. Im Szenario 2011 C wird eine rein elektrische Fahrleistung von ca. 80 % angenommen.

Hier wurde unterstellt, dass es eine Steigerung der energetischen Sanierungsrate von 1 % auf 2 % pro Jahr bis zum 2050 gibt.

Die Annahmen dieser Szenarien sind damit denen in den hier berechneten Szenarien sehr ähnlich. Dies bestätigt sich auch darin, dass die Ergebnisse des Endenergiebedarfs mit den zuvor berechneten Ergebnissen in der gleichen Größenordnung liegen.

THGND: UMWELTBUNDESAMT (2014), "Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050":

Die Studie untersucht die technische Machbarkeit einer Treibhausgasemissionsminderung um 95 % bis 2050 in Deutschland. Die Transformationspfade und Maßnahmen, die erforderlich wären, um dieses Ziel zu erreichen werden aber nicht diskutiert. Hier wird angenommen, dass der Energiesektor (einschließlich des Verkehrssektors) bis zum Jahr 2050 vollständig treibhausgasneutral gestalten wird. Durch Power-to-X erzeugte Endenergieträger (Wasserstoff, Methan und flüssige Kraftstoffe) spielen dabei eine wesentliche Rolle.

Unter Berücksichtigung von ökologischen und ökonomischen Grenzen wird angenommen, dass ein Teil des benötigten Stroms und der Energieträger im Ausland produziert werden. In diesem Szenario wird auf die energetische Nutzung von Biomasse und gänzlich auf CO₂-Abscheidung (Carbon Capture and Storage, CCS) verzichtet.

Prognos-Ziel: PROGNOSE, EWI, GWS (2014): "Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose":

Diese Studie stellt unter „Zielszenario“ eine Energiereferenzprognose mit einer eher konservativen Perspektive auf die möglichen zukünftigen Entwicklungen im Bereich des Klimaschutzes dar. Laut dieser Studie erhöht sich die Sanierungsrate bei den Ein- und Zweifamilienhäusern auf 1,8 % (Referenzprognose: 1,2 %) und bei den Mehrfamilienhäusern auf über 1,9 % (Referenzprognose: 1,55 %) ~ 1,8 % im Durchschnitt (bis ins Jahr 2030).

Die oben eingeführten Studien haben sehr ähnliche Annahmen wie die in den im Kapitel 2.4 und Kapitel 2.5 beschriebenen "sehr ambitionierten" und „ambitionierten“ Bedarfsprojektionen, wie z.B. die jährliche Sanierungsrate und Elektrifizierung der mobilen Anwendungen bis zum Jahr 2050 (Tab. 8).

Die unter diesen Annahmen berechnete Endenergiebedarfsentwicklung in Deutschland im Jahr 2050 ist in Abb. 12 dargestellt.

Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass sich die hier berechneten Szenarien in der gleichen Größenordnung bewegen wie die anderen Studien und keine Extremwerte im benötigten Endenergiebedarf darstellen.

Tab. 8: Wesentliche Parameter zur Berechnung des Endenergiebedarfs in bestehenden Energieszenarien

Studie	Sanierungsrate pro Jahr	Elektrifizierung bis 2050
GROKO II	-	-
KS AMS	1,9 %	17 %*
KS 80	2,6 %	52 %*
KS95	3,6 %	86 %*
LS 2011 A	2,0 %	50 %
THGND	2,7 %	100 %
Prognos-Ziel	1,8 %	-
EE100 - ambitionierte Energiebedarfsentwicklung	1,0 %	50 %
EE100 - sehr ambitionierte Energiebedarfsentwicklung	2,64 %	88 %
GROKO II: NITSCH, JOACHIM (2014): "GROKO II Szenarien der deutschen Energieversorgung auf der Basis des EEG-Gesetzentwurfs – insbesondere Auswirkungen auf den Wärmesektor" KS AMS: ÖKO-INSTITUT, FRAUNHOFER ISI (2015): "Klimaschutzszenario 2050 2. Endbericht" - Aktuelle-Maßnahmen-Szenario KS 80: ÖKO-INSTITUT, FRAUNHOFER ISI (2015): "Klimaschutzszenario 2050 2. Endbericht" – Szenario 80 % KS 95: ÖKO-INSTITUT, FRAUNHOFER ISI (2015): "Klimaschutzszenario 2050 2. Endbericht" – Szenario 95 % LS 2011A: DLR, FRAUNHOFER IWES, IFNE (2012): "Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global" THGND: UMWELTBUNDESAMT (2013), "Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050" Prognos-Ziel:): "Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose" * eigene Berechnung		

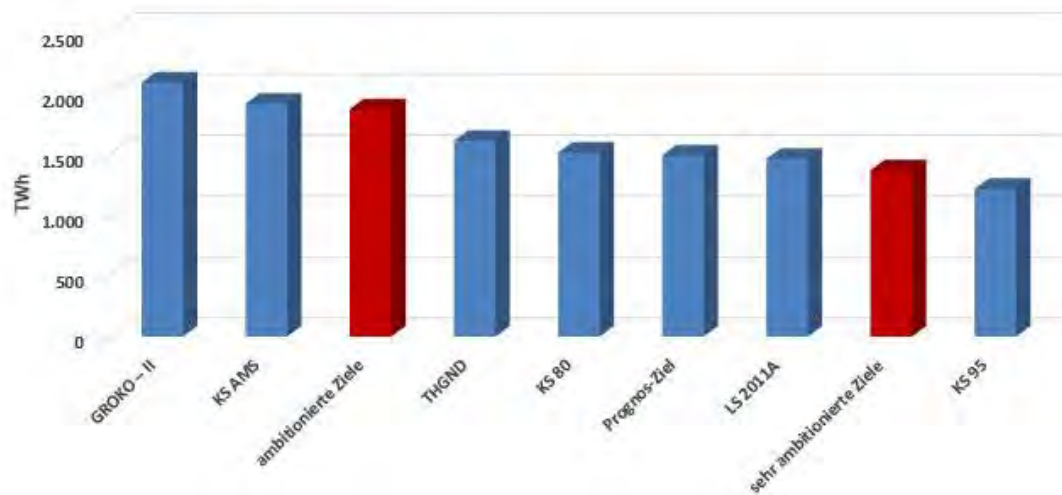


Abb. 12: Prognostizierte Endenergiebedarfe in bestehenden Energieszenarien (rot: Studie EE100; blau: ausgewählte Referenzstudien)

2.7 Speicherbedarfe

Neben der Betrachtung der Energiebedarfe sind bei der Ausgestaltung zukünftiger Energiesysteme auch Speicherbedarfe- und Möglichkeiten zu berücksichtigen. Da, wie eingangs dargelegt, hier nur bilanzielle Betrachtungen zur Bedarfsdeckung durchgeführt werden können, wird der erforderliche Speicherbedarf zunächst mit einem sehr konservativen Ansatz abgeschätzt. Anschließend wird die Größenordnung des notwendigen Speicherbedarfs zusätzlich auf Basis einer Abschätzung aus bestehenden Studien angegeben.

In den hier dargestellten Szenarien sind Speicher zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage beispielsweise innerhalb eines Tages oder über längere „Dunkelflauten“ notwendig. Unter der sehr konservativen Annahme, dass die Hälfte des dargestellten Endenergiebedarfs direkt aus erneuerbaren Quellen gedeckt werden kann und die andere Hälfte über einen Kurz- (z.B. Batteriespeicher in Verbindung mit Photovoltaikanlage) und/oder Langzeitspeicher (Power-to-X) zwischengespeichert werden muss, lassen sich die zusätzlich benötigten Energiemengen zur Deckung der Speicherverluste abschätzen. Eine derartige Zwischenspeicherung ist dabei insbesondere bei den klassischen Stromanwendungen notwendig. Wärmeanwendungen sollten soweit möglich immer mit Wärmespeichern ausgerüstet sein, um das fluktuierende Energieangebot nutzen zu können. Unter der Annahme einer Wirkungsgradkette bei Ein- und Ausspeisung von 50 % für mittlere Speicherverluste von Speichersystemen aus Kurzzeitspeichern (65–90 %) und Langzeitspeichern (36–50 %) [AGO 2014] ergeben sich somit in den vorgestellten Varianten zusätzliche Energiebedarfe zur Deckung dieser angenommenen Speicherverluste.

Bei einer Deckung von etwa der Hälfte des Endenergiebedarfs durch erneuerbaren Quellen wird eine Restmenge von 409 TWh in der Variante 1 (sehr ambitionierte Ziele) und 569 TWh in der Variante 2 (ambitionierte Ziele) nach dem Ein- und Ausspeisungsprozess aus einem Energiespeicher benötigt. Darauf basierend muss bei einer Wirkungsgradkette von 50 %, eine Strommenge von 818 TWh bei der Variante 1 und 1138 TWh bei der Variante 2 eingespeichert werden, um auch die Speicherverluste (50 % der Einspeisungsmenge) zu decken, d.h.:

- Bei sehr ambitionierter Strombedarfsentwicklung:
409 TWh Speicherbedarf (Ausspeicherung) → mit 50 % Speicherwirkungsgrad → zusätzliche 409 TWh zur Deckung der Speicherverluste = 818 TWh + 409 TWh (direkt aus erneuerbaren Quellen) = 1227 TWh
- Bei ambitionierter Strombedarfsentwicklung:
569 TWh Speicherbedarf (Ausspeicherung) → mit 50 % Speicherwirkungsgrad → zusätzliche 569 TWh zur Deckung der Speicherverluste = 1138 TWh + 569 TWh (direkt aus erneuerbaren Quellen) = 1707 TWh

Ein vergleichbares zukünftiges Energiesystem ist in CUTEC 2016 und CUTEC 2016a für Niedersachsen dargestellt. Eine Übertragung dieser Ergebnisse auf Gesamtdeutschland anhand der Bevölkerungszahlen liefert eine Größenordnung des Langzeitspeicherbedarfs von 140 bis 270 TWh. Dieser Bedarf liegt damit zwar oberhalb heutiger Speicherkapazitäten, aber immer noch unterhalb des in CUTEC 2016 allein für Niedersachsen ermittelten technischen Potenzials von 350 TWh. Der dort betrachtete Langzeitspeicher ist durch die Erzeugung von Wasserstoff aus elektrischer Energie mittels Elektrolyse (Wirkungsgrad 65 % (CUTEC 2016)), Speicherung des Wasserstoffes in Kavernen (Speicherverluste 10 % (CUTEC 2016)) und Rückverstromung mittels Blockheizkraftwerken (elektr. Wirkungsgrad 52 % (BMU 2012)) und Spitzenlastkraftwerken ohne Wärmenutzung (elektr. Wirkungsgrad 65 % (BMU 2012)) abgebildet. Der erforderliche Langzeitspeicherbedarf hängt von unterschiedlichen Dimensionen bei der Ausgestaltung des Energiesystems ab. Neben einem (speicher-) optimierten Verhältnis von Wind- zu Sonnenenergie (beispielsweise durch ein Verhältnis der Windstrom- zu Solarstromeinspeisung von 2:1 (CUTEC 2016)) ist auch der Umfang der abzuregelnden Erzeugung aus erneuerbaren Energien maßgeblich für die erforderliche Speichergröße. Ein auf die größte Spitzeneinspeisung ausgelegtes Speichersystem wäre bei einer möglichen Abregelung von Spitzenleistungen zu optimieren.

Diese Betriebsstrategien können auf Basis der hier durchgeführten bilanziellen Betrachtungen nicht abgebildet werden. Es ist lediglich festzustellen, dass für den abgeschätzten Langzeitspeicherbedarf von 140 bis 270 TWh zukünftig technische Realisierungsmöglichkeiten abzusehen sind.

Die oben dargestellten Varianten sind unter sehr konservativen Annahmen zum Speicherbedarf hergeleitet. Der Speicherbedarfsanalyse ist sehr komplex und hängt stark von den Erwartungen des Wind-/Solarstrom-Verhältnisses und der Erschließung weiterer Flexibilitätsoptionen ab, insbesondere dem Lastmanagement. Daher ist die Speicherbedarfsanalyse sehr sensitiv und einen Vergleich mit den Ergebnissen anderen Studien nur innerhalb der jeweiligen Annahmen eingeschränkt möglich. Die Abb. 13 zeigt den Speicherbedarf auf Basis anderer Studien.

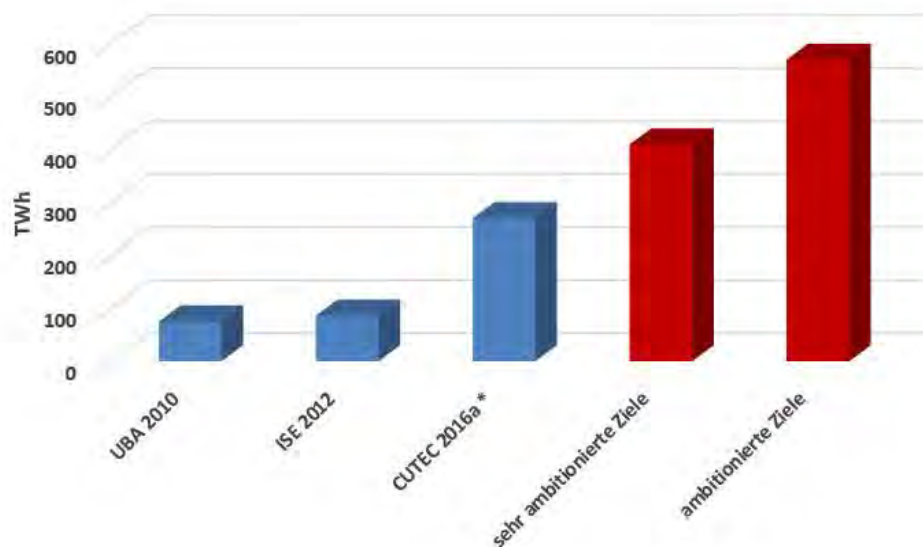


Abb. 13: Vergleich des Speicherbedarfs (Kapazität) bei 100% EE in verschiedenen Studien, hochgerechnet auf Deutschland (rot: Studie EE100; blau: ausgewählte Referenzstudien)

Die in der Abb. 13 dargestellten Werte beziehen sich auf die Speicherkapazitäten in den jeweiligen Studien. Der Strombedarf zur Bereitstellung dieser Energiemenge (bei einer Wirkungsgradkette von 50 %, Annahme siehe oben) ist in der Tab. 9 aufgelistet.

Tab. 9: Prognostizierter Strombedarf zur Langzeitspeicherung im Jahr 2050

Studie	Speicherkapazität	Abgeleiteter Strombedarf Speicherung
UBA 2010	75 TWh	150 TWh
ISE 2012	86 TWh	172 TWh
CUTEK 2016 a	270 TWh	540 TWh
EE100 - ambitionierte Strombedarfsentwicklung	409 TWh	818 TWh
EE100 - sehr ambitionierte Strombedarfsentwicklung	569 TWh	1.138 TWh

UBA (2010): Energieziel 2050: 100 % Strom aus erneuerbaren Energien. Umweltbundesamt 193 S.
 ISE (2012): HANS-MARTIN HENNING, ANDREAS PALZER, FRAUNHOFER INSTITUT FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS ISE: "100% Renewables for Electricity and Heat – a Holistic Model for a Future German Energy System" 7th International Renewable Energy Storage Conference (IHRES 2012) November 12-14, 2012
 CUTEK (2016 a): Faulstich, M.; Beck, H-P.; Brendel, R.; Hanke-Rauschenbach, R.; u. a.: Szenarien zur Energieversorgung in Niedersachsen im Jahr 2050. Zusatzgutachten zeitlich höher aufgelöste Szenarien. Hannover, 2016

Für weitere Betrachtungen werden die beiden Varianten mit sehr konservativen Annahmen (818 TWh bei sehr ambitionierten Zielen und 1.138 TWh bei ambitionierten Zielen) berücksichtigt und stellen Worst-Case-Betrachtungen zur besseren Abschätzung des Speicherbedarfs dar. Die Variante aus der Studie CUTEK 2011 a mit einem zusätzlichen Strombedarf von 540 TWh kann unter Sensitivitätsanalysen weiter betrachtet werden

2.8 Schlussfolgerungen

Ausgehend von einem Endenergiebedarf von 2.550 TWh im Bezugsjahr 2012 ergeben sich unter den zuvor dargelegten Randbedingungen und Annahmen zur Effizienzsteigerung, zur Umstellung auf direkte Stromnutzung sowie zur Wirtschafts- und Bevölkerungsentwicklung verminderte Energiebedarfe im Zieljahr 2050. Unter sehr hohen Ambitionen zur Entwicklung der Energienutzung mit Ausschöpfung der Energieeffizienzpotenziale ist ein reduzierter Bedarf von etwa 1.362 TWh/a im Jahr 2050 als **technisch machbare** Option darstellbar. Unter den als ‚ambitioniert‘ bezeichneten Entwicklungszielen liegt dieser Bedarf unter den gewählten Randbedingungen bei etwa 1.864 TWh/a.

Gemäß der zugrunde gelegten strombasierten Infrastruktur im Zieljahr 2050 sind diese Bedarfe an elektrischer Energie auf Basis erneuerbarer Energien bereitzustellen. Unter den sehr ambitionierten Zielen eines reduzierten Endenergiebedarfs von 1.362 TWh ergeben sich ein elektrischer Energiebedarf von 818 TWh/a und ein verbleibender Brennstoffbedarf von 315 TWh/a. Unter ambitionierten Entwicklungszielen liegt der elektrische Energiebedarf bei 1.138 TWh/a mit weiterhin 315 TWh/a Bedarf an Brennstoffe (vgl. Abb. 14).

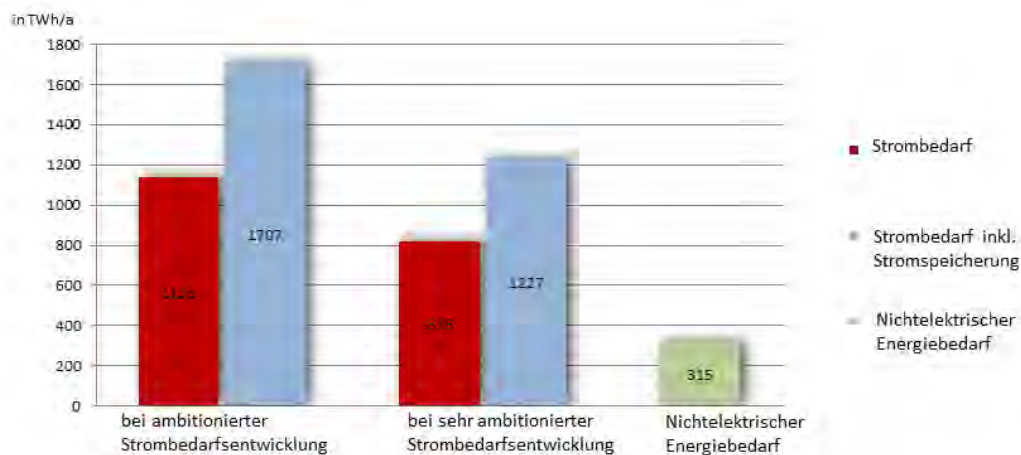


Abb. 14: Varianten des projizierten Strombedarfs sowie des nichtelektrischen Energiebedarfs im Jahr 2050

Die beiden Varianten des Energiebedarfs stellen damit die Eingangsgrößen zur Betrachtung von Bereitstellungsoptionen unter Berücksichtigung der Naturverträglichkeit dar.

Eine wesentliche Voraussetzung der hier berechneten Bedarfe ist die Weiterentwicklung der Speichertechnologie, insbesondere im Hinblick auf die zu speichernden Energiemengen. Wenn diese im Jahre 2050 nicht problemlos die (nach Optimierung des Energiemixes verbleibenden) Bereitstellungsschwankungen der erneuerbaren Energien ausgleichen kann, erhöht sich der Bedarf erheblich, weil Überkapazitäten vorgehalten werden müssen oder in hohem Maße Biomasse als Speicher benötigt wird.

3 Stand der Energiewende im Jahr 2016

3.1 Versorgung mit erneuerbaren Energien in Deutschland

Im Jahr 2016 wurden in Deutschland 386 TWh durch erneuerbare Energien bereitgestellt, davon etwa 49 % im Stromsektor, 44 % im Wärmesektor und nur 8 % im Verkehrsbereich (vgl. Abb. 15).

Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energieträgern (2016*)

Gesamtenergiebereitstellung: 386,3 Terawattstunden [TWh]

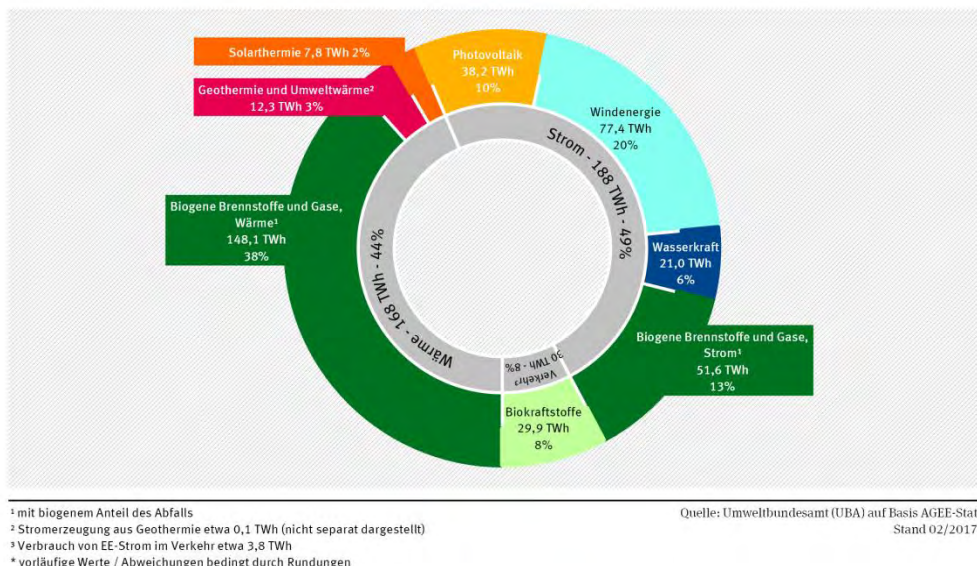


Abb. 15: Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energieträgern (2016) (aus UBA 2017)

Die Bruttostromerzeugung Deutschlands wurde zu 31,7 % durch erneuerbare Energien gedeckt (2016: 188 TWh), wobei die Windenergie an Land mit 77,4 TWh den größten Anteil stellte. Etwa 51,6 TWh Strom lieferte die Biomasse (Biogas, feste Biomasse, biogener Anteil des Abfalls), Photovoltaik rund 38,2 TWh, während aus Wasserkraft 21 TWh produziert wurden und aus Geothermie lediglich 0,15 TWh. Die Stromerzeugung durch Offshore-Windenergieanlagen hatte zwar nur einen geringen Anteil, allerdings stieg die Produktion von 8,3 TWh im Jahr 2015 auf 12,4 TWh im Jahr 2016.

Der Anteil von erneuerbaren Energien in dem Bereich Wärme und Kälte lag 2016 bei 13,4 % (168,1 TWh). Die feste Biomasse lieferte mit 114,5 TWh den größten Anteil an der Wärmebereitstellung durch erneuerbare Energien, gefolgt von Biogas und biogenem Abfall. Witterungsbedingt fiel der Beitrag der Solarthermie gegenüber dem Vorjahr um 0,1 % auf 7,8 TWh. Demgegenüber lag die Wärmeerzeugung durch Geothermie mit 12,3 TWh um 8,4 % höher als im Vorjahr.

Im Verkehrssektor war der Anteil an erneuerbaren Energien am geringsten. Im Jahr 2016 lag er im Straßen- und Schienenverkehr bei nur 5,1 %. Insgesamt sank der Anteil von erneuerbaren Energien, da der Verbrauch von Biokraftstoffen bei einem insgesamt steigenden Energieverbrauch in diesem Bereich konstant blieb. Der Verbrauch von Biokraftstoffen lag bei etwa 30 TWh, wobei Biodiesel den höchsten Anteil stellte, gefolgt von Bioethanol und

Biomethan. Der Stromverbrauch im motorisierten Individualverkehr hingegen stieg in den letzten Jahren kontinuierlich an und lag 2015 bei 3,6 TWh.

Der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch lag insgesamt bei ca. 15 % (AGEE STAT 2017:www). Um das Ziel einer vollständigen Energieversorgung aus erneuerbaren zu erreichen, ist also in den nächsten Jahren ein massiver Ausbau in allen Sektoren notwendig.

3.2 Flächeninanspruchnahme und Energieerzeugung pro Flächeneinheit der Energieträger im Vergleich

Die Produktion von Strom aus erneuerbaren Energien und der erforderliche Netzausbau als neue Nutzungsform in der Landschaft führen immer wieder zu Konflikten mit dem Naturschutz oder stoßen in der Bevölkerung vor Ort auf Widerstand (HOEFT et al. 2017, vgl. Abb. 16). Bereits aus dem derzeitigen Bestand der rund 27.270 Windenergieanlagen (BWE 2016: www) ergeben sich erhebliche Konflikte zwischen den Zielen der Energiewende und denen des Schutzes von Mensch und Natur. Um die Ziele der Energiewende zu erreichen, ist eine deutliche Steigerung der Anlagenzahl erforderlich. Zunehmende Konflikte mit Mensch und Natur sind unausweichlich, wenn nicht versucht wird beide Zielbereiche zu integrieren.

In der Beseitigung der Hauptbelastungsfaktoren, wie z. B. Lärm, liegt das Potenzial zu einer menschen- und naturverträglicheren Gestaltung der Anlagen und damit zu Maßnahmen an der Quelle. Diese werden in den Annahmen für die Szenarien zur Ermittlung der für die Energieproduktion geeigneten Flächen aufgegriffen, indem entweder technische Vermeidungsmaßnahmen vorausgesetzt oder durch gesetzte Abstände Konflikte zwischen dem Ausbau der erneuerbaren Energien und Natur und Mensch vermieden werden.

Eine umfassende Konflikt- und Wirkungsanalyse konnte im Rahmen dieser Studie nicht durchgeführt werden. Für weiterführende Informationen sei hier daher auf die Studien GRUNOW et al 2011, DRL 2006 verwiesen sowie die Internetplattformen www.natur-und-erneuerbare.de, www.naturschutz-energiewende.de/fachwissen oder FFh-vp-info.de.



Abb. 16: Insbesondere Windenergieanlagen treffen auf den Widerstand der Anwohner

Um einen hohen Anteil an erneuerbaren Energie im Energieversorgungssystem zu erreichen, müssen Möglichkeiten der Vermeidung und Minimierung der Auswirkungen gefunden werden. Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Auswahl der zu nutzenden Energieträger ist die möglichst effiziente Nutzung der knappen Ressource ‚Fläche‘. So ist der Energieertrag je Flächeneinheit bei den verschiedenen Energieträgern sehr verschieden.

Die Energieerträge von Energiepflanzen unterscheiden sich dabei je nach betrachteter Flächennutzung und Nutzungspfad (thermisch/ elektrisch) (WBA 2017; FNR 2016; www). Die möglichen Energieerträge pro m² bei der Produktion **elektrischer Energie** betragen durchschnittlich **1,0 bis 1,9 kWh_{el}/m²** (FNR 2016: 39 ff):

- Silomais: ca. 1,9 kWh_{el}/m²/a
- Zuckerrüben: ca. 1,6 kWh_{el}/m²/a
- Getreide (Ganzpflanzensilage): ca. 1,5 kWh_{el}/m²/a
- Durchwachsene Silphie: ca. 1,3 kWh_{el}/m²/a
- Grünland: ca. 1,0 kWh_{el}/m²/a
- Sudangras: ca. 1,2 kWh_{el}/m²/a

Energieerträge pro m² bei der Produktion **thermischer Energie** können **3 bis 5,1 kWh_{th}/m²/a** betragen (FNR 2016: 20):

- Kurzumtriebsplantagen (z.B. Pappel, Weiden): 5,1 kWh_{th}/m²/a
- Getreideganzpflanzen: 5,1 kWh_{th}/m²/a
- Futtergräser (z. B. Rohrschwengel): 3 kWh_{th}/m²/a
- Miscanthus: 6,1 kWh_{th}/m²/a

Insgesamt ist das Stromertragspotenzial bei der energetischen Nutzung von Biomasse pro Flächeneinheit zwar etwas höher als die oben angegebenen Werte anzusetzen, da in der Praxis normalerweise nicht ausschließlich Energiepflanzen als Substrat verwendet werden. Meist wird ein Substratmix aus Energiepflanzen, tierischen Exkrementen sowie ggf. Reststoffen aus Industrie, Gewerbe und Landwirtschaft wie auch kommunalem Bioabfall (DBFZ 2015: 24) genutzt. Beim Vergleich der Energieerträge pro Fläche muss außerdem berücksichtigt werden, dass durch die Nutzung des Biogases in Blockheizwerken (mit Kraft-Wärme-Kopplung) parallel Strom und Wärme mit sehr hohen Wirkungsgraden (über 40 % elektrischer Wirkungsgrad) produziert werden können (DBFZ 2015: 32). Insgesamt ergibt sich aber für den Energiepflanzenanbau nur ein geringer energetischer Beitrag (vgl. Abb. 17).

Für Freiflächenphotovoltaik werden dagegen in der Literatur deutlich höhere Durchschnittswerte von 150 bis 180 kWh_{el} pro Quadratmeter Modulfläche pro Jahr genannt (Fraunhofer ISE 2017: 40, AEE 2016: 18). Nach Abzug der notwendigen Abstandsfläche zwischen den Modulen bei Freiflächenanlagen kann insgesamt mit **60 bis 90 kWh_{el}/m²/a** gerechnet werden (FRAUNHOFER ISE 2017: 40, AEE 2016: 18). Die Erträge von Photovoltaik sind dabei stark vom Standort (Sonneneinstrahlung, Ausrichtung) und der verwendeten Technologie (Wirkungsgrad, Nachführung, etc.) abhängig und werden in den kommenden Jahren noch weiter steigen (vgl. BRENDL & NIEPELT 2016, Anhang 6.2: 6).

Die Flächenenerträge für Onshore-Windenergie sind ebenfalls stark abhängig vom Standort (Windhöffigkeit) und müssen differenziert betrachtet werden. Eine 3-MW-Anlage nach heuti-

gem technologischem Standard produziert durchschnittlich einen Jahresstromertrag von ca. 6,4 Mio. kWh_{el}/a (HAU 2016: 690). Bezieht man diesen Ertrag auf die versiegelte (Fundament-) Fläche (300 – 400 m²) ergibt dies einen Ertrag von ca. 16.000 bis 21.000 kWh_{el}/m²/a. Die notwendigen Abstandsflächen zwischen den WEA betragen ca. das 4-fache des Rotordurchmessers (115,7 m * 4 = 462,8 m). Bezieht man die Abstandsflächen mit in die Ertragsberechnung ein ergibt dies einen Ertrag von ca. 38 kWh_{el}/m²/a. Dabei gilt jedoch, dass die Fläche zwischen den Windenergieanlagen weiterhin für diverse sonstige Nutzungen zur Verfügung steht (v.a. Nahrungs- oder Futtermittelproduktion). Ein Flächenverlust entsteht lediglich durch die Fundamentierung.

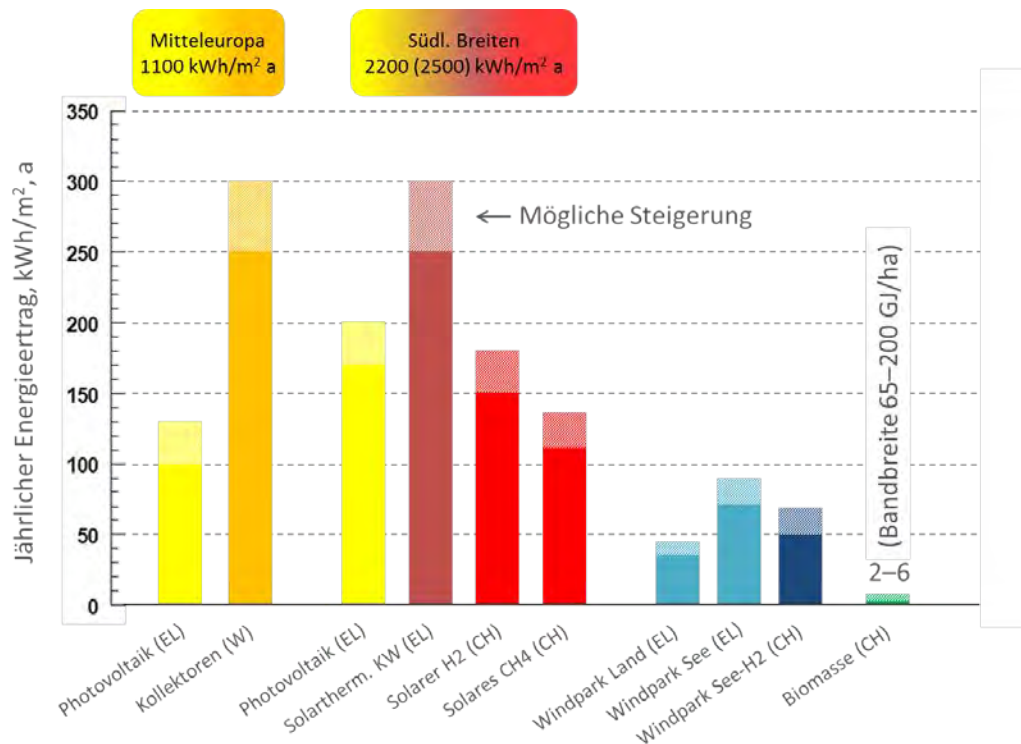


Abb. 17: Flächenerträge verschiedener erneuerbarer Energieträger nach DLR et al. 2012: 82

Da die Schonung der knappen Flächenressourcen zentraler Betrachtungsgegenstand der vorliegenden Studie ist, wurden die Biomassepotenziale für den Energiemix im Jahr 2050 auf biogene Rest- und Abfallstoffe beschränkt und ihre Berechnung an UBA (2010) angelehnt. Die energetische Nutzung von Anbaubiomasse ist nicht in den Szenarien berücksichtigt worden, auch wenn sie vermutlich als Regelenergie und Übergangstechnologie (mit möglichst naturverträglichen Betriebskonzepten) noch einige Jahre benötigt wird. Aufgrund der deutlichen Flächeneffizienz der Wind- und Solarenergie bildeten diese beiden Technologieoptionen den Kern der folgenden Untersuchungen.

B – VORGEHEN BEI DER ERARBEITUNG DER SZENARIEN

4 Methodik zur Ermittlung des Stromertragspotenzials aus Wind und Sonne

4.1 Grundlagen zur Berechnung des Stromertragspotenzials von Wind

Die Berechnungsgrundlage für die potenziellen Windenergieerträge auf der Fläche bildete die vom Deutschen Wetterdienst ermittelte mittlere Windgeschwindigkeit für Deutschland. Die Flächen wurden für die Ertragsberechnungen rasterförmig mit Windenergieanlagen (Feature Points) belegt, wobei der Sicherheitsabstand in Höhe des 4-fachen Rotordurchmessers (UBA 2013: 16) der Anlagen zueinander berücksichtigt wurde. Anschließend wurde standort-spezifisch für jede Windenergieanlage der potenzielle Energieertrag pro Jahr berechnet. Dabei wurden die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der mittleren jährlichen Windgeschwindigkeiten (auf Nabenhöhe) mit der Leistungskennlinie der jeweiligen Windenergieanlage verschnitten.

Windgeschwindigkeit und Höhe

Die Daten des Deutschen Wetterdienstes über die mittlere Windgeschwindigkeit Deutschlands bilden die Windgeschwindigkeit auf einer Höhe von 100 m über dem Erdboden ab. Mit zunehmender Höhe über dem Erdboden ändert sich jedoch die durchschnittliche Windgeschwindigkeit, weshalb die Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe berechnet werden muss.

Die Windströmungen werden von der Bodenrauigkeit beziehungsweise der Oberflächenbeschaffenheit der Landschaft beeinflusst (HUPFER & KUTTLER 2005: 138). Für eine Höhenextrapolation der Windgeschwindigkeiten wurde das logarithmische Windgesetz angewendet, auch logarithmisches Windprofil genannt, das es ermöglicht, die mittlere Windgeschwindigkeit auf einer beliebigen Höhe näherungsweise zu ermitteln. Dabei gilt:

Logarithmisches Windprofil:

$$v(h_2) = v(h_1) \cdot \frac{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)}$$

h_1 : Referenzhöhe [h_1] = m

h_2 : neue Höhe [h_2] = m

$v(h_1)$: Windgeschwindigkeit in Referenzhöhe [$v(h_1)$] = m/s

$v(h_2)$: Windgeschwindigkeit in neuer Höhe [$v(h_2)$] = m/s

z_0 : Bodenrauigkeit [z_0] = m

Die Bodenrauigkeit [z_0] ist dabei abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit der Landschaft (LUNDTANG PETERSEN & TOREN 1990: 44) (vgl. Tab. 10).

Auf Grundlage der Geobasisdaten war eine Differenzierung der Oberflächenbeschaffenheit nur schwer möglich, daher wurde bei der Berechnung der Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe eine Bodenrauigkeit von 0,10 m angenommen. In Anbetracht der Raumwiderstände wurde davon ausgegangen, dass die Anlagen eher auf landwirtschaftlichen Flächen gebaut werden als auf strukturreichen, waldreichen Flächen oder in bebauten Gebieten.

Tab. 10: Die Bodenrauigkeit in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit der Landschaft (LUNDTANG PETERSEN & TOREN 1990: 44)

Bodenrauigkeit z_0	Oberflächenbeschaffenheit
10–4 m	Wasserflächen
3•10–4 m	Sandoberflächen
10–3 m	Schneeoberflächen
5•10–3 m	Blanke Erde
0,01 m	Flughafen (Start- und Landebahn), Weidegras
0,03 m	Landwirtschaftliches Gelände mit sehr wenigen Gebäuden, Bäumen usw.
0,05 m	Landwirtschaftliches Gelände mit offenem Erscheinungsbild
0,10 m	Landwirtschaftliches Gelände mit geschlossenem Erscheinungsbild
0,20 m	Viele Bäume und/oder Büsche
0,30 m	Bebautes Gelände
0,50 m	Vorstädte
1,00 m	Stadt, Wald

Relative Häufigkeitsverteilung

Da der Wind nicht durchgängig gleichmäßig weht, war es für die Ertragsberechnungen notwendig, die relative Verteilung der Windgeschwindigkeiten zu ermitteln. Die relative Häufigkeit bildet ab, wie beständig eine bestimmte Windgeschwindigkeit an einem Standort vorkommt. Die Verteilung der Windgeschwindigkeiten wurde benötigt, um anschließend über die Kennlinie der jeweiligen Windenergieanlage den potenziellen Energieertrag berechnen zu können. Die relative Häufigkeitsverteilung lässt sich über die Weibull-Verteilung gut annähern. Benötigt werden die mittlere Windgeschwindigkeit, der Formparameter (Form der Verteilung/Variabilität der Winde) und der Skalierungsparameter (beschreibt die mittlere Windgeschwindigkeit):

Weibull-Verteilung:

$$(v) = \frac{k}{a} \cdot \frac{v^{k-1}}{a} \cdot \exp\left(-\left(\frac{v}{a}\right)^k\right)$$

v : Windgeschwindigkeit [v] = m/s

k : Formparameter [k] = 1

a : Skalierungsparameter [a] = m/s

Vom Deutschen Wetterdienst sind nicht für alle Höhen die Weibull-Parameter gegeben, weshalb die relative Häufigkeitsverteilung mit Hilfe der Rayleigh-Verteilung berechnet wird. k wird in den meisten Fällen als monoton steigend angenommen. Messungen haben allerdings ergeben, dass diese Extrapolation nur eingeschränkt gültig ist (SEIFERT 2002: 2). Ab einer Höhe von 70 m bis 80 m nimmt der k -Wert stärker ab, weshalb k schwer ermittelt werden kann.

Da der Formparameter in Nordeuropa durchschnittlich bei 2 liegt, wird $k = 2$ gesetzt, wodurch sich die sogenannte Rayleigh-Verteilung ergibt, die es ermöglicht, die relative Häufigkeitsverteilung anzunähern.

Rayleigh-Verteilung ($a_{k=2}$ und $k = 2$):

$$(v) = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{v}{\bar{v}^2} \cdot \exp\left(-\frac{\pi}{4} \cdot \frac{v^2}{\bar{v}^2}\right)$$

Abb. 18 zeigt die relative Verteilung der Windgeschwindigkeiten bei einer mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit von 6,0 m/s.

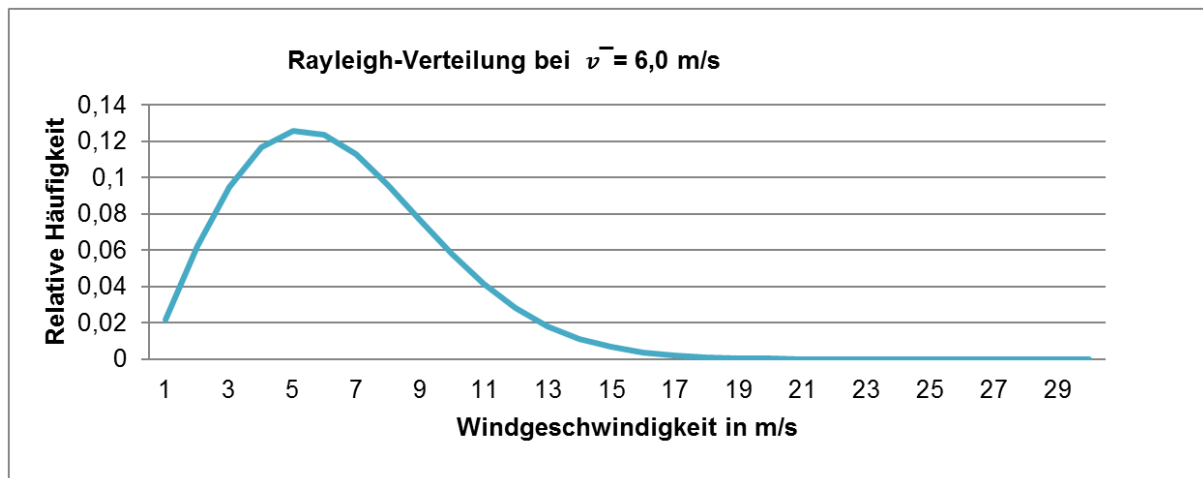


Abb. 18: Rayleigh-Verteilung bei $v = 6$ m/s

Potenzieller Stromertrag

Für die Berechnungen des Stromertragspotenzials wurden für alle in Deutschland vorkommenden mittleren Windgeschwindigkeiten die relativen Häufigkeiten berechnet. Diese Häufigkeiten wurden anschließend mit der Kennlinie der betrachteten Windenergieanlage verschnitten. Der potenzielle Stromertrag an einer Anlage an einem bestimmten Standort resultiert also aus dem Produkt der Stundenzahl ($8766 \text{ h} \triangleq 1 \text{ a}$), der relativen Häufigkeit der einzelnen Windgeschwindigkeiten und der Leistung der Anlage in Bezug auf die jeweilige Windgeschwindigkeit und der anschließenden Addition der Produkte der einzelnen Windgeschwindigkeiten.

4.2 Grundlagen zur Berechnung des Stromertragspotenzials von Photovoltaik auf Dachflächen

Für die Ermittlung des PV-Ertragspotenzials wurde zunächst auf Grundlage der Gebäudeumrisse Deutschlands das nutzbare Dachflächenpotenzial zur Installation von PV-Anlagen berechnet. Potenziell können alle Dachflächen mit PV-Anlagen ausgestattet werden, wobei sich der Anteil der zur Verfügung stehenden Dachfläche zum einen aufgrund von Ausbauten auf den Dächern sowie zum anderen aufgrund der Abweichung der Ausrichtung der Gebäude zur Südausrichtung verringert. Nach der Ermittlung des Dachflächenpotenzials wurde dieses mit den standortbedingten natürlichen Gegebenheiten und der Leistungseffizienz bzw. dem Wirkungsgrad der gewählten PV-Anlage verschnitten und so das Stromertragspotenzial ermittelt (vgl. Abb. 19).



Abb. 19: Vorgehen zur Ermittlung des Stromertragspotenzials aus Photovoltaik auf Dachflächen

4.2.1 Ermittlung des Dachflächenpotenzials

Für die Ermittlung der nutzbaren Dachfläche wurde unterschieden zwischen Wohngebäuden und Industrie- und Gewerbegebäuden. Bei Wohngebäuden wird von einem Satteldach, bei Industrie- und Gewerbegebäuden von einem Flachdach ausgegangen (GUTACHTEN ENERGIESZENARIEN 2050: 19). Grundlage für die Berechnung der nutzbaren Dachfläche bilden die Hausumringe (Umringspolygone von Gebäudegrundrissen) des Bundesamtes für Kartographie und Geoinformatik, die die Grundrisse aller in Deutschland befindlichen Gebäude abbilden.

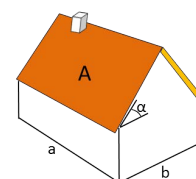
Bei Flachdächern entspricht die Dachfläche der Gebäudegrundfläche. Bei schrägen Dächern lässt sich die Dachfläche über die Grundfläche und den Neigungswinkel des Daches berechnen. Die Methodik zur Berechnung der potenziellen Dachfläche beruht auf dem Vorgehen der Studie „Abschätzung des Photovoltaik-Potentials auf Dachflächen in Deutschland“ (LÖDL et al. 2010).

Um zwischen Flach- und Schrägdach unterscheiden zu können, wurden die Hausumringe mit den Industrie- und Gewerbegebieten verschnitten, wie sie im DLM gegeben sind. Alle Gebäude innerhalb der Industrie- und Gewerbeflächen wurden als Gebäude mit Flachdach deklariert (GUTACHTEN ENERGIESZENARIEN 2050: 19). Bei den restlichen Gebäuden wurde von einem Schrägdach ausgegangen.

Für die Ermittlung des Dachflächenpotenzials wurde davon ausgegangen, dass der Dachfirst immer parallel zur längeren Seite des Grundrisses verläuft. Der Neigungswinkel, der für die Berechnungen zugrunde gelegt wird, entspricht einer Neigung von 35°. Bei der Ermittlung des Dachflächenpotenzials wurde lediglich eine Dachseite berücksichtigt, wobei es sich um die nach Süden ausgerichtete Seite handelt. Bei der Ausrichtung von Gebäuden von exakt ±90° nach Süden wird die potenzielle Dachfläche verdoppelt. Der Ermittlung des Dachflächenpotenzials von Gebäuden mit Schrägdach wird folgende Gleichung zugrunde gelegt:

Dachflächenpotenzial (A) gilt:

$$A = a * b * \frac{1}{2 * \cos(\alpha)}$$



Grundsätzlich kann sowohl bei Schräg- als auch bei Flachdächern die Dachfläche nicht vollständig genutzt werden. Fenster, Schornsteine und andere Aufbauten mindern den Anteil der nutzbaren Dachfläche:

- (1) 20 % der Dachfläche bei Schrägdächern sind nicht nutzbar, da sie von Kaminen, Dacherkern, Lüftungsschächten, Dachfenstern und ähnlichem versperrt werden.
- (2) Abschattungseffekte bei dichter Bebauung oder durch Bäume bei freistehenden Gebäuden vermindern das Dachflächenpotenzial um weitere 20 %.

Verschiedene Studien (QUASCHNING 2010, STAIß 1996, KALTSCHMITT & WIESE) gehen ebenfalls davon aus, dass ca. 40 % der Dachfläche nicht für die Errichtung von PV-Anlagen geeignet sind. Die Praxisstudie „Potentiale der Solarenergienutzung bei Industrie und Gewerbe in Berlin“ (QUASCHNING 1998) bestätigt diese Annahmen. Im Folgenden wurden daher immer 60 % der potenziellen Dachfläche (sonnenzugewandte Seite bei Schrägdächern) als geeignet betrachtet. Um einen höchstmöglichen Ertrag zu erzielen, wird bei Flachdächern von einer Ost-West-Ausrichtung und einem Neigungswinkel von 10° der Module ausgegangen (vgl. Abb. 20). Durch diese Anordnung ist es möglich, rund 80 % der Dachfläche mit PV-Modulen zu belegen anstelle der üblichen 33 % (NIEPELT mdl.). Aufgrund der erhöhten potenziell installierbaren Leistung können so trotz der nicht optimalen Aufständigung höhere Erträge erzielt werden.

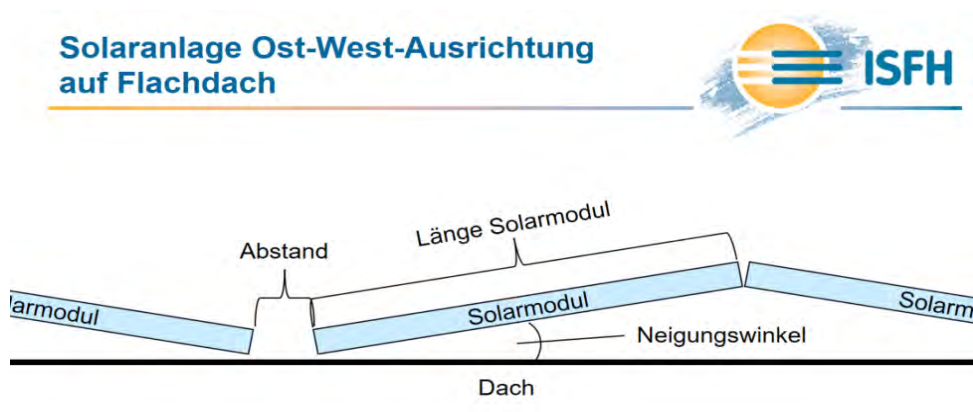


Abb. 20: Annahmen zur Ausrichtung der PV-Module auf Flachdächern (NIEPELT 2016)

4.2.2 Berechnung des Stromertragspotenzials von Photovoltaik auf Dachflächen

Auf Grundlage des zuvor ermittelten Dachflächenpotenzials wurde das Stromertragspotenzial für Photovoltaik im Innenbereich berechnet. Benötigt wurden hierzu der Wirkungsgrad der PV-Module sowie die standortbedingte PV-Strahlung. Der Wirkungsgrad der PV-Anlagen wurde auf die benötigte Fläche für die Installation von 1 kWp umgerechnet, wobei 100 % Wirkungsgrad $1 \text{ m}^2/\text{kWp}$ (PHOTOVOLTAIK: [www](http://www.photovoltaik.de)) entsprechen würden.

Anhand der Dachfläche und der Angaben über die benötigte Fläche der PV-Module für die Installation von 1 kWp wurde ermittelt, wie viel kWp Leistung auf einem Gebäude installiert werden kann. Anschließend wurde dies mit einer PV-Produktionskarte Deutschlands verglichen. Die PV-Produktionskarte Deutschlands beinhaltet die Informationen über die produzierten kWh pro Jahr bei der Installation von 1 kWp. Die Angaben der Karte berücksichtigen dabei eine Ausrichtung der Module nach Süden, eine Neigung der Module von 30° , einen Performance Ratio von 0,82 sowie einen Temperaturkoeffizienten von $-0.5\%/K$.

Da Schrägdächer nur selten eine exakte Ausrichtung nach Süden aufweisen, wurde abhängig von der Ausrichtung der Gebäude eine Minderung der Stromertragspotenziale berücksichtigt. Je höher die Abweichung zur Südausrichtung, desto höher ist die Minderung (vgl. Abb. 21). Auch bei der Anordnung der Module auf den Flachdächern wird dieser Umstand berücksichtigt.

Ebenso spielte bei den Stromertragsberechnungen der Neigungswinkel der Anlagen eine Rolle. Die Neigung der Dächer liegt in Deutschland zwischen 20° und 50° , sodass sie oftmals von der für PV-Nutzung optimalen Neigung von 30° abweicht. Bei einer nach Süden ausgerichteten Anlage spielt der Neigungswinkel eine geringere Rolle als bei der Ausrichtung der Anlage in andere Richtungen. Die Neigung der Dächer und der Anlage können verschiedene Auswirkungen auf das Ertragspotenzial haben. Flache Dächer haben im Sommer aufgrund der hochstehenden Sonne einen Vorteil, während steile Dächer aufgrund der im Winter tiefstehenden Sonne einen Ertragsvorteil haben. Generell kann davon ausgegangen werden, dass es aufgrund der Abweichungen von 10° bis 20° zur optimalen Neigung nur zu Ertragsverlusten im einstelligen Prozentbereich kommt (vgl. Abb. 21). Aufgrund dieser geringen Ertragsverluste und einer nicht möglichen Identifizierung der Dachneigung der einzelnen Gebäude wurde ein Ertragsverlust lediglich auf Grundlage der Ausrichtung der Gebäude berücksichtigt.

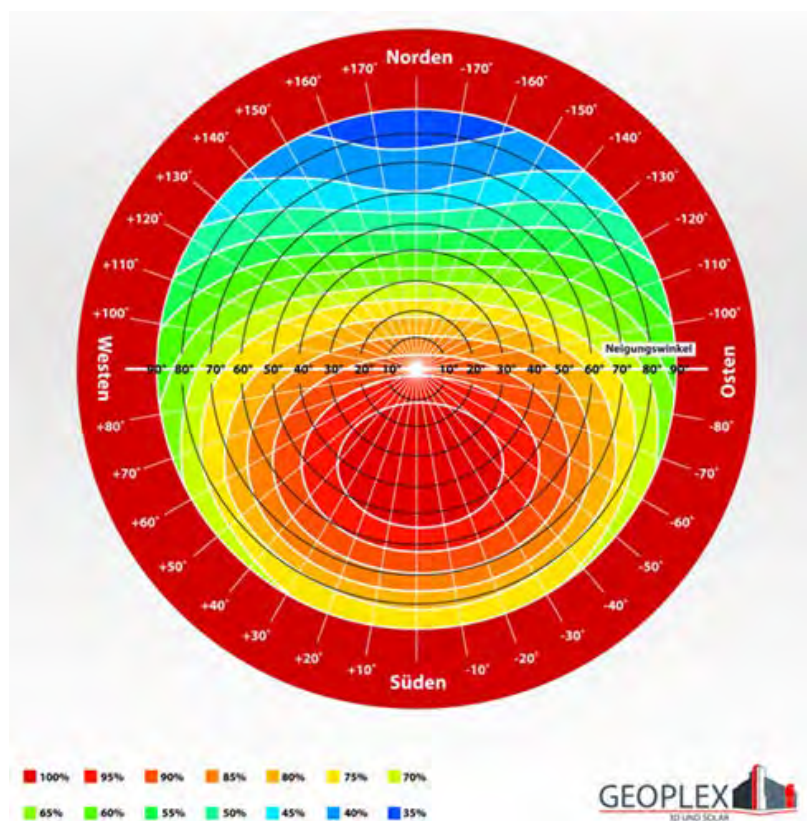


Abb. 21: Nutzbare Globalstrahlung (in %) vom maximal höchsten Wert (100 %) (GEOPLEX o.J.)

5 Ermittlung der Konsequenzen für die Netzinfrastuktur in 2050

5.1 Grundsätze der Netzplanung

Die wesentliche Aufgabe des Energieversorgungssystems besteht in einer möglichst effizienten Verteilung der elektrischen Energie vom Erzeuger zum Verbraucher. Zur Sicherstellung dieser Aufgabe wird in der Netzplanung die zukünftige Versorgungsaufgabe durch die Aufstellung von Zukunftsszenarien prognostiziert und das Netz ausreichend dimensioniert, um Netzengpässe zu vermeiden. Die Analysen und Projektionen des Endenergieverbrauchs in Kapitel 2 zeigen, dass für eine vollständige Umstellung der Energieversorgung aus erneuerbaren Energien eine massive Elektrifizierung des Gesamtverbrauchs (Sektorenkopplung) notwendig ist. Dafür ist das elektrische Energieversorgungssystem bisher jedoch nicht ausgelegt und muss dementsprechend erweitert und optimiert werden.

Netzverstärkungs- und -ausbauplanungen werden sowohl in der Bedarfsermittlung als auch in der Planung vorwiegend nach dem NOVA-Prinzip (vgl. Abb. 22) vorgenommen. Um den Ausbaubedarf und somit vor allem auch die Auswirkungen auf die Umwelt zu minimieren, gilt für alle Netzebenen: Optimierung vor Verstärkung vor Ausbau.

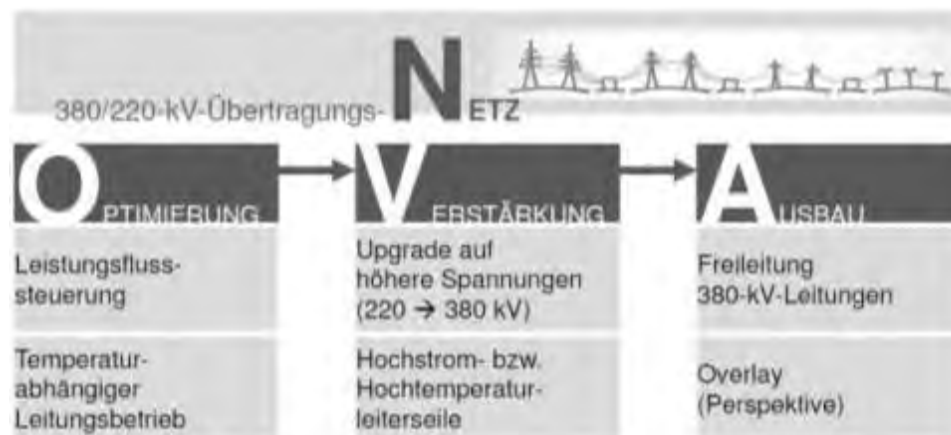


Abb. 22: NOVA-Prinzip bei Netzverstärkungs- und Netzausbauplanungen (GOLLETZ 2012)

Bei der Betrachtung einzelner Ausbauvorhaben muss weiterhin zwischen systemrelevanten Kriterien, wie der Verbesserung der Systemstabilität (beispielsweise durch Kuppelleitungen zu Nachbarländern) und der reinen Übertragungsaufgabe (beispielsweise Netzanbindung eines Offshore-Windparks) unterschieden werden. Für jedes Vorhaben gelten somit auch unterschiedliche gesetzliche Vorgaben und Planungsschritte.

Aufgrund des komplexen Aufbaus und der vollkommen unterschiedlichen Anforderungen wird die Betrachtung des Energieversorgungssystems im Folgenden zum einen in die Übertragungsnetzebene als europäisches Elektroenergiesystem mit 37.000 km Leitungslänge in der Bundesrepublik Deutschland und zum anderen in das Verteilnetz als lokale Energietransportebene unterteilt. Die Verteilnetzebene mit dem Schwerpunkt der Mittel- und Niederspannungsebene stellt mit annähernd 1,7 Millionen Leitungskilometern 93,5 % der elektrischen Energieinfrastruktur dar. Aus diesem Grund sind die Verteilnetze auch für 22 % der Stromkosten bei den Endkunden verantwortlich, wobei 15 % auf die Mittel- und Niederspannungsebene entfallen.

Es zeigt sich, dass die volatile erneuerbare Stromerzeugung das elektrische Energieversorgungsnetz sowie die Energiewirtschaft in allen Netzebenen vor ganz neue Aufgaben stellt. Aufgrund der knappen Ressourcen und den bisher begrenzten Vorarbeiten mit dem Fokus der Naturverträglichkeit, wird an dieser Stelle der Fokus auf die Verteilnetzebene gelegt, so dass mithilfe des entwickelten Bottom-Up Ansatzes zu einem späteren Zeitpunkt der Fokus auf die höheren Netzebenen gelegt werden kann.

5.2 Übertragungsnetz und europäisches Elektroenergiesystem

Das europäische Elektroenergiesystem ist über die Jahre historisch gewachsen. Der Netzausbau begann in der Regel in den Städten, die im Laufe der Zeit aufgrund unterschiedlichster Vorteile ihre Netze miteinander verknüpften. Auf diese Weise sind die einzelnen Netzgebiete immer stärker gewachsen (vgl. Abb. 23) und heute über Kontinentaleuropa hinaus miteinander vernetzt.

Der aktuelle Netzausbaubedarf, der für Deutschland zweijährlich im Netzentwicklungsplan (NEP) mithilfe von unterschiedlichen Szenarien konkretisiert wird, ist im Wesentlichen zwei Ursachen zuzuordnen:

Der eine Treiber ist die Transformation des Energieversorgungssystems infolge des Ausbaus der erneuerbaren Energien. Thermische Großkraftwerke in der Nähe der Lastschwerpunkte werden aus dem Markt verdrängt und durch regional und vielfach zeitlich divergent zum Verbrauch agierende Erzeugungsanlagen auf Basis erneuerbarer Energie ersetzt.

Der andere Treiber ist die fortschreitende Liberalisierung des Strommarkts und der damit zunehmende grenzüberschreitende Stromhandel im European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E), so dass die grenzüberschreitenden Leistungsflüsse weiterhin ansteigen. Dies zeigt sich auch in der zunehmenden internationalen Zusammenarbeit der Übertragungsnetzbetreiber, wie beispielsweise bei der Regelleistungsbereitstellung, der Systemführung sowie der Netzausbauplanung.



Abb. 23: Entwicklung des deutschen Höchstspannungsnetzes 1948 - 1960 - 2012 (HOFMANN et al. 2012 b und ALEXRK2 (OPENSTREETMAP DATA))

Beide Treiber führen zu einem steigenden Energietransportbedarf, so dass die bestehenden Engpässe beseitigt werden müssen. Die Bundesregierung hat als Reaktion einen gesetzlichen Rahmen zur Realisierung und Beschleunigung des Netzausbaus vorgelegt. Abb. 24 zeigt aktuelle Ausbauvorhaben für Deutschland aus dem Netzentwicklungsplan 2015 (BNETZA 2015) und die langfristigen Ziele in ganz Europa nach dem Ten Years Network Development Plan 2012 (ENTSO-E 2012).

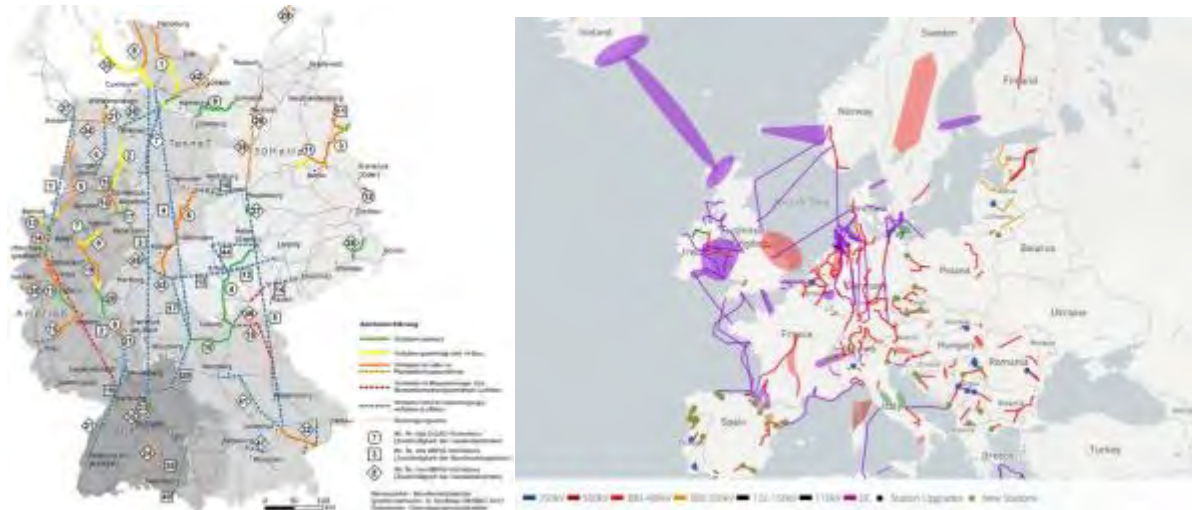


Abb. 24: Netzausbau in Deutschland (BNETZA 2015) und im ENTSO-E-Netzgebiet (ENTSO-E 2016)

Da der Schwerpunkt dieses Projektes auf einer Betrachtung von Energiebilanzen innerhalb des deutschen Bundesgebietes liegt und die zeitlichen und personellen Ressourcen eng bemessen waren, können weder eigene Aussagen zu der für die Szenarien erforderliche Netzentwicklung in der Übertragungsnetzebene noch zum ENTSO-E-Netzgebiet erfolgen.

Aus diesem Grund beschränken sich die Auswertungen in der Übertragungsebene auf die Darstellung der aktuellen und zukünftigen Betriebsmittel unter Berücksichtigung der in den aktuellen Netzausbauplänen ausgewiesenen Ausbauvorhaben bis zum Jahr 2030. Die Auswirkungen der Netzentwicklungen können so durch ihren Flächenbedarf bei der Berechnung der Erzeugungskapazitäten berücksichtigt werden.

5.3 Verteilnetzebene

Während die Übertragungsnetzebene dem europaweiten Handel und dem Energieaustausch dient, erfolgt auf der Verteilnetzebene der Anschluss der Endkunden und der überwiegende Teil der erneuerbaren Energieanlagen. Neben der Hochspannungsebene mit einer Nennspannung von 110 kV sind dies die Mittel- und Niederspannungsebenen. Während die Nennspannung im Niederspannungsnetz (NS-Netz) auf 0,4 kV (oder 400 V) festgelegt ist, gibt es in der Mittelspannungsebene (MS-Ebene) unterschiedliche Ausprägungen zwischen 6 und 30 kV, wobei die Hauptspannungsebenen 10 und 20 kV betragen (DIN EN 50160).

Etwa 350.000 Ortsnetzstationen koppeln die Mittel- und Niederspannungsebenen miteinander. Finanziert wird der Betrieb und Ausbau dieser Netzebenen über eine Umlage innerhalb des Haushaltsstrompreises, die im bundesweiten Durchschnitt etwa 15 % beträgt (BNETZA 2015).

Verbraucher und Einspeiser kleiner Leistung bis etwa 100 kW werden in der Regel an das NS-Netz angeschlossen, wie zum Beispiel private Haushalte und kleine Gewerbebetriebe. Kunden und Einspeiser, wie Industriebetriebe und Windparks von 100 kW bis etwa 20 MW, werden an das MS-Netz angeschlossen. Die Größe der einzelnen Versorgungsgebiete ergibt sich zum einen aus der Lastdichte, zum anderen aus den technischen Anforderungen. Es ergeben sich im Idealfall radiale Versorgungsgebiete mit maximalen Versorgungsradien von etwa 800 m in der Niederspannungsebene und 20 km in der MS-Ebene.

5.4 Auswirkungen der Zukunftsszenarien auf die Auslegung des Niederspannungsnetzes

Im Folgenden werden die netzseitigen Auswirkungen der einzelnen Komponenten der Zukunftsszenarien (lastseitig: Wärmepumpen und Elektrofahrzeuge; einspeiseseitig: PV-Anlagen) auf die NS- und MS-Netze analysiert, um daraus das Szenario für den exemplarischen Netzausbaubedarf eines Umspannwerkbereichs abzuleiten. Die Überlagerung der Einzelkomponenten erfolgt zunächst in diesem Beispiel ohne überlagerte und optimierte Steuerung (Demand-Side-Management). Der Einsatz von Batteriespeichern und Demand-Side-Management führt zusätzlich zu einer Entlastung des Netzausbaus, allerdings ist dieses im wesentlichen Wirkung auf den Tag / Nacht-Ausgleich begrenzt.

Insbesondere in der Verteilnetzebene erfolgt die Netzdimensionierung über auslegungsrelevante Netznutzungsfälle, das heißt über die angenommenen maximalen Belastungs- und Einspeiseszenarien. Dabei werden die Betriebsmittel klassisch so dimensioniert, dass die technischen Randbedingungen wie die Stromtragfähigkeit, die Spannungsbänder und die Kurzschlussleistung in diesen „Worst-Case“-Fällen eingehalten werden. Hierdurch können aufwendige Berechnungen über den Jahreszeitraum eingespart werden. Aus den Netznutzungsfällen kann abgeleitet werden, dass in der Regel zu keinem Zeitpunkt Betriebsgrenzen verletzt werden. In Zukunft werden vermehrt aktive Eingriffe in die Netzbetriebsführung dafür sorgen, dass durch eine geschickte Steuerung der Lasten und Einspeiser sowie der Batteriespeicher die Anzahl und Höhe der Extremszenarien verringert wird. Dieses kann bereits in der Netzplanung berücksichtigt werden. Hierzu zählen insbesondere eine begrenzende Spitzenkappung bei EEG-Anlagen oder auch eine gesteuerte Ladung bei starker Durchdringung mit Elektrofahrzeugen. Doch auch wenn diese Steuerung den Netzausbaubedarf mildern kann, wird es langfristig zu einem weiteren Netzausbau in vielen Ortsnetzen kommen müssen (DENA 2012), um das Zielszenario mit einer Versorgung aus 100 % erneuerbaren Energien zu erreichen.

Kraft/Licht/IKT/Kälte

Der typische Lastgang diverser Haushaltsgeräte setzt sich im Wesentlichen aus zwei Komponenten zusammen. Zum einen sind dies Geräte, die dauerhaft oder mit einer gewissen Periodizität einen Energiebedarf aufweisen. Dies sind zum Beispiel die Telefon- und WLAN-Basisstationen oder der Kühlschrank. Die zweite Gruppe sind stochastisch auftretende höhere Lasten, zum Beispiel Kochfelder oder Waschmaschinen. Abb. 25 zeigt den gemessenen Lastgang eines modernen Zweipersonenhaushaltes im Sommer an einem Werktag. Man erkennt deutlich die hohen Spitzenbedarfswerte während der Kochvorgänge am Morgen und am Abend. Durch moderne LED-Beleuchtung fällt der Lichtenergiebedarf am Abend nicht mehr ins Gewicht.

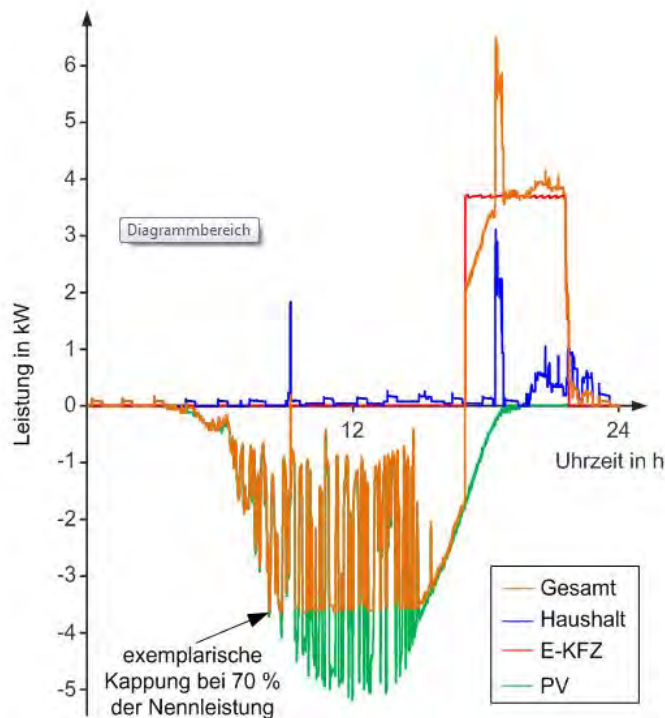


Abb. 25: Gemessener Lastgang eines modernen Zweipersonenhaushaltes

Die Einschalt- und Benutzungszeiten der einzelnen Geräte hängen stark von den Gewohnheiten der Kunden ab. In verschiedenen Forschungsprojekten (FIEDELDEY 2011, DICKERT 2014) wurde untersucht, inwiefern durch moderne Steuerungs- und Anreizsysteme eine Beeinflussung des Lastgangs der üblichen Haushaltsgeräte möglich ist. Es wurden allerdings lediglich 2 % der Energiemenge tatsächlich verschoben. Bei der Reduktion des Energiebedarfs muss beachtet werden, dass die einzelnen Leistungsspitzen der Haushalte nahezu konstant bleiben, hierbei allerdings die Grundlast und die hohe Last am Abend stark abfällt. Vor diesem Hintergrund ist fraglich, ob ein Demand Side Management im Haushaltsbereich (LÜNSDORF 2012) überhaupt noch erforderlich ist und ob der Energieaufwand für die Steuerungstechnik die möglichen Effizienzsteigerungen rechtfertigt (DICKERT 2014).

Trotz dieser Veränderungen zeigt sich, dass das Lastverhalten der Haushalte, sofern man von einer vollelektrischen Elektrifizierung (KAUFMANN 1995) ausgeht, immer noch mit dem klassischen Gleichzeitigkeitsfaktor beschrieben werden kann (GROIS 2016).

Die auftretende Spitzenleistung von stochastisch geprägten Lasten wird mithilfe von Gleichzeitigkeitsfaktoren beschrieben. Der Gleichzeitigkeitsfaktor beschreibt den Beitrag der Leistungsspitze eines Verbrauchers bzw. Haushaltes zur gesamten Spitzenleistung und liegt üblicherweise zwischen $g=0,1$ bis $g=1,0$. Da die Leistungsspitzen unterschiedlicher Verbraucher zu unterschiedlichen Zeiten auftreten, entspricht die auslegungsrelevante Spitzenleistung der summierten Gesamtleistung bei weitem nicht der summierten Spitzenleistungen der Einzellasten.

Mobile Anwendungen – Elektromobilität

Elektrokraftfahrzeuge (E-KFZ) werden – sofern möglich – in den haushaltsnahen Garagen oder auf den Stellplätzen geladen und somit in die bestehenden NS-Netze integriert. Die Anschlussleistungen, die bei einer Ladung von E-KFZ in Garagen realisiert werden können, sind in (DIN EN 62196) genormt und betragen zwischen 3,0 kW bei einphasigem Anschluss und bis zu 44 kW bei dreiphasigem Anschluss. Während eines Feldtests hat sich allerdings gezeigt, dass die E-KFZ auch nicht erlaubte Lademodi verwenden, wie zum Beispiel 7,2 kW bei einphasigem Anschluss (SCHLÖMER 2015). Höhere Ladeleistungen als 44 kW erfordern in der Regel Gleichstromladestationen mit gesonderten Netzanschlüssen.

Problematisch an der aktuellen Netzintegration von E-KFZ ist zum einen, dass den Verteilnetzbetreibern nicht gemeldet wird, wo E-KFZ regelmäßig geladen werden. Zum anderen korrelieren die ungesteuerten Lastgänge der E-KFZ mit den üblichen Lastgängen der Ladestandorte, wie im Folgenden dargestellt wird. Abb. 26 zeigt den im Rahmen eines Forschungsprojektes durchschnittlichen, natürlichen Lastgang von 30 E-KFZ. Es zeigt sich deutlich, dass private E-KFZ gerade in den Abendstunden geladen werden und damit die Lastspitzen zusätzlich verstärken, obwohl die E-KFZ in der Regel die ganze Nacht an das Netz angeschlossen sind. Das Laden von geschäftlich genutzten Fahrzeugen eines Fahrzeugpools korreliert dahingegen stark mit dem Lastgang von Gewerbebetrieben.

Durch die lange Verfügbarkeit der E-KFZ an den Ladestationen bietet sich ein hohes Lastverschiebungspotenzial wie bei elektrisch betriebenen Heizsystemen an.

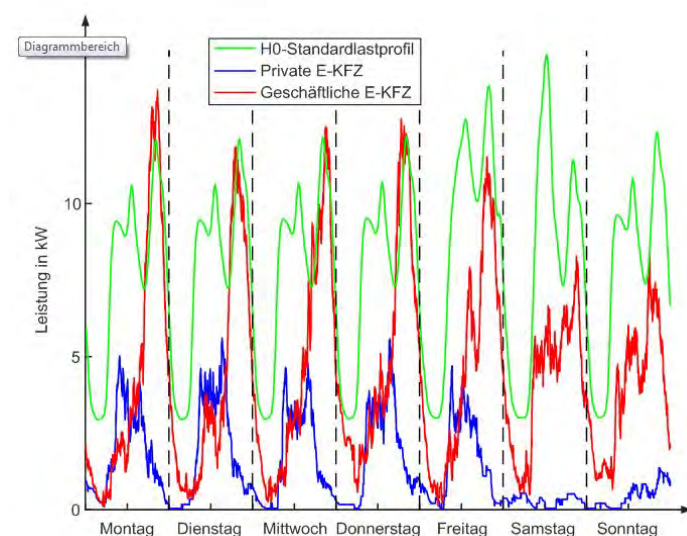


Abb. 26: Durchschnittlicher Lastgang des ungesteuerten Ladeverhaltens von 20 privaten und zehn geschäftlichen E-KFZ im Vergleich zu H0-Standardprofil während einer Woche

Gebäudewärme

Es ist davon auszugehen, dass bei hoher Durchdringung eines Wohngebietes mit Wärmepumpen diese bei geringer Außentemperatur mit ihrer Bemessungsleistung arbeiten, daher ergibt sich ein sehr hoher Gleichzeitigkeitsfaktor von $g_{\infty} = 0,93$, wobei beachtet werden muss, dass für weniger als zehn Anlagen von einem Gleichzeitigkeitsfaktor von 1 ausgegangen werden muss (LEHDE 2013).

Aufgrund der hohen Gleichzeitigkeit elektrischer Raumheizungsgeräte gibt es seitens der technischen Anschlussbedingungen Regelungen, dass die Einschaltzeiten dieser Anlagen durch den Verteilnetzbetreibers gesteuert werden dürfen (BDEW 2011).

Photovoltaik

Photovoltaikanlagen weisen aufgrund der vergleichbaren Sonnenverhältnisse in räumlich nahen Gebieten eine sehr hohe Gleichzeitigkeit der elektrischen Energieeinspeisung auf. Zur Simulation des Leistungseinspeisung der Photovoltaikanlagen werden die unterschiedlichen Dachausrichtungen zur Ermittlung der maximalen zur erwartenden Einspeiseleistungen berücksichtigt.

Zur Bestimmung der zulässigen Einspeiseleistungen bzw. als Ansatzpunkt für den Netzausbau werden die nach dem vereinfachten Verfahren in VDE 2011 festgelegten Grenzwerte übernommen, bei Einsatz von regelbaren Transformatoren gelten dahingegen die Grenzen der DIN VDE 50160.

Batteriespeicher und Demand-Side-Management

Für den Einsatz von Batteriespeichern gerade in der Verteilnetzebene gibt es grundsätzlich zwei unterschiedliche Einsatzszenarien, wobei es sich in beiden Fällen im Wesentlichen um einen Tag/Nacht-Ausgleich handelt (vgl. Anhang 6.5: HANKE-RAUSCHENBACH 2016):

- Einsatz von Speichern im privaten Umfeld zur Erhöhung des Eigenverbrauchs von privaten Erzeugungsanlagen wie Photovoltaikanlagen oder Blockheizkraftwerken
- Einsatz von Zentralspeichern im Netz zur Verringerung der zu transportierenden Leistung

Nach HANKE-RAUSCHENBACH (2016) sind aus energetischer Sicht für diese Aufgabe Systeme mit hohem Ein- und Ausspeicherwirkungsgrad und geringen Durchspeicherkosten für 8–12 Stunden gefragt. Die Speicherkapazität darf nicht zu groß sein, damit 250–300 Vollzyklen pro Jahr möglich sind. Speicher für den Ausgleich des wöchentlichen oder jahreszeitlichen Energiebedarfs sind aufgrund der notwendigen zu speichernden Energiemenge und der damit verbundenen Lokations- und Leistungsanforderungen eher im Übertragungsnetz zu finden und werden dabei zur Bestimmung des Netzausbaubedarfs in Zukunft innerhalb der Netzentwicklungspläne berücksichtigt. Aufgrund der Fokussierung auf Energiebilanzen konnte keine weitere Modellierung dieser Speicher erfolgen (siehe Kapitel 1.4).

Optimierungsverfahren für Niederspannungsverteilstetze

Die neuen Herausforderungen für die Energieversorgungsnetze bedeuten eine höhere Belastung für die vorhandenen Netze. Um deren Ertüchtigung und Kosteneffizienz mit möglichst geringen Auswirkungen für die Umwelt durchzuführen, ist im Rahmen des Projektes ein Ortsnetz-Optimierungswerkzeug weiterentwickelt worden.

Bei der umfassenden Ortsnetzbetrachtung wird versucht, möglichst alle Freiheitsgrade, die bei der Netzplanung berücksichtigt werden können, nachzubilden. Abb. 27 visualisiert beispielhaft die möglichen Freiheitsgrade bei der Netzplanung:

- Optimierung des Schaltzustandes,
- Aufstellen neuer Stationen unter Berücksichtigung der Erschließungskosten für die Standorte,
- Abbau von Ortsnetzstationen,
- Zusammenlegungen von vorhandenen Ortsnetzstationen,
- Zubau bzw. auch Rückbau von Leitungen,
- Integration der dezentralen Spannungsregelung.

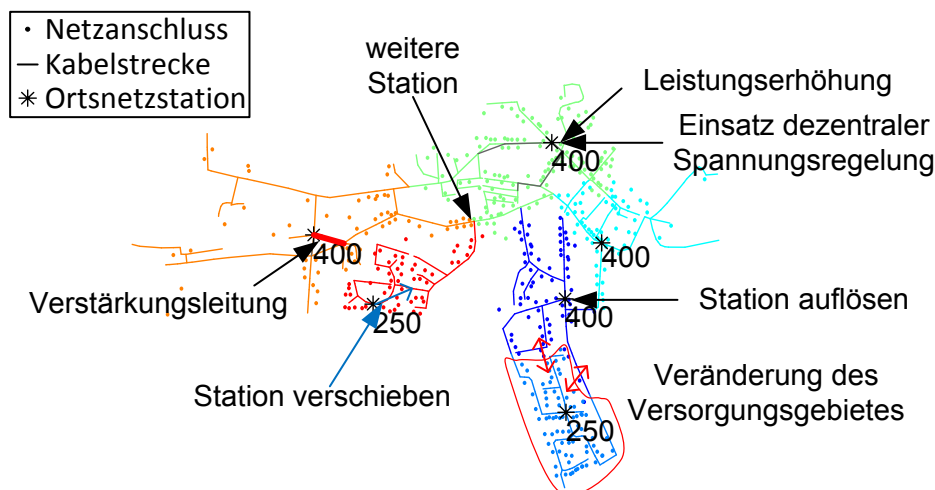


Abb. 27: Darstellung der Freiheitsgrade im Netzplanungsprozess der Niederspannungsebene

Die umfassende Ortsnetzbetrachtung basiert dabei auf einem Modell zur Lösung des Facility-Location-Problems aus dem Logistikbereich. Die übliche Fragestellung lautet dabei in der Regel, von wie vielen und von welchen Lagern oder Produktionsstätten eine Versorgung der Filialen oder Kunden am kostengünstigsten möglich ist. In diesem Fall wird die Fragestellung auf die NS-Netze übertragen, wobei die Netzanschlüsse, die zu versorgenden Kunden und die Ortsnetzstationen die zu bestimmenden Standorte darstellen.

Eine Übersicht des Verfahrens ist in Abb. 28 dargestellt: Grundlage ist ein umfassendes, auf Geoinformationssystemen (GIS) basierendes Netzmodell. Eine besondere Herausforderung bei der Berücksichtigung von realen Netzdaten besteht darin, dass die Netzpläne oftmals nicht ausreichend digitalisiert zur Verfügung stehen. Daher werden die Netzdaten bei Unvollständigkeit um synthetische modellierte Netzdaten erweitert. (SCHLÖMER 2016 a & c). Die vorhandenen Standorte und Nennleistungen der Ortsnetzstationen sowie die Koordinaten der Netzanschlüsse werden den Angaben des Verteilnetzbetreibers sowie den Projektergebnissen entnommen.

Das Netzmodell wird mit den im Rahmen der Szenarien ermittelten Energieertragspotenzialen kombiniert. Diese Informationen werden von der Heuristik aufgegriffen, die sowohl eine Standortoptimierung als auch eine Ausbauoptimierung des NS-Netzes mit dem Ziel der Kostenminimierung vornimmt. Unter den Begriff der Standortoptimierung fällt in diesem Fall die Festlegung des Stationsstandortes und des Versorgungsbereichs. Hierfür wird das Repeated-Matching-Verfahren nach (RÖNNQVIST 1999) angewendet, das in (SCHLÖMER 2016 a) für die Anwendung in der Niederspannungsebene aufbereitet wurde. Die anschließende Bewer-

tung des Standorts mit dem Versorgungsbereich ist identisch mit dem in (SCHLÖMER 2016 b) beschriebenen Optimierungsverfahren.

Bei dem Netzausbau wird zwischen zwei Varianten unterschieden, zum einen dem konventionellen und zum anderen dem Netzausbau dezentraler Spannungsregelung.

- Konventioneller Netzausbau
Der konventionelle Netzausbau verfolgt Maßnahmen zur Reduktion der Netzimpedanz durch zusätzliche Kabel, leistungstärkere Transformatoren und zusätzliche Ortsnetzstationen.
- Netzausbau mit dezentraler Spannungsregelung
Bei dem Einsatz einer dezentralen Spannungsregelung erfolgt bei Spannungsbandproblemen zunächst eine Anpassung des Übersetzungsverhältnisses im Rahmen des zulässigen Stellbereichs. Die Regelung der Spannung auf der Niederspannungsseite kann dabei im Wesentlichen über zwei Varianten erfolgen:
 - Monosensorbetrieb
 - Multisensorbetrieb

Beide Betriebsvarianten sind in (BECKER et al. 2014) ausführlich erläutert. Kann die Stufung des Transformators die Spannungsbandverletzung nicht beseitigen, oder sind weitere Plankriterien nicht erfüllt, erfolgt zusätzlich ein konventioneller Netzausbau.

Entscheidend für den Einsatz einer dezentralen Spannungsregelung ist auch, dass die Baugröße der um den Stufenschalter erweiterten Transformatoren (rONT) sich nicht oder nur minimal von der eines herkömmlichen ONT unterscheidet.

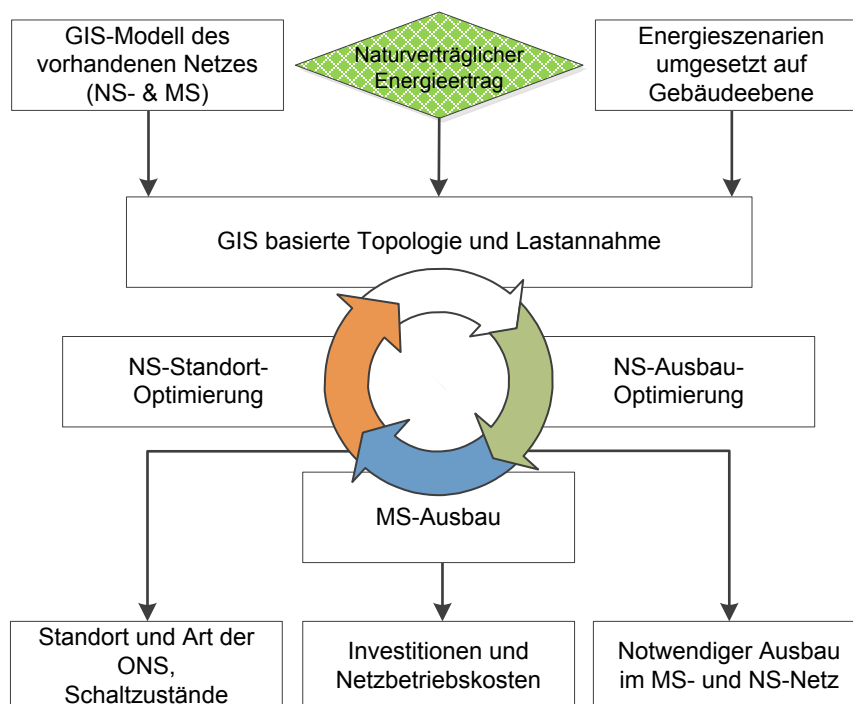


Abb. 28: Ablauf der Heuristik für die NS-Netzoptimierung II

6 Ermittlung des Raumwiderstands von Mensch und Natur gegen die Belastungen durch erneuerbare Energieanlagen

6.1 Grundsätze der Ermittlung und Klassifizierung des Raumwiderstands

Die Grundlage für die Bewertung der Mensch- und Naturverträglichkeit der verschiedenen erneuerbaren Energieträger und der Ermittlung der potenziellen Flächen zum mensch- und naturverträglichen Ausbau erneuerbarer Energien bildet eine Raumwiderstandsanalyse. Der Raumwiderstand wird hier nach dem Prinzip der ökologischen Risikoanalyse, bzw. modifizierten DPSIR-Analyse definiert (vgl. Abb. 29). Als Aggregation einer projizierten negativen Beeinflussung von Mensch und Natur durch eine definierte Anlage mitsamt ihren Belastungsfaktoren wie Lärmemissionen („pressure“) in einem bestimmten Raum und der Relevanz dieser Veränderung aufgrund des Wertes der Schutzgüter Biodiversität, Naturhaushalt und Landschaftsbild („sensitivity“). Das Ergebnis der Aggregation („relevance of impact“) wird auf einer ordinalen Skala dargestellt (sehr hoch – hoch – mittel – gering).

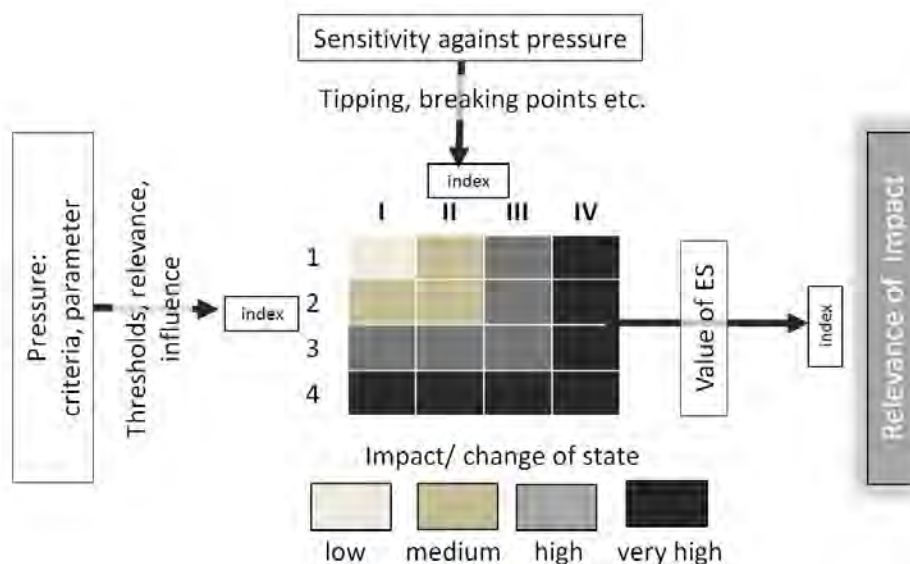


Abb. 29: Ablauf der ökologischen Risikoanalyse

Der Bewertung des Raumwiderstands wurde in der hier vorgelegten Studie auf den Raumwiderstand gegenüber Windenergieanlagen beschränkt. Es wurde das Wissen über die Stabilität und Flexibilität des Naturhaushaltes zugrunde gelegt, also über die Art, Stärke und Dauer der zu erwartenden Veränderung aufgrund eintreffender Belastungen (SCHOLLES 2008: 476).

Der Raumwiderstand und die Größe einer Fläche, auf der Beeinträchtigungen zu erwarten sind, hängt von den spezifischen Eigenschaften der Windenergieanlagen ab und unterscheidet sich daher in den einzelnen Szenarien (vgl. Kap. 7.1). Durch dieses Vorgehen können mögliche technologische Weiterentwicklungen der Windenergieanlagen bis 2050 und die dadurch veränderten Auswirkungen auf Natur und Mensch im Modell berücksichtigt werden.

Die Wertigkeit der Schutzgüter, hier Schwerpunkt Mensch sowie Arten und Biotope, wurde aus naturschutzfachlichen Vorgaben des Bundes und der Länder abgeleitet. Neben dem heutigen Zustand von Natur und Landschaft wurde im Modell auch der angestrebte Zielzu-

stand der Landschaft entsprechend der Nationalen Biodiversitätsstrategie berücksichtigt. So wurde davon ausgegangen, dass deren Ziele bis zum Jahr 2050 umgesetzt sind.

Die Fläche der Bundesrepublik wurde entsprechend der folgenden Definitionen mit sehr hohem, hohem, mittlerem oder geringem Raumwiderstand bewertet (vgl. Abb. 29):

Flächen mit sehr hohem Raumwiderstand:

Gebiete, in denen der Bau der jeweiligen Energieanlagen verboten, bzw. aus technischen Gründen nicht möglich ist oder Flächen, auf denen mit sehr hohen Auswirkungen auf Mensch oder Natur zu rechnen ist.

Flächen mit hohem Raumwiderstand:

Gebiete, die gegenüber den Auswirkungen der jeweiligen Energieanlagen als sehr sensibel eingestuft werden, in denen die Auswirkungen zu nachhaltiger Veränderung führen und die einen hohen Naturschutzwert aufweisen bzw. nicht oder nur schwer ersetzbar sind (SCHOLLES 2008: 476).

Flächen mit mittlerem Raumwiderstand:

Gebiete, die sensibel auf die Beeinträchtigungen durch die jeweiligen Energieanlagen reagieren, in denen diese Beeinträchtigungen allerdings nur zu einem mittelfristigen Verlust ihrer Funktionsfähigkeit führen (SCHOLLES 2008: 476) und die einen mittleren Naturschutzwert aufweisen.

Flächen mit geringem Raumwiderstand:

Flächen mit geringem Naturschutzwert, auf denen es bezogen auf die Belastung mit den jeweiligen Anlagentypen nur zu kurzzeitigen oder minimalen Funktionsverlusten kommt, von denen sich der Naturhaushalt voraussichtlich wieder erholt (SCHOLLES 2008: 476) oder wo es zu nur sehr geringfügigen Beeinträchtigungen des Menschen kommt.

Eine genauere Skalierung als die genannten vier Wertstufen wurde zur Beantwortung der Fragestellung auf Bundesebene als nicht notwendig erachtet. Darüber hinaus liegen die zur Einschätzung des Raumwiderstandes erforderlichen Grundlagendaten in den einzelnen Bundesländern in sehr unterschiedlicher Qualität vor, so dass auch aus diesem Grund eine feiner abgestufte Klassifizierung derzeit nicht erstellt werden kann.

Die Methodik kann an die Auswirkungen anderer Energieerzeugungsanlagen angepasst und auch auf diese angewendet werden. Da in den Szenarien bisher Solarenergienutzung nur für Dachflächen angenommen wurde und dort keine erheblichen Umweltwirkungen erwartet werden, wurde vorerst davon abgesehen, den Raumwiderstand gegen Freiflächen-PV zu ermitteln.

Der Raumwiderstand kann, wenn er allein aus der hohen Empfindlichkeit und dem Wert der Fläche erwächst, bestimmten Flächen unabhängig von der Stärke der Belastung zugewiesen werden. In anderen Fällen wird die Stärke der Belastung durch die technischen Anlagen die Größe der mit einem Raumwiderstand belegten Flächen variieren. Dies kann zum Beispiel

bei den Schutzabständen um Siedlungen zutreffen: Modifikationen der Anlagen (Lärmminde- rung) führen zu Veränderungen der notwendigen Abstände um Siedlungsbereiche und damit der Flächenausmaße des Raumwiderstands.

6.2 Vorgehen bei der Klassifizierung des Raumwiderstands verschiedener Flächenkategorien gegenüber Windenergieanlagen

Die Vielzahl der bereits bestehenden Konflikte im Bereich der Windenergienutzung zeigen, dass auch im weiteren Fortgang der Energiewende große Auswirkungen der Energiebereit- stellung auf Mensch und Natur zu erwarten sind. Windenergieanlagen wurden in der jünge- ren Vergangenheit in erheblichem Maße technisch weiterentwickelt. Sie generieren sehr große Stromerträge im Verhältnis zu der in Anspruch genommene Fläche. Bereits heute sind sie ein wesentliches Standbein der Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien. In Zukunft werden sie bei zunehmender Elektrifizierung eine zentrale Stellung im Strommix einnehmen (vgl. Kap. 4.1). Für den Außenbereich stand in dieser Studie zunächst die Nut- zung der Flächen durch Windenergieanlagen im Vordergrund. Vorrangiges Ziel ist es also, diejenigen Flächen zu ermitteln, die für die mensch- und naturverträgliche Produktion von Windenergie am besten geeignet sind. Mit Hilfe des GIS-Modells wurden die Flächen Deutschlands analysiert, und anhand der standörtlichen Empfindlichkeit von Mensch, Land- schaftsbild und Natur (Biodiversität), sowie des Wertes der Flächen für den Naturschutz ein Raumwiderstand gegenüber Windenergie zugewiesen. Dabei wurden verschiedene Flä- chenkategorien gebildet, um Empfindlich- und Wertigkeit abbilden zu können (vgl. Tab. 11). Anschließend wurde auf den Flächen mit geringem Raumwiderstand das Stromertragspo- tenzial berechnet.

Tab. 11: Flächenkategorien und Datensätze für die Einteilung der Raumwiderstände und die Flächenermittlung

Flächenkategorien		Information aus Datensatz	Datenquelle
Flächenkategorien zur Berücksichtigung der menschlichen Gesundheit	Siedlungsbereiche	Wohngebiete	DLM 250
		Freizeit/Erholung	DLM 250
		Industrie und Gewerbe	DLM 250
	Infrastruktur	Straßen	DLM 250
		Bahntrassen	DLM 250
		Freileitungen - bestehende Freileitungen - Ausbau nach BNetzA	DLM 250, BNetzA
		Seilbahnen	DLM 250
		Flughäfen	DLM 250
	Landschaft	Landschaftsbildbewertung	HERMES et al. (submitted)
Flächenkategorien zur Berücksichtigung der Biodiversität	Bestehende Schutzgebiete	Nationalparks	Grundlagendaten BfN
		Naturschutzgebiete	Grundlagendaten BfN
		Vogelschutzgebiete	Grundlagendaten BfN
		FFH-Gebiete	Grundlagendaten BfN
		Biosphärenreservate	Grundlagendaten BfN
		Ramsar-Feuchtgebiete	Grundlagendaten BfN
		Landschaftsschutzgebiete	Grundlagendaten BfN
	Gebiete mit hohem Wert für die Artenvielfalt	Vorkommen empfindlicher Vogel- und Fledermausarten	ATLAS DEUTSCHER BRUTVOGELARTEN (2014), DLM250
	Gebiete mit hohem Wert für die Vielfalt der Lebensräume	Wälder - Waldentwicklungsgebiete - Historische Waldstandorte - Laub- und Mischwälder	F+E Projekt „Umsetzung des 2-% Ziels für Wildnisgebiete der nationalen Biodiversitätsstrategie (BfN 2015b), DLM250, Historische alte Waldstandorte und Hudewälder in Deutschland (GLASER & HAUKE 2004)
		Flüsse & Auen - Natürliche Überflutungsräume - Gewässer	„Zustand der rezenten Flussauen“ (BMU & BfN 2009), „Verlust von Überschwemmungsflächen (BMU & BfN 2009), DLM 250
		Wildnisgebiete	F+E Projekt „Umsetzung des 2-% Ziels für Wildnisgebiete der nationalen Biodiversitätsstrategie (BfN 2015b)
	Biotopverbund und Schutzgebietsnetze	Truppenübungsplätze und Bergbaufolgelandschaften	DLM 250
		Grünes Band Deutschland	Länderübergreifender Biotopverbund Deutschland (BfN 2010), DLM250
		Unzerschnittene verkehrsarme Räume	Länderübergreifender Biotopverbund Deutschland (BfN 2010)
		Nationaler Biotopverbund	Länderübergreifender Biotopverbund Deutschland (BfN 2010)
Flächenkategorien zur Berücksichtigung weiterer Belange		Topografie	DGM
		Grünland	DLM 250
		Ackerflächen	DLM 250
		Nadelwälder	DLM 250

ATLAS DEUTSCHER BRUTVOGELARTEN (2014): (ADEBAR). ATLAS OF GERMAN BREEDING BIRDS. STIFTUNG VOGELMONITORING DEUTSCHLAND UNTER DBF DACHVERBUND DEUTSCHER AVIFALNISISTEN. MÜNSTER. 800 S.
BfN (2010). Länderübergreifender Biotopverbund. Naturschutz und Biologische Vielfalt. Heft 96. ISBN: 978-3-7843-3996-2. 192S.
BfN (2015b). Umsetzung des 2 %-Ziels für Wildnisgebiete aus der Nationalen Biodiversitätsstrategie. BfN – Skripten 422.
BNetzA – Bundesnetzagentur (2016). Leitungsnetze. <https://www.netzausbau.de/leitungsnetze/abende.html?sessionid=719BC8096FA0BAC5B4DA9EFA3241585>
BMU & BfN (2009). Auszustandbericht Flussauen in Deutschland.
GLASER, F. & HAUKE, U. (2004). Historische alte Waldstandorte und Hudewälder in Deutschland. Angewandte Landschaftsökologie, Heft 61. BfN.
HERMES, J., ALBERT, C., VON HAAREN, C. (submitted). F+E Projekt, Bewertung kultureller Öko-systemleistungen in Deutschland.

Der heutige Bestand und die für 2050 als Kernflächen des Naturschutzes projizierten Flächen bilden die Grundlage für die im Folgenden dargelegte Klassifizierung des Raumwiderstands. Weitere wichtige Grundlagen für die Einteilung in die Raumwiderstandsklassen bilden z. B. immissionsschutzrechtliche Vorgaben, die gewährleisten sollen, dass Menschen nicht durch Lärm beeinträchtigt werden, oder Vorschriften bezüglich der Verkehrssicherheit von Infrastrukturtrassen.

Dadurch, dass von Windenergieanlagen Fernwirkungen auf empfindliche und wertvolle Bereiche ausgehen können, müssen Pufferzonen bzw. Abstandflächen berücksichtigt werden, die selbst möglicherweise nicht wertvoll oder empfindlich sind. Da diese Abstandsflächen nicht durch Anlagen besiedelt werden können, wurde ihnen abhängig von Schutzstatus und dem potenziellen Wert der Fläche für den Naturschutz dieselbe oder eine gegenüber dem eigentlichen Standort der Anlage niedrigere Raumwiderstandsklasse zugewiesen.

Bei den Flächenanalysen kommt es generell zu Überlagerungen verschiedener Flächenkategorien und Raumwiderstandsklassen. Diese Überlagerungen entstehen überwiegend aufgrund natürlicher Gegebenheiten. Dabei kann es sich um Flächen verschiedener Kategorien aber gleichem Raumwiderstands handeln (z. B. Gewässer innerhalb eines Nationalparks mit sehr hohem Raumwiderstand) oder aber auch um Flächen verschiedener Raumwiderstandsklassen wie z. B. historische Waldstandorte mit hohem Raumwiderstand als Teil eines FFH-Gebiets mit sehr hohem Raumwiderstand. Die Überlagerungen von Flächen gleicher Raumwiderstandsklassen wurden im GIS-Modell zusammengeführt und der Raumwiderstand der beiden Flächenkategorien übernommen. Flächen verschiedener Raumwiderstandsklassen hingegen wurden miteinander verschnitten, wobei der jeweils höchste Raumwiderstand der Fläche als Gesamtergebnis übernommen wurde.

Im Folgenden wird die Zuordnung zu den jeweiligen Raumwiderstandsklassen dargestellt.

6.2.1 Flächenkategorien zur Berücksichtigung des „Schutzgutes Mensch“ (Gesundheit, Wohlbefinden) und von Infrastrukturen

Das Schutzgut „Mensch“ einschließlich menschlicher Gesundheit ist Bestandteil der zu berücksichtigenden Schutzgüter einer Umweltverträglichkeitsprüfung (CLAßEN & KNETSCHKE 2014) und wird seit der Novellierung des Gesetzes dort auch explizit genannt (§2 Abs. 1 UVPG). Dabei steht vor allem die Wahrung der Gesundheit und des Wohlbefindens im Vordergrund. Da das Wohlbefinden subjektiv und individuell ist, werden in dieser Studie die Parameter „Landschaftsbild“ bzw. „Erholung“ zur Bewertung der Lebensqualität der Landschaft berücksichtigt. Flächen, auf denen eine potenzielle Gefahr für den Menschen und die menschliche Gesundheit oder Einschränkungen für die Lebensqualität zu befürchten sind, werden deshalb in der hier konzipierten Szenarien von einer Windenergienutzung ausgenommen.

Siedlungsbereiche

In Siedlungsbereichen ist das Errichten von Windenergieanlagen in der Regel aufgrund der Schallimmission, zum Großteil verursacht durch die Rotorbewegung, ausgeschlossen (NEDDERMANN 2011: 5). Ausnahmen bilden z. B. leisere Technologien von Kleinwindanlagen. Zu Siedlungsbereichen zählen Wohngebiete, Flächen für Freizeit und Erholung sowie Industrie- und Gewerbegebiete. Hinzu kommen anlagenspezifische Schutzabstände aufgrund von Ge-

sundheit und Sicherheit, die bei der Ermittlung potenzieller Flächen für die Errichtung von Windenergieanlagen berücksichtigt werden müssen.

Der Abstand zwischen Windenergieanlage und Bebauung hängt zunächst vom Schallleistungspegel der Anlage ab. Die Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz gibt Immissionswerte für Immissionsorte außerhalb von Gebäuden an (6. Immissionsrichtwerte). Diese Richtwerte variieren je nach Art und Nutzung der Bebauung. Tab. 12 gibt einen Überblick über die einzuhaltenden Immissionswerte. In den einzelnen Bundesländern gibt es zwar deutlich abweichende Vorgaben, für eine bundeseinheitliche Betrachtung wurden allerdings die Werte aus dem Bundes-Immissionsschutzgesetz verwendet.

Tab. 12: Immissionsrichtwerte außerhalb von Gebäuden nach TA-Lärm

Bauliche Nutzung	Tags	Nachts
Industriegebiete	70 dB(A)	70 dB(A)
Gewerbegebiete	65 dB(A)	50 dB(A)
Dorf- und Mischgebiete	60 dB(A)	45 dB(A)
Wohngebiete	50 dB(A)	35 dB(A)
Kurgebiete, Krankenhäuser, Pflegeanstalten	45 dB(A)	35 dB(A)

Da aufgrund der Grundlagendaten eine Unterteilung in Dorf- und Mischgebiete sowie Wohngebiete und Kurgebiete nicht möglich war, wurde der zu berücksichtigende Immissionsrichtwert gleich 40 dB(A) gesetzt. Damit liegt der Wert zwar über dem nachts zulässigen Wert für Wohn- und Kurgebiete, aber unter dem Wert für Dorf- und Mischgebiete. Aufgrund eines möglichen lärmreduzierten Betriebs der Anlagen kann aber davon ausgegangen werden, dass nachts auch 35 dB(A) eingehalten werden können, wenn erforderlich. Auch eine Unterteilung zwischen Industrie- und Gewerbegebiete war nicht möglich, weshalb für diese Bereiche der Immissionsrichtwert ebenfalls aufgrund des möglichen lärmreduzierten Betriebs einheitlich auf 60 dB(A) gesetzt wurde.

Der Schall wird generell mit zunehmender Entfernung zur Schallquelle schwächer. Der benötigte Abstand zum Einhalten der Immissionsrichtwerte zwischen Siedlungsbereichen und Windenergieanlagen kann anhand der vorgeschriebenen Werte und des Schallleistungspegels der Anlage angenähert werden. Dabei gilt:

Schallpegel in Abhängigkeit zur Entfernung:

$$r_2 = r_1 \cdot 10^{\frac{|L_{p1} - L_{p2}|}{20}}$$

r_1 : Entfernung zur Schallquelle am Standort 1 [m]

r_2 : Entfernung zur Schallquelle am Standort 2 [m]

L_{p1} : Schallpegel am Standort 1 [dB]

L_{p2} : Schallpegel am Standort 2 [dB]

In der vorliegenden Studie wurden zwei Berechnungsverfahren angewendet. Zunächst wurde für die Szenarien eine allgemeingültige Berechnungsformel zur Ermittlung der Abstände

auf Grundlage einer gerichteten Schallausbreitung ohne die Berücksichtigung natürlicher Hindernisse angewendet. Diese Berechnung entspricht nicht der Formel der TA Lärm. Sie wurde aber eingesetzt, um den größten denkbaren Abstand zu Siedlungsgebieten zu definieren. Um die unterste Grenze des Lärmschutzes, die vermutlich 2050 nicht mehr ausreichenden Mindestabstände ebenfalls zu berücksichtigen, wurden in den Reserven (vgl. Kap. 8.5) in Ergänzung zu diesen Maximalabständen, die derzeitigen gesetzlichen Berechnungsregelungen des BImSchG und der dazu gehörenden TA-Lärm zu Grunde gelegt. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Schall sich nicht in eine Richtung gerichtet ausbreitet, sondern zunächst in alle Richtungen gleichmäßig abstrahlt und abhängig von der Geländebeschaffenheit, der Windgeschwindigkeit und -richtung und den Umgebungsgeräuschen unterschiedlich weit getragen wird. Eine solch detaillierte Betrachtung führt in der derzeitigen Praxis zu deutlich geringeren Abständen zu Siedlungsbereichen. Diese genauen Berechnungen waren im Rahmen dieser Studie nicht möglich, weshalb auch die Berechnungen nach TA-Lärm in Bezug auf die Geländebeschaffenheit und die Windrichtung und -geschwindigkeit vereinfacht wurde.

Die Formel mit gerichteter Schallausbreitung ist nicht so zu verstehen, dass in dieser Studie solch große Abstände um Siedlungen empfohlen werden. Die extremen Abstände dienen aber dazu, Schwächen der bundesweiten Gesamtbilanz der gestörten Flächen bzw. eine durch die Datenbasis bedingte strukturelle Unterschätzung der durch Schutzabstände belegten Fläche, pauschal auszugleichen. So sollten Beeinträchtigungen der Lebensqualität wie visuelle Störungen, die über Gesundheitswirkungen hinausgehen sowie höhere Ansprüche im Jahr 2050 einbezogen werden. In der Planungspraxis im konkreten Fall fallen zudem neben dem Schalleistungspegel auch die Zahl und die Anordnung der Windenergieanlagen ins Gewicht und verlangen z.T. höhere Abstände. Das verwendete DLM250 bildet zudem aufgrund des kleinen Maßstabs nicht alle Siedlungen Deutschlands ab. Durch die pauschal höheren Abstände sollten deshalb die bilanziellen Auswirkungen von Splittersiedlungen pauschal einbezogen werden.

Es ist davon auszugehen, dass sich die Abstandsregelungen zum Schutz des Menschen verändern werden, weil zukünftig ergänzende Parameter bei der Genehmigung von Anlagen und Windparks berücksichtigt werden müssen. Derzeit ist eine Änderung der Hinweise der Länderarbeitsgemeinschaft Immissionsschutz (LAI) zum Schallimmissionsschutz bei Windenergieanlagen in der Diskussion, die aufbauend auf eine vom LANUV NRW in Auftrag gegebene Untersuchung des Sachverständigenbüros Uppenkamp & Partner (ENGELN & WENZEL 2014) möglicherweise neue Prognosewerte zugrunde legen wird. Auch wenn diese Diskussion noch nicht abgeschlossen ist, gilt es als unstrittig, dass der Standard der TA-Lärm technologisch überarbeitet werden muss. Entwickelt für Anlagen mit 60 m Nabenhöhe, ist er angesichts heute üblicher 140 m und zukünftig 200 m Nabenhöhe veraltet (WEBER 2016). Flächen, auf denen Lärmüberschreitungen potenziell möglich sind, wurden daher aus Vorsorgegesichtspunkten, und nicht aufgrund rechtlicher Vorgaben, in die Bewertung einbezogen.

Hinzu kommt, dass neben dem Lärm immer häufiger die „bedrängende Wirkung“ von Windenergieanlagen (visuelle Wirkungen aufgrund der Höhe und Drehbewegung des Rotors) auf den Menschen erwähnt wird. Grundlage der Diskussion ist das Urteil des OVG Münster (OVG Münster, Beschluss v. 24.6.2010, 8 A 2764/09, NuR 2010 S. 888), bestätigt durch das Bundesverwaltungsgericht, in dem eine Einzelfallprüfung für die Ermittlung des notwendigen Abstands vorgeschlagen wird. Bei einem starken Zubau von Anlagen und Windparks wie er in den Szenarien bis zum Jahr 2050 angenommen wird, ist davon auszugehen, dass der Widerstand in der Bevölkerung zunehmen wird und größere Abstände zur Wohnbebauung

gefordert werden. Als erstes Bundesland hat Bayern die Länderöffnungsklausel nach § 249 Abs. 3 BauGB genutzt und fordert in der Landesbauordnung Abstände zu vorhandener Bebauung in der 10fachen Höhe der Windenergieanlage. Diese Annahmen werden in der Fachwelt derzeit als zu hoch eingestuft (SCHMID 2014: www), zeigen aber deutlich die Tendenzen zur Nachsteuerung.

Landschaftsbild

Landschaftsbildbewertung

Nach dem BNatSchG sind die Vielfalt, Eigenart und Schönheit sowie der Erholungswert von Natur und Landschaft zu schützen. Sie haben maßgeblichen Einfluss auf das Wohlbefinden des Menschen und seine Gesundheit und sind Grundlage für spirituelles Erleben sowie für Wissenschaft und Kunst. Diese Leistungen der Landschaften, die auch ökonomisch einen wichtigen Beitrag leisten, z. B. durch die Entlastung des Gesundheitssystems und die Steigerung der Arbeitsproduktivität oder für den Tourismussektor (vgl. z. B. ABRAHAM et al. 2007, TEEB DE 2016/17), sind davon abhängig, dass sich die Menschen in einer ästhetisch ansprechenden Landschaft ungestört von Lärm und visuellen Beeinträchtigungen erholen können. Insbesondere in noch sehr naturnahen oder historischen Kulturlandschaften werden Windenergieanlagen als sehr störend empfunden (vgl. z. B. HOISL et al. 2000). Um diese wertvollen und empfindlichen Landschaften bei der Identifizierung des Raumwiderstands zu berücksichtigen, wurde in dem Modell auf die Methodik nach HERMES et al. (submitted) zurückgegriffen. Der darin ermittelte relative ästhetische Wert einer Landschaft wird auf einer Skala von 0–100 eingeordnet, wobei 100 für den höchsten in Deutschland erreichten und 0 für den geringsten Wert steht.

Die Bewertung (nach HERMES et al.: submitted) basiert auf den Indikatoren Vielfalt, Natürlichkeit und Seltenheit von Landschaften bzw. Landschaftsbestandteilen und einer empirischen Erhebung. Die jeweiligen Ausprägungen werden dort anhand verschiedener normalisierter Sub-Indikatoren und Landschaftsstrukturmaße ermittelt. Deren relative Werte sind auch separat dargestellt und damit einzeln verwertbar. Um die Landschaftsbildbewertung in die Raumwiderstandsanalyse zu integrieren, wurde das 33 %- und das 66 %-Quantil aller Rasterzellenwerte in Deutschland berechnet. Die berechneten Schwellenwerte liegen gerundet bei 46 und 57, so dass sich folgende Verteilung auf die Raumwiderstandsklassen ergibt: hoch (>als 57), mittel (zwischen 46 und 57) und gering (< 46) aufgeteilt. Da der visuelle Wirkraum der Anlagen ungefähr dem 15-fachen der Anlagenhöhe entspricht, wurde ein entsprechender Abstand um die landschaftlich hochwertigen Gebiete ebenfalls mit einem hohen Raumwiderstand bewertet (BRUNS & ROTH 2016: 40).

Infrastruktur

Straßen

Die Fläche des gesamten Straßennetzes wurde aus der Betrachtung ausgenommen. Darüber hinaus gilt längs von Bundesstraßen laut §9 (1) FStrG ein Verbot für die Errichtung von Hochbauten bis zu einer Entfernung von 40 m bei Bundesautobahnen und bis zu 20 m bei Bundesstraßen. Auf Grundlage dieser Vorgaben wurden die Abstände zwischen Straße und Windenergieanlage berechnet. Dabei ist darauf zu achten, dass sich die Abstände auf den äußersten Fahrbahnrand sowie die Spitze der Rotorblätter beziehen. Bei dem endgültigen

Abstand zwischen dem Fundament der Windenergieanlage und der Fahrbahn handelt es sich demnach um die Summe aus der Abstandsvorgabe und der Länge der Rotorblätter.

Bahntrassen

Die Fläche der Bahntrassen wurde ebenfalls von der verfügbaren Fläche ausgenommen. Verbindliche Angaben über zusätzliche Mindestabstände von Windenergieanlagen zu Bahntrassen liegen allerdings nicht vor. Auf Anfrage im Zuge der Studie „Potenzial der Windenergie an Land“ (UBA 2013) beim Eisenbahn-Bundesamt empfahl dieses einen Mindestabstand in Höhe des zweifachen Rotordurchmessers einzuhalten oder die maximale Höhe (Nabenhöhe + Rotorradius) der Windenergieanlage bei der Abstandsberechnung zugrunde zu legen (UBA 2013: 19). Auch die „Handreichung zu Windenergieanlagen an Infrastrukturtrassen“, herausgegeben von der Bund-Länder-Initiative Windenergie (BLWE 2012: 4), empfiehlt als Abstand den zweifachen Rotordurchmesser. Um die größtmögliche Sicherheit zu garantieren wurde letztlich mit dem höheren Abstandswert (der maximalen Anlagenhöhe) gerechnet.

Bestehende Freileitungen & Ausbau nach Bundesnetzagentur

Das gesamte Netz der bestehenden Freileitungen sowie die nach Bundesnetzagentur bis zum Jahr 2050 zu erwartenden Erweiterungen werden im Modell berücksichtigt. Hinzu kommen erforderliche Abstände, die in der Norm DIN EN 50 341-3-4 (VDE 0210-3) vorgeschrieben werden. Der Abstand ist dabei von den Schwingschutzmaßnahmen der Leitungen abhängig und davon, ob die Freileitung innerhalb der Nachlaufströmung der Windenergieanlage liegt. Ohne Schwingschutzmaßnahmen ist ein Abstand von mindestens dem dreifachen Rotordurchmesser vorgeschrieben, während bei Leitungen mit Schwingschutz ein Abstand in der Höhe von einem Rotordurchmesser genügt. Liegt die Freileitung außerhalb der Nachlaufströmung der Windenergieanlage, kann auf einen Schwingschutz verzichtet werden. Aufgrund der Nabenhöhe moderner Anlagen ist dies immer öfter der Fall (BLWE 2012: 4). Da in den Szenarien von modernen Windenergieanlagen mit entsprechenden Nabenhöhen ausgegangen wird, konnte ein Sicherheitsabstand von nur einem Rotordurchmesser angenommen werden.

Seilbahnen

Auch bestehende Seilbahnen sind als nutzbare Flächen ausgeschlossen. Hinzu kommt aus Sicherheitsgründen ein Abstand des dreifachen Rotordurchmessers zwischen den Seilbahnen und dem Fundament der Windenergieanlage (UBA 2013: 19).

Flughäfen

Die „Richtlinien über die Hindernisfreiheit für Start- und Landebahnen im Instrumentenflugbetrieb“ sowie die „Richtlinien für die Anlage und den Betrieb von Flugplätzen für Flugzeuge im Sichtflugbetrieb“ des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen geben Auskunft über die Hindernisbegrenzungsflächen von Flughäfen. Aufgrund der Komplexität der Berechnungen der Hindernisbegrenzungsflächen wurde das Ergebnis der Abstandsrechnungen von 5.000 m aus der UBA-Potenzialstudie (2013: 20) in das GIS-Modell übernommen.

6.2.2 Flächenkategorien zur Berücksichtigung der Biodiversität und der Entwicklungsziele des Naturschutzes für 2050

Ziel des Naturschutzes ist die dauerhafte Sicherung der biologischen Vielfalt, der Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushaltes einschließlich der Regenerationsfähigkeit und der nachhaltigen Nutzungsfähigkeit der Naturgüter sowie die Sicherung der Vielfalt, Eigenart und Schönheit und des Erholungswerts von Natur und Landschaft (BNatSchG §1). Dabei sollen lebensfähige Populationen von Tier- und Pflanzenarten einschließlich ihrer Lebensstätten geschützt werden, um der Gefährdung von Ökosystemen, Biotopen und Arten entgegenzuwirken. Zur Sicherung des Erholungswertes von Natur und Landschaft sind Naturlandschaften und historisch gewachsene Kulturlandschaften vor Beeinträchtigungen zu bewahren.

Um diese Ziele zu erreichen, müssen sie bereits bei der Planung der Energiewende berücksichtigt werden, da die Auswirkungen der einzelnen Energieträger oft in Konflikt mit diesen Zielen stehen. Bei Windenergieanlagen stellen beispielsweise die Rotorblätter ein vertikales, bewegliches Element dar, das in den Flugraum von Vögeln und Fledermäusen ragt, so dass es infolge von Kollisionen zu Individuenverlusten kommt. Das Kollisionsrisiko ist abhängig vom Standort, der Höhe der Anlage, dem Rotordurchmesser sowie der Anzahl, der Dichte und der Anordnung der Anlagen im Windpark (DRL 2006:15). So können Anlagen zwischen Rast-, Schlaf- und/oder Brutgebieten zur Zerschneidung wichtiger Teillebensräume führen. Die Bewegung der Rotorblätter erzeugt zudem Lärm und kann ebenfalls zu Beeinträchtigungen und zur Meidung von Ruhestätten führen.

Um diesen potenziellen Konflikten gerecht zu werden, wurde bei der Klassifizierung des Raumwiderstands zunächst der derzeitige Bestand an schutzwürdigen und geschützten Flächen berücksichtigt. Neben den heutigen Zielen des Naturschutzes werden im Modell die bis zum Jahr 2050 zu erwartenden Veränderungen abgebildet. Insbesondere die Biodiversität ist in Deutschland in einem – auch im europaweiten Vergleich – sehr unbefriedigenden Zustand (EEA 2016). Angesichts dieser Situation hat sich die Bundesregierung das Ziel gesetzt, den negativen Trend in der Entwicklung der Arten und Lebensräume umzukehren. Die dazu notwendigen Schritte wurden im Jahr 2007 in einer Nationalen Strategie zur Biologischen Vielfalt von der Bundesregierung beschlossen. Die Inhalte sollen bis zum Jahr 2050 umgesetzt sein und müssen auch bei der Planung der Energiewende bzw. hier bei der Szenarienentwicklung beachtet werden, da sie Auswirkungen auf die zur Energieproduktion verfügbare Fläche Deutschlands haben. Die Strategie impliziert den deutschen Beitrag zur Erhaltung der biologischen Vielfalt europa- sowie weltweit und „legt für alle biodiversitätsrelevanten Themen Qualitätsziele und Handlungsziele fest“ (BMUB 2007: 7), ohne diese jedoch räumlich zu verorten.

Diese Verortung wurde soweit möglich vorgenommen, um die Naturschutzziele in die Flächen- und Raumwiderstandsanalyse integrieren und zu erwartende Konflikte mit der Windenergienutzung identifizieren zu können. Hierzu wurden vor allem Datensätze aus Forschungsprojekten in das Modell integriert, die sich mit dem Erreichen der Ziele und der Identifizierung potenzieller Umsetzungsflächen befassen (vgl. Tab. 11).

Bestehende Schutzgebiete

Bei der Raumwiderstandsanalyse wurden alle ausgewiesenen geschützten Teile von Natur und Landschaft berücksichtigt. Abhängig von ihrem Schutzstatus wurden sie unterschiedlichen Raumwiderstandsklassen zugeordnet. Aufgrund der Fernwirkung von Windenergieanlagen wurden die Schutzgebiete teilweise mit zusätzlichen Abstandstandsflächen umgeben, um mögliche negative Einflüsse auszuschließen (vgl. Kap. 6.3.2.)

Gebiete mit hohem Wert für die Artenvielfalt

Nicht nur im BNatSchG, auch in der CBD und der nationalen Strategie für biologische Vielfalt (BMUB 2007) wird gefordert, dass der Rückgang der vorhandenen wildlebenden Arten aufgehalten werden muss. Aktuell sind 134 Tier- und Pflanzenarten im Anhang IV der FFH-RL gelistet und nach BNatSchG streng geschützt. Um diesen Schutz zu gewährleisten müssen die Lebensräume und Bestände der Arten wiederhergestellt werden, insbesondere im Falle von Arten, für die Deutschland eine besondere Erhaltungsverantwortung trägt. Diese besondere Verantwortung besteht gegenüber Arten, die ausschließlich oder mit einem hohen Anteil ihrer Weltpopulation in Deutschland vorkommen. Im GIS-Modell wurden lediglich Verbreitungsgebiete derjenigen Arten und Lebensräume aufgenommen, die empfindlich auf den Ausbau der erneuerbaren Energieträger reagieren (vgl. Anhang 3).

Um die Verbreitung windkraftsensibler Vogelarten (vgl. Anhang 3) bei den Analysen zu berücksichtigen, wurde auf die Daten des ATLAS DEUTSCHER BRUTVOGELARTEN zurückgegriffen. Das Vorkommen der Arten wird darin in Rastern von mehreren Kilometern dargestellt und bildet somit nicht die genauen Fundorte ab. Eine standortkonkrete Darstellung der Arten und Lebensräume wäre auch im hier entworfenen GIS-Modell aufgrund des zu groben Maßstabes der Daten nur abschätzungsweise möglich gewesen. In den groben Rasterzellen wurden daher überschlägig und in räumlicher Zufallsverteilung der Standorte mögliche Artenvorkommen in die Flächenberechnungen aufgenommen. So wurde dem Umstand Rechnung getragen, dass der genaue Lebensraum der Arten nicht bekannt ist, die Vorkommen windkraftsensibler Arten außerhalb der Schutzgebiete aber berücksichtigt werden sollten.

Für die Berücksichtigung der Fledermausvorkommen wurden ebenfalls aufgrund der ungenauen Datenlage die potenziellen Lebensräume der empfindlichen Arten in das Modell übernommen, in der Annahme, dass sich die Individuen überwiegend dort aufhalten und auch die Wochenstuben dort zu finden sind. Zu den potenziellen Lebensräumen zählen die Schutzgebiete mit einer Fledermausart im Schutzzweck sowie sämtliche natürliche Waldentwicklungsgebiete, historische Waldstandorte und Laub- und Mischwälder (BRINKMANN 2017 mdl.). Zusätzlich wurde um diese potenziellen Lebensräume herum ein Schutzabstand von 200 m definiert.

Gebiete mit hohem Wert für die Vielfalt der Lebensräume

Wälder

Ziel der Nationalen Biodiversitätsstrategie ist eine hohe natürliche Vielfalt und Dynamik der Wälder bzw. ihrer Struktur und Artenzusammensetzung. Bis zum Jahr 2020 sollen sich daher die Bedingungen für die typischen Lebensgemeinschaften verbessern. Der Flächenanteil der Wälder mit natürlicher Waldentwicklung soll bis 2020 5 % der gesamten Waldfläche betragen bzw. 10 % der Waldfläche der öffentlichen Hand (BMUB 2007: 31 ff.).

Um potenzielle Flächen für die Waldentwicklung zu identifizieren, wurden verschiedene Datensätze berücksichtigt. Einerseits lag ein Datensatz mit den historischen alten Waldstandorten Deutschlands vor, welche ein hohes Potenzial für eine weitere natürliche Entwicklung aufweisen. Darüber hinaus wurden im GIS-Modell die potenziellen Wildnisgebiete mit den Waldflächen aus dem DLM verschnitten. Diese Verschneidung zeigt, dass 8.931 km² als natürliche Waldentwicklungsgebiete dienen können.

Flüsse und Auen

Erklärtes Ziel der Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt ist es außerdem, dass bis zum Jahr 2020 Fließgewässer und deren Auen in ihrer Funktion als Lebensraum gesichert sind, die Vorgaben der Wasserrahmenrichtlinie umgesetzt werden und der überwiegende Teil der Fließgewässer wieder über mehr natürliche Überflutungsräume verfügt. Im Zuge dessen soll es zu einer Vergrößerung der Rückhalteflächen um mindestens 10 % kommen.

Für die Verortung der Ziele im Bereich „Flüsse und Auen“ wurden die im Zuge des Auenzustandsberichts (BMU und BfN 2009) entwickelten Datensätze „Verlust von Überschwemmungsflächen“ und „Zustand der rezenten Flussauen“ verwendet. Die ehemaligen Überschwemmungsflächen wurden dabei als zukünftige Rückhalteflächen in den Datensatz aufgenommen, wobei die Überschneidungen mit Siedlungs- und Infrastrukturflächen aus dem Datensatz entfernt wurden.

Die Informationen über den Zustand der rezenten Flussauen wurden als Basis für die Ermittlung bestehender Überschwemmungsflächen und der Sicherung ebendieser bei der Ermittlung des menschen- und naturverträglichen Energieertragspotenzials berücksichtigt.

Laut Auenzustandsbericht kam es in Deutschland zu einem Verlust von insgesamt 32.653 km² Überschwemmungsfläche, wovon sich 28.037 km² außerhalb von Siedlungsbereichen und Infrastrukturbereichen befinden (vgl. Abb. 30, links) und zukünftig wieder als Rückhalteflächen genutzt werden könnten. Im Modell wurden diese Flächen daher von einer weiteren Infrastrukturentwicklung für erneuerbare Energien ausgeschlossen.

Unabhängig vom jetzigen Zustand der rezenten Flussauen wurden bei der Raumwiderstandsanalyse aufgrund des Ziels, die Funktion der Auen als Lebensraum sicherzustellen, alle jetzigen rezenten Flussauen berücksichtigt, so dass insgesamt 21.252 km² einbezogen wurden (vgl. Abb. 30, rechts).

Ein weiteres Konzept zur Erhaltung und Entwicklung von Flüssen und Auen beinhaltet das Bundesprogramm „Blaues Band Deutschland“, das u. a. dazu beitragen soll, die deutschen Bundeswasserstraßen wieder naturnah zu gestalten und, ähnlich dem Grünen Band, einen Biotopverbund von nationaler Bedeutung aufzubauen. Im Bundesprogramm „Blaues Band Deutschland“ wird definiert, welche Entwicklungen für Nebenwasserstraßen, Bundeswasserstraßen und Auen zukünftig angestrebt werden. Dazu zählen die Entwicklung der biologischen Vielfalt, der Aufbau eines Biotopverbunds, die Renaturierung sowie die Wiederherstellung autotypischer Lebensräume. Die Ziele des Bundesprogrammes decken sich zum größten Teil mit den Zielen zu Flüssen und Auen aus der Biodiversitätsstrategie und daher mit den bereits berücksichtigten Flächen aus dem Auenzustandsbericht und dem Datensatz über den „Verlust von Überschwemmungsflächen“. Die Ziele eines nationalen Biotopverbundes für Gewässer (z. B. das blaue Band Deutschland) wurden über die Datensätze zu den Feuchtlebensraumkomplexen sowie zu den Fließgewässern (vgl. „Biotopverbund“) im Modell berücksichtigt.

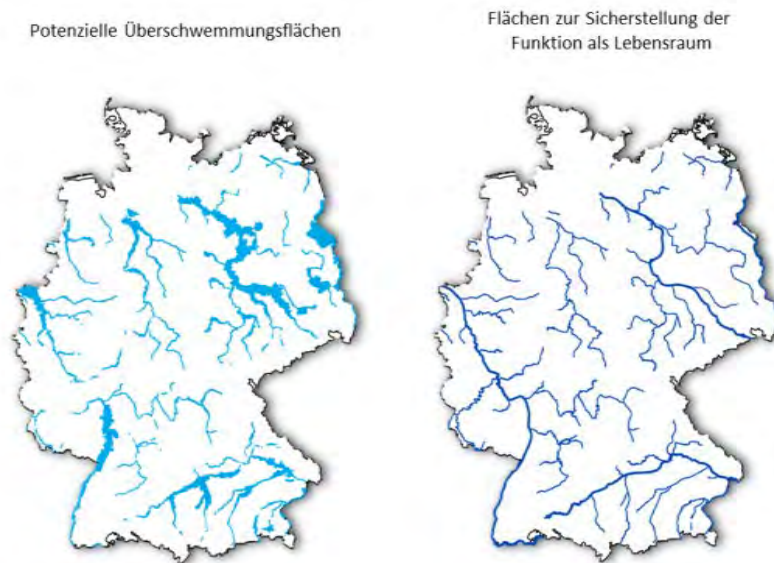


Abb. 30: Potenzielle Überschwemmungsflächen (links) und potenzielle Flächen für die Sicherstellung der Funktion als Lebensraum (rechts)

Wildnisgebiete

Weiteres Ziel der Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt ist die Sicherstellung von Gebieten, in denen Entwicklungsprozesse „natürlich und ungestört“ und „nach ihren eigenen Gesetzmäßigkeiten“ ablaufen können. Um dieses zu erreichen soll sich auf 2 % der Landesfläche Deutschlands bis zum Jahr 2020 Wildnis entwickeln können. 2015 wurden Suchkulis- sen für potenzielle Wildnisentwicklungsgebiete in Deutschland im Rahmen des F+E-Projekts „Umsetzung des 2%-Ziels für Wildnisgebiete aus der Nationalen Biodiversitätsstrategie“ räumlich abgebildet. Die Untersuchungen ergaben, dass in Deutschland 13.013 km² als po- tenzielle Wildnisgebiete in Frage kämen und damit das 2%-Ziel erreicht werden könnte (BFN 2015 b).

Biotopverbund und Schutzgebietsnetz

Biotopverbund

Ein weiteres Ziel der Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt ist die Verwirklichung ei- nes länderübergreifenden Biotopverbundsystems auf mindestens 10 % der Landesfläche bis 2010. Dabei sollen vor allem Kernflächen gesichert und der ehemalige deutsch-deutsche Grenzstreifen sowohl in den deutschen Biotopverbund integriert als auch in das Europäische Grüne Band eingebettet werden. Zusätzlich sollen Verbindungsgebiete und -elemente zwi- schen den Kernflächen ausgewiesen werden. Bereits seit 2002 ist der Aufbau eines länder- übergreifenden Biotopverbunds auf mindestens 10 % der Landesfläche auch im BNatSchG verankert. Bei zukünftigen Planungen, worunter auch der Ausbau der erneuerbaren Energien fällt, sollen Konflikte mit dem länderübergreifenden Biotopverbund vermieden werden.

2010 wurden mit der Veröffentlichung der Ergebnisse des F+E-Projektes „Länderübergrei- fender Biotopverbund Deutschland“ (BFN 2010) national bedeutsame Flächen für den Bio- topverbund sowie national bedeutsame Verbundachsen auf Grundlage der 2004 von BURK- HARDT et al. entwickelten Kriterien vorgeschlagen. Der dargestellte Biotopverbund beinhaltet

sowohl die Verbundachsen und die Flächen als auch die Funktionsräume von Trocken-, Feucht- und Waldlebensraumkomplexen sowie den Biotopverbund der Fließgewässer.

Diese Flächen wurden als potenzielle Flächen zur Umsetzung der Biotopverbundziele im GIS-Modell ebenso berücksichtigt wie auch der ehemalige innerdeutsche Grenzstreifen als Grünes Band Deutschlands, das anhand der DLM-Daten ermittelt wurde.

Die Fläche des „Länderübergreifenden Biotopverbunds Deutschland“ beträgt 91.984 km² (vgl. Abb. 31, links) und beinhaltet den Verbund der Funktionsräume „Waldlebensräume“, „Trockenlebensräume“ und „Feuchtlebensräume“ sowie deren ausgewiesene Verbundachsen. Das Grüne Band Deutschland verläuft entlang der ehemaligen innerdeutschen Grenze und erstreckt sich über eine Länge von 1.368 km (vgl. Abb. 31, rechts). Die Landesregierung Thüringen und der BUND arbeiten bereits daran, Teile des Grünen Bands Deutschland als nationales Naturmonument (nach §24 Abs. 4 BNatSchG) auszuweisen (THÜRINGER LANDTAG 2017).

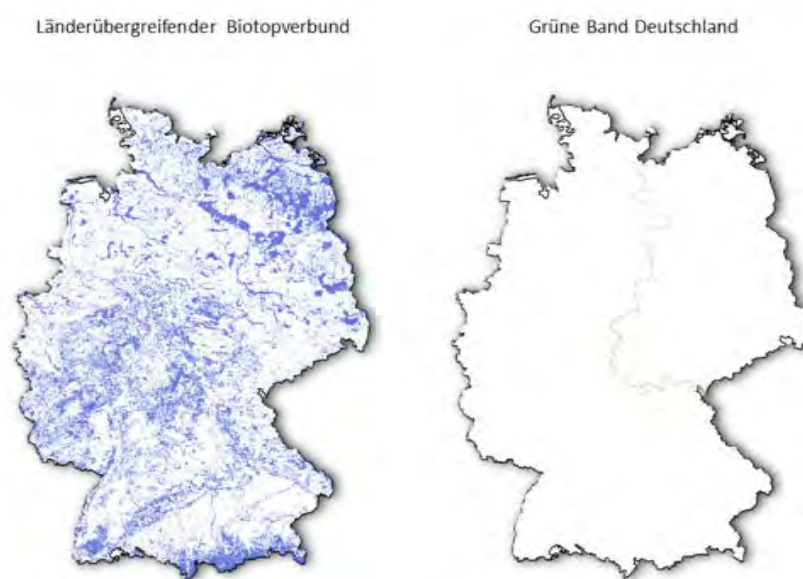


Abb. 31: Flächen des nationalen Biotopverbunds (links) und das Grüne Band Deutschland (rechts)

Schutzgebietsnetz

Auch die Ausweisung von neuen Schutzgebieten ist ein Bestandteil der nationalen Strategie zur Biologischen Vielfalt. So soll unter anderem die Zahl der Nationalparks sowie die Zahl der Biosphärenreservate bis zum Jahr 2050 erhöht werden. Im Zuge dessen sollen auch für den Naturschutz geeignete ehemalige Truppenübungsplätze sowie geeignete Bergbaufolgelandschaften gesichert werden.

Da diese Flächen in den kommenden Jahren vermehrt für Naturschutzzwecke genutzt werden sollen, wurden sie aus dem DLM herausgearbeitet und als potenzielle Flächen zur Ausweisung eines Schutzgebietsnetzes in das GIS-Modell aufgenommen. Da nicht vorhersehbar ist, welche dieser Gebiete bis 2050 für Naturschutzzwecke tatsächlich genutzt werden, wurden bei der Analyse alle Truppenübungsplätze und Bergbaufolgelandschaften berücksichtigt. Insgesamt existieren in Deutschland 2.756 km² Truppenübungsplätze sowie 864 km² Tagebauflächen, Gruben und Steinbrüche.

Als potenzielle Schutzgebiete kommen auch Flächen in Frage, auf denen sich Wildnisgebiete entwickeln bzw. auf denen eine natürliche Waldentwicklung stattfinden könnte. Durch die Ausweisung dieser Flächen als Schutzgebiete lassen sich sowohl das Schutzgebietsnetz vergrößern als auch die Wildnisgebiete schützen.

Für die Ausweisung neuer Nationalparks wird eine Flächengröße von mindestens 10.000 ha empfohlen (BfN 2015: www). Werden die potenziellen Wildnisgebiete als Grundlage für die Ausweisung von Nationalparks genommen und wird zudem der Indikator der vom BfN empfohlenen Flächengröße für die Parks berücksichtigt, könnten mehrere neue Nationalparks ausgewiesen werden um das Schutzgebietsnetz zu vergrößern.

6.2.3 Flächenkategorien zur Berücksichtigung weiterer Belange

Topografie

Das digitale Geländemodell gibt Auskunft über die topografischen Gegebenheiten der Landschaft. Mit Hilfe des Geländemodells und GIS konnten die Hangneigungen für ganz Deutschland berechnet werden. Dies ermöglichte das Ausschließen von Flächen die aufgrund topografischer Besonderheiten nicht für die Errichtung von Windenergieanlagen in Frage kommen.

Nadelforste

Fichten und Kiefern sind die häufigsten Baumarten, obwohl natürliche Nadelwaldgesellschaften nur wenige Prozent der Waldfläche prägen würden (BMUB 2007: 32). Aufgrund dieser Tatsache werden die Nadelforste einer eigenen Flächenkategorie zugeordnet und zählen weitestgehend nicht zu Flächen mit einem hohen Wert für die Vielfalt der Lebensräume.

Landwirtschaftliche Nutzfläche

Bei der im Modell angewandten Flächenkategorie „Grünland und Ackerflächen“ handelt es sich um landwirtschaftlich genutzte Flächen, die außerhalb der bereits genannten Flächenkategorien liegen, weshalb in diesen Fällen von potenziellen Vorbelastungen ausgegangen wird.

6.3 Zuordnung der Flächenkategorien zu den Raumwiderstandsklassen

Die Ausdehnung der Fläche mit unterschiedlichem Raumwiderstand ist neben den standörtlichen Gegebenheiten abhängig von den Eigenschaften der betrachteten Windenergieanlage. Besonders der Rotordurchmesser, die Anlagenhöhe sowie der Schallleistungspegel definieren die erforderlichen Schutzabstände zu einzelnen empfindlichen und wertvollen Flächen (vgl. Kap. 6.2). Hinzu kommen Technologieoptionen, wie zum Beispiel die Verwendung von Abschaltalgorithmen für Fledermäuse, die aufgrund der veränderten Wirkung die Fläche mit dem Raumwiderstand beeinflussen. Dabei werden auf Grundlage abiotischer Faktoren (Monat, Uhrzeit, Windgeschwindigkeit, Temperatur, Niederschlag) Vorhersagen von Zeiten mit hoher Fledermausaktivität und dadurch hohem Kollisionsrisiko getroffen und die Anlagen für diesen Zeitraum abgeschaltet (BULLING et al. 2015: 78).

Vergleichbar wirksame technische Vermeidungsmaßnahmen sind für kollisionsgefährdete Vogelarten bisher nicht nachgewiesen. Allerdings kann das Kollisionsrisiko über Abstände z. B. zu Brut- oder Rastplätzen minimiert werden (vgl. sog. HELGOLÄNDER PAPIER der VSW).

Im Folgenden werden Flächen (-kategorien) beschrieben, die unabhängig vom Anlagentyp oder dem Stand der Umsetzung der Naturschutzziele immer mit demselben Raumwiderstand bewertet wurden. Bei den übrigen Flächen (-kategorien), kommt es in mindestens einem der Szenarien zu Verschiebungen der Raumwiderstandsklassen. Sie werden daher in den Annahmen zu den einzelnen Szenarien gesondert dargestellt (vgl. Kap. 7.4).

6.3.1 Flächen mit sehr hohem Raumwiderstand

Zu den Flächen mit sehr hohem Raumwiderstand zählen Siedlungsbereiche sowie Flächen für Infrastruktur (vgl. Kap. 6.2.1). Hinzu kommen anlagenspezifische Schutzabstände zur Gewährleistung von Gesundheit und Sicherheit, die bei der Ermittlung potenzieller Flächen für die Errichtung von Windenergieanlagen berücksichtigt werden müssen (vgl. Kap. 6.2).

Aus Sicht des Naturschutzes streng geschützte Gebiete wurden mit sehr hohem Raumwiderstand bewertet, da hier mit einer nachhaltigen Beeinträchtigung durch den Betrieb von Windenergieanlagen gerechnet wird. Bei den Ausschlussgebieten handelt es sich um Nationalparks, Naturschutzgebiete sowie Vogelschutz- und FFH-Gebiete.

Aus topografischen Gründen wurden alle Flächen mit einem Neigungswinkel von über 30 Grad mit sehr hohem Raumwiderstand bewertet (UBA 2013: 29).

Sämtliche Gewässer wie Flüsse, Kanäle und Binnengewässer sind ebenfalls von der Windenergienutzung ausgeschlossen und haben einen sehr hohen Raumwiderstand.

6.3.2 Flächen mit hohem Raumwiderstand

Einen hohen Raumwiderstand zugewiesen werden außerhalb der oben genannten Flächen, Gebiete mit Vorkommen gegenüber Windenergieanlagen empfindlicher Arten, da die Anlagen zu einem dauerhaften Lebensraumentzug oder einem direkten Artenverlust führen können. Hierunter fallen Verbreitungsgebiete gegenüber Windkraft empfindlicher Vogelarten (vgl. Kap. 6.2.2).

Unmittelbar an die geschützten FFH-, Vogelschutz- und Naturschutzgebiete grenzende Flächen sind in einem Umkreis von 200 m ebenfalls für die Erhaltung der Artenvielfalt von Bedeutung und damit einem hohen Raumwiderstand zuzuordnen, da auch hier von einem erhöhten Aufkommen empfindlicher Arten ausgegangen wird und mit Fernwirkungen der Windenergieanlagen in die Schutzgebiete hinein gerechnet werden muss.

Schutzgebiete, die zur Erhaltung geschützter Arten und Lebensgemeinschaften ausgewiesen wurden (Biosphärenreservate, Ramsar-Feuchtgebiete), wurden ebenfalls mit einem hohen Raumwiderstand bewertet.

Flächen mit einer hohen Landschaftsbildbewertung (nach HERMES et al.: submitted, vgl. Kap. 6.2.1) wurden ebenfalls mit einem hohen Raumwiderstand gegenüber der Windenergienutzung bewertet. Aufgrund des visuellen Wirkraums wurde die Abstandsfläche nach Kap. 6.2.1 ebenfalls einem hohen Raumwiderstand zugeordnet.

6.3.3 Flächen mit mittlerem Raumwiderstand

Mit mittlerem Raumwiderstand wurden Flächen mit mittlerem Schutzbedarf bewertet, wie z. B. Laub- und Mischwälder, bestehende Flussauen und potenzielle Überschwemmungsflächen, Landschaftsschutzgebiete, unzerschnittene Funktionsräume, unzerschnittene verkehrsarme Räume sowie die Flächen des nationalen Biotopverbundes.

Die Flächen des nationalen Biotopverbundes sowie die unzerschnittenen Funktionsräume und die unzerschnittenen verkehrsarmen Räume wurden vorläufig bewertet. Sie sind derzeit noch nicht ausreichend mit Daten über das Vorkommen von Zielarten und ihren ökologischen Ansprüchen untermauert. Windenergieanlagen können eine mögliche Zerschneidung dieser Landschaften bewirken, die Intensität der Landschaftszerschneidung hängt aber stark von der Anlagendichte ab. Vor allem der Bau von Anlagen zwischen Rast-, Schlaf- und/oder Brutgebieten empfindlicher Vogel- und Fledermausarten kann zur Zerschneidung wichtiger Biotopverbünde führen (vgl. Kap. 6.2.2). Hier sind weitere Forschungsarbeiten notwendig, um eine genauere und gut begründete Abgrenzung des Biotopverbundes zu erreichen.

Der Raumwiderstand der potenziellen Überschwemmungsflächen sowie die Flächen zur Umsetzung der Ziele der nationalen Biodiversitätsstrategie im Bereich „Auen und Flüsse“ wurde ebenfalls mit „mittel“ bewertet, da der Bau von Windenergieanlagen nur geringfügig zu Flächenversiegelungen führen wird und nur ein geringer Verlust von Überschwemmungsflächen und Auen zu erwarten ist.

Landschaftsschutzgebiete wurden als Hinweis (Indikator) auf einen erhöhten Raumwiderstand des Naturhaushalts und des Landschaftsbildes gewertet. Sie werden in der Praxis recht großflächig ausgewiesen. Je nach Schutzzweck ist aber eine Nutzung der Flächen durch erneuerbare Energien trotzdem möglich, so dass ihr Raumwiderstand zunächst als mittel eingestuft wurde. Auch Laubwälder außerhalb der Schutzgebiete werden dieser mittleren Raumwiderstandsklasse zugeordnet.

Aufgrund der Veränderung des Landschaftsbildes durch Windenergieanlagen wurde auf den Flächen mit mittlerer Landschaftsbildbewertung (nach HERMES et al.: submitted, vgl. Kap. 6.2.1) von einem mittleren Raumwiderstand ausgegangen. Ein Abstand zwischen Anlagen und der Landschaftsbildbewertung aufgrund der Wirkweite und Sichtbarkeit wurde nicht berücksichtigt, da in diesen Gebieten von Vorbelastungen durch andere Bauwerke ausgegangen wird.

6.3.4 Flächen mit geringem Raumwiderstand

Zu den für eine naturverträgliche Energieversorgung gut geeigneten Flächen mit einem geringen Raumwiderstand zählen landwirtschaftlich intensiv genutzte Grünland- und Ackerfläche sowie Nadelforste, die nicht Teil der vorher genannten Kategorien sind. Es wird davon ausgegangen, dass aufgrund ihrer Vorbelastung nur mit minimalen zusätzlichen Beeinträchtigungen durch Windenergieanlagen zu rechnen ist.

Der Raumwiderstand von Kulturlandschaften mit einer geringen Landschaftsbildbewertung (nach HERMES et al.: submitted, vgl. Kap. 6.2.1) wurde ebenfalls als gering eingestuft. Ein zusätzlicher Abstand um diese Gebiete aufgrund der weiteren Sichtbarkeit der Anlagen wurde nicht berücksichtigt, da von Vorbelastungen dieser Kulturlandschaften durch andere Bauwerke ausgegangen wird.

7 Auslegung der Szenarien

7.1 Übersicht über Szenarienauslegung und Annahmen

In insgesamt drei Szenarien wurde die Energieversorgung im Jahr 2050 unter zwei Voraussetzungen modelliert. Erstens: Deutschland wird vollständig aus erneuerbaren Energiequellen versorgt, bei gleichzeitiger Erfüllung der Anforderung hoher Mensch- und Naturverträglichkeit. Zweitens: Eine erhebliche Effizienzsteigerung wird den Endenergiebedarf so weit wie möglich reduzieren.

In allen Szenarien wurde das derzeit ausgewiesene Schutzgebietsnetz ebenso berücksichtigt wie Flächen zum Schutz der Lebensqualität des Menschen und Vermeidung von Konflikten mit Anwohnern. Darüber hinaus wurden der aktuelle Bestand an Windenergieanlagen einbezogen sowie der Netzausbau, der aus in den Szenarien unterschiedlichen Allokationen der Anlagen resultiert.

Die Stromspeicherbedarfe im Jahre 2050 konnten in der vorliegenden Studie nicht differenziert betrachtet werden, trotz ihrer hohen Bedeutung für den Gesamtstrombedarf. Es wurden deshalb sehr pauschale Schätzungen von 50 % der Stromproduktion eingesetzt (vgl. Kap. 2.7). Da der Speicherbedarf auch davon abhängt wo und in welchem Strommix, der Strom erzeugt wird, sollte er zukünftig in die Modellierung im Rahmen einer Modellkopplung aufgenommen werden, damit auch in diesem Bereich Entscheidungsoptionen verdeutlicht werden.

Die Szenarien unterscheiden sich in ihrer Auslegung vor allem in Hinblick auf den angenommenen Entwicklungsstand der Technik zur Wind- und Solarenergieerzeugung sowie auf den Stand der Umsetzung von Naturschutzziele bis zum Jahr 2050 (vgl. Tab. 13). Neben den sehr hohen Schutzstandards für Mensch und Natur sowie den Anstrengungen zur Energiebedarfsreduzierung werden für alle drei Szenarien in Bezug auf andere, nicht genauer betrachtete Strompotenziale wie offshore Windenergie, Geothermie etc., konservative Annahmen getroffen. Aus beiden Ansätzen ergeben sich Reserven: Es ist z. B. davon auszugehen, dass im Jahre 2050 einerseits mehr offshore Windenergie erzeugt werden kann und andererseits geringere Schutzabstände zu Siedlungen notwendig sein werden als für die Szenarien angenommen wurden.

Tab. 13: Annahmen bei der Berechnung der Szenarien I-III

		Szenario I	Szenario II	Szenario III
Energiebedarfsprojektion/ Stromspeicherbedarf	Strom- bedarf	• ambitionierte Strombedarfsentwicklung: 1.138 TWh/a • ambitionierte Strombedarfsentwicklung inkl. Stromspeicherung: 1.707 TWh/a • sehr ambitionierte Strombedarfsentwicklung: 818 TWh/a • sehr ambitionierte Strombedarfsentwicklung inkl. Stromspeicherung: 1.227 TWh/a		
	Wärme- bedarf	• Überwiegend strombasiert • Nutzung von Umgebungswärme		
	nicht- elektri- scher Energie- bedarf	315 TWh/a		
Stromertragspotenzial Photovoltaik im Innenbereich	Techno- logie	• Wirkungsgrad 20 % • prozentuale Ertragsminderung aufgrund von Ausrichtung	• Wirkungsgrad 30 % • prozentuale Ertragsminderung aufgrund von Ausrichtung	
	Flächen- potenzial	• Dachflächen mit einer Abweichung $\pm 90^\circ$ zur Südausrichtung; • Schrägdach (Siedlungsbereiche): 60 % der Dachfläche nutzbar • Flachdach (Industrie und Gewerbe): 80 % der Dachfläche nutzbar, Aufständering 10°, Ost/West Ausrichtung		
Stromertragspotenzial Windenergie an Land	Techno- logie	WEA 2016 • Nennleistung: 3 MW • Rotordurchmesser: 115,7 m • Nabenhöhe: 122 m • max. Schallleistungspegel: 105,0 dB(A) • Sicherheitsabstand zw. den Anlagen: 462,8 m	WEA 2050 • Nennleistung: 7,58 MW • Rotordurchmesser: 127 m • Nabenhöhe: 200 m • max. Schallleistungspegel: 108,5 dB(A) • Sicherheitsabstand zw. den Anlagen: 508 m • Abschaltalgorithmen verringern die Umweltwirkungen auf Fledermäuse	Anlagen WEA 2016 und WEA 2050 kombiniert zzgl. Kleinwindenergieanlage • Nennleistung: 13,5 kW • Höhe: 13,5 m
	Sehr hoher Raum- wider- stand	• Flächen mit Neigungswinkel $\geq 30^\circ$ • Gewässer • Nationalparks • Naturschutzgebiete • Vogelschutzgebiete • FFH-Gebiete	• Schutzabstände Siedlungsbereiche: Wohngebiete: 1.778 m Freizeit/Erholung: 3.162 m Industrie/Gewerbe: 178 m • Schutzabstände Infrastruktur: Autobahnen: 98 m Bundesstraßen: 78 m Leitungen: 116 m Trassen nach BNetzA: 116 m Seilbahnen: 347m Bahntrassen: 180 m Flughäfen: 5.000 m	• Schutzabstände Siedlungsbereiche: Wohngebiete: 2.511 m Freizeit/Erholung: 4.466 m Industrie/Gewerbe: 251 m • Schutzabstände Infrastruktur: Autobahnen: 104 m Bundesstraßen: 84 m Leitungen: 127 m Trassen nach BNetzA: 127 m Seilbahnen: 381 m Bahntrassen: 264 m Flughäfen: 5.000 m • Grünes Band Deutschland, Truppenübungsplätze & Bergbaufolgelandschaften • Wildnis- & Waldentwicklungsgebiete

Stromertragspotenzial Windenergie an Land	Hoher Raumwiderstand	• Biosphärenreservate • Ramsar-Feuchtgebiete • Historische Waldstandorte		
		• Vorkommen empfindlicher Vogel- und Fledermausarten außerhalb von Schutzgebieten der Kategorie sehr hoch zzgl. Pufferzone, • 200m Pufferzone um Nationalparks, Naturschutzgebiete, Natura 2000 Gebiete, • Wildnis- und Waldentwicklungsgebiete, • Truppenübungsplätze und Bergbaufolgelandschaften • Grünes Band Deutschland, • 200 m Pufferzone um historische Waldstandorte, • Landschaftsbildbewertung >56 von 100 zzgl. 2.698 m Pufferzone	• Vorkommen empfindlicher Vogelarten außerhalb von Schutzgebieten der Kategorie sehr hoch zzgl. Pufferzonen • 200m Pufferzone um Nationalparks, Naturschutzgebiete, Natura 2000 Gebiete, • Landschaftsbildbewertung >56 von 100 zzgl. 3.953 m Pufferzone	Für WEA 2016 und WEA 2050: • Vorkommen empfindlicher Vogelarten außerhalb von Schutzgebieten der Kategorie sehr hoch zzgl. Pufferzonen • 200m Pufferzone um Nationalparks, Naturschutzgebiete, Natura 2000 Gebiete, • Landschaftsbildbewertung >56 von 100 zzgl. anlagenspezifischer Pufferzone; Für Kleinwindenergieanlage: • Landschaftsbildbewertung >56 von 100
		• Natürliche Überflutungsräume • Unzerschnittene Verkehrsarme Räume • Nationaler Biotopverbund		
	Mittlerer Raumwiderstand	• Landschaftsschutzgebiete • Laub- und Mischwälder zzgl. 200m Schutzabstand • Landschaftsbildbewertung 46-56 von 100	• Landschaftsschutzgebiete • Laub- und Mischwälder • Landschaftsbildbewertung 46-56 von 100	Für WEA 2016 und WEA 2050: • Landschaftsschutzgebiete • Laub- und Mischwälder • Landschaftsbildbewertung 46-56 von 100 Für Kleinwindenergieanlage: • Laub- und Mischwälder
		• Grünland • Ackerflächen • Nadelwälder		
	Geringer Raumwiderstand	• Landschaftsbildbewertung <46 von 100	• Landschaftsbildbewertung <46 von 100	Für WEA 2016 und WEA 2050: • Landschaftsbildbewertung <46 von 100 Für Kleinwindenergieanlage: • Landschaftsschutzgebiete • Landschaftsbildbewertung <57 von 100
Weitere Stromertragspotenziale	Windenergie auf See	• Aktuell (EEG 2017) angestrebter Ausbau an Offshore Windenergie (bis 2030): 15 GW	• Ursprünglich (EEG 2014) angestrebter Ausbau an Offshore Windenergie (bis 2030): 25 GW	
	Weitere Energieträger	• Geothermie: 60 TWh/a • Wasserkraft: 34 TWh/a • Windenergie an Land – bestehende Anlagen: 143 TWh/a		
Nichtelektrisches Energieertragspotenzial	Biogene Reststoffe	• Abfälle aus Gewerbe, Siedlung und Industrie: Abfall aus Gewerbe und Industrie: 2TWh/a, Organische Siedlungsabfälle: 6 TWh/a • Reststoffe aus Holznutzung Holz im Hausmüll: 6 TWh/a, Industrieholz: 15 TWh/a, Altholz: 19 TWh/a • Klärschlamm und Klärgas: 12 TWh/a		
	Synthetische Brennstoffe aus Power-to-X	ergibt sich aus den bilanziellen Stromüberschüssen (Strombedarf – Stromertragspotenzial)		
Netze	Ergebnisse exemplarisches, ländliches Versorgungsgebiet Leitungslänge; • Anzahl Ortsnetzstationen (ONS) • zusätzliche ONS • Rückbau ONS • regelbare ONS • unveränderte Stationen • ONS-Summenleistung in MVA			

Das erste Szenario repräsentiert die Vergleichsbasis, an der die Möglichkeiten technischer Entwicklungen gemessen werden können. Es wurde daher mit aktuell bestehenden Technologien der Stromerzeugung berechnet.

Demgegenüber wurden im zweiten Szenario die Wirkungsgrade der PV-Anlagen sowie die Leistung und Nabenhöhe der Windenergieanlagen auf der Grundlage von Expertenannahmen zum Stand der Praxis im Jahre 2050 angehoben (vgl. STOEVESANDT 2017, Anhang 6.2). Damit kann gezeigt werden, welche Rolle die technische Entwicklung und Innovationsverbreitung spielt. Ferner kann auf Grundlage der Szenarien beurteilt werden, ob die derzeitigen Technologien mit ihren prognostizierten Entwicklungen für die Deckung des Energiebedarfs 2050 unter den getroffenen anspruchsvollen Schutzannahmen für Mensch und Natur ausreichend sind oder ob Flächen mit höherem Raumwiderstand besiedelt werden bzw. die Reserven genutzt werden müssen. Ebenfalls wird verdeutlicht wie weit die Gesamtanlagenzahl von Windenergieanlagen durch den Einsatz leistungsstarker Anlagen minimiert werden kann.

Das dritte Szenario ist eine Erweiterung des ersten und zweiten Szenarios um die Berechnung der Ertragspotenziale eines innovativen Windenergiesystems. In die Berechnungen geht derzeit nur eine Innovation beispielhaft ein (vgl. Kap. 7.2), da die potenziellen Leistungen weiterer innovativen Techniken noch nicht ausreichend quantifiziert werden können. Es sind jedoch viele weitere Innovationen denkbar, von denen ausgewählte Techniken in dieser Studie qualitativ beschrieben wurden (vgl. Anhang 1). Es erfolgt daher exemplarisch die Kombination der mit den Anlagen aus Szenario I und II, um die Variationsmöglichkeiten des Modells aufzuzeigen. Dadurch wurde verdeutlicht, welche Strompotenziale sich ergeben, wenn der verfügbare Raum durch eine größere Vielfalt und standortangepasste Kombination verschiedener Technologien genutzt wird.

Das Modell ermöglicht es, alle genannten Eingangsbedingungen zu verändern und damit die Folgen verschiedener Politikoptionen zu testen. Folgende Voraussetzungen bieten sich insbesondere für Variationen in zukünftigen Szenarien an:

- die Vorgaben für das zu erreichende Niveau der Versorgung mit erneuerbaren Energien,
- die technischen Daten für die Anlagen (z.B. Wirkungsgrad) und zu erwartenden Energieerträge sowie den Netzausbau,
- die Raumwiderstände aus Sicht des Naturschutzes und die Annahmen zu Schutzabständen um Siedlungen etc., sowie
- die technischen Voraussetzungen für die Reduzierung von Naturschutzwirkungen (z. B.: Abschaltmechanismen).

Ferner können in zukünftigen Modellierungen die Reserven in die Szenarien einbezogen werden (vgl. Kap. 8.5).

Im Folgenden werden die gewählten Eingangsgrößen näher spezifiziert und begründet.

7.2 Annahmen zu Windenergieanlagentypen

Szenario I

Für Szenario I wurde ein Anlagentyp ausgewählt, der den derzeitigen Stand der Technik darstellt. Die im Jahr 2016 installierten Neuanlagen hatten eine durchschnittliche Nennleistung von 2,8 MW, eine Nabenhöhe von 129 m sowie einen Rotordurchmesser von 109 m (DEUTSCHE WINDGUARD 2016). Anhand dieser Eckdaten wurde ein konkreter Anlagentyp als

„Windenergieanlage 2016“ definiert, mit einer Nennleistung von 3,0 MW, einem Rotordurchmesser von 116 m sowie einer Nabenhöhe von 122 m (vgl. Tab. 14)

Szenario II

Für Szenario II wurde ein technisches Anlagenniveau ausgewählt, das mit großer Plausibilität im Jahre 2050 erreicht sein wird: Bei einer Extrapolation der Entwicklung der durchschnittlichen Windenergieanlagenwerte von 2005 bis 2015, ist bis zum Jahr 2050 mit einer durchschnittlichen Nennleistung der Windenergieanlagen von 6 MW zu rechnen. Da die derzeit (2016) leistungsstärkste onshore Windenergieanlage bereits eine Nennleistung von 7,58 MW erreicht, wurde diese Anlage im Szenario II als Standardtechnologie für das Jahr 2050 verwendet (vgl. Tab. 14). Laut Expertenaussagen (vgl. STOEVE SANDT 2017, Anhang 6.8) wird sich die Nabenhöhe auf bis zu 200 m erhöhen. Als Verbesserung der Naturverträglichkeit sind die Anlagen 2050 flächendeckend mit Abschaltalgorithmen für Fledermäuse ausgestattet. Auf diese Weise sollen das Kollisionsrisiko und die Mortalitätsrate verringert werden.

Szenario III

In Szenario III wird neben den Anlagentypen aus Szenario I und II zusätzlich eine Kleinwindanlage eingesetzt. Das gewählte Modell hat keine freiliegenden Rotorblätter, wodurch negative Auswirkungen auf Fledermäuse und Vögel nicht zu erwarten sind. Entsprechend dem Funktionsschema der Anlage (vgl. Abb. 62) wird der Wind am höchsten Punkt der Anlage aufgenommen (Punkt 1) und in das „Tunnelsystem“ der Anlage geleitet (Punkt 2). Anschließend wird durch eine Verengung der Wind konzentriert und beschleunigt (Punkt 3) und durch die Turbinen/Generatoren Strom produziert (Punkt 4). Danach wird die Windgeschwindigkeit der ausströmenden Luft durch einen Diffuser wieder verlangsamt (Punkt 5). Die Nennleistungen der Kleinwindenergieanlagen reichen von 2 kW bei einer Höhe von 7 m bis hin zu 25 MW bei einer Höhe von 209 m (INVELOX 2017). Zur exemplarischen Darstellung der Möglichkeiten der Integration einer Kleinwindanlage wurde bei den Berechnungen die 13-kW-Anlage mit einer Höhe von 14 m berücksichtigt. Aufgrund des unterschiedlichen Bautyps der Kleinwindanlage und der zu erwartenden veränderten Umweltauswirkungen dieser Technologie ist es möglich, diese Anlage auf Flächen zu errichten, die in Szenario I und II mit sehr hohem, hohem oder mittlerem Raumwiderstand eingestuft wurden.

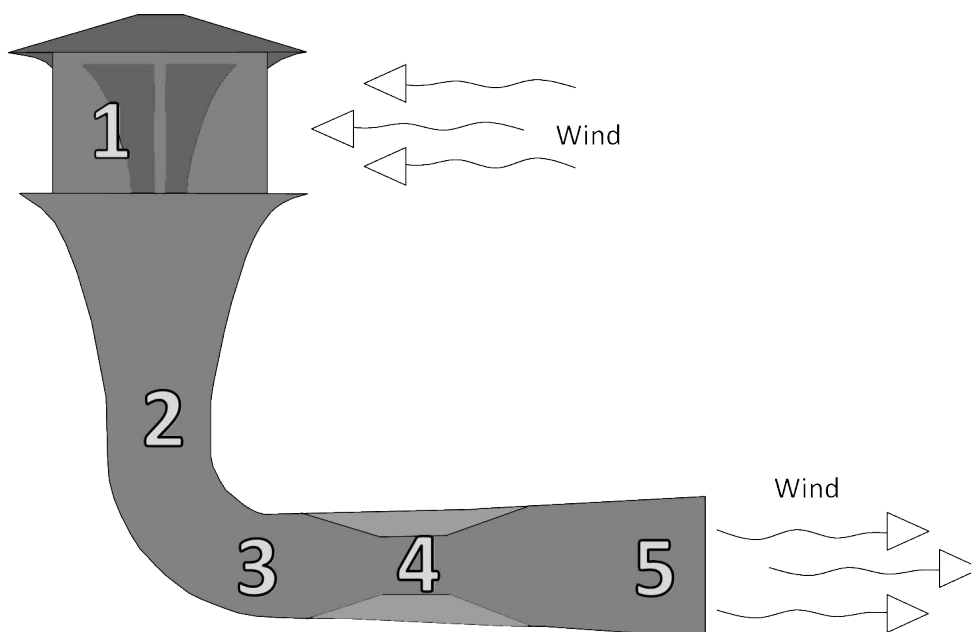


Abb. 32: Funktionsweise der Beispiel-Kleinwindanlage (nach INVELOX 2017)

7.3 Annahmen zum Schutzbedarf von Mensch und Infrastrukturen

Die Schutzabstände zu Siedlungen, Erholungsgebieten und Infrastrukturen ergeben sich aus den Eigenschaften der Windenergieanlage (vgl. Tab. 14). Dabei sind Nabenhöhe, Rotordurchmesser sowie der Schallleistungspegel ausschlaggebend für die berechneten Abstände (vgl. Kap. 6.2.1).

Tab. 14: Eigenschaften der Windenergieanlagen an Land in den Szenarien I-III

Anlageneigenschaft	Szenario I	Szenario II	Szenario III		
Nennleistung	3,0 MW	7,58 MW	13 kW	3,0 MW	7,58 MW
Nabenhöhe	122 m	200 m	13,5 m	122 m	200 m
Rotordurchmesser	115,7 m	127 m	-	115,7 m	127 m
Schallleistungspegel	105,0 dB[A]	108,5 dB[A]	-	105,0 dB[A]	108,5 dB[A]

7.3.1 Schutzabstände zu Siedlungsbereichen und Erholungsgebieten

Abb. 33 gibt einen Überblick über die Schutzabstände zu Wohngebieten in den drei Szenarien. Dabei wurden bei der Berechnung der Abstände zwischen Anlagen und Siedlungen sowie Erholungsgebieten von einer gerichteten Schallausbreitung ausgegangen und somit extreme, weit über die Anforderungen der TA Lärm hinausgehende, Abstände berechnet. Dies diente dazu eine datenbedingten Unterschätzung der bilanziellen Gesamtabstandfläche in Deutschland auszugleichen (vgl. Kap. 6.2.1). Gleichzeitig wurden damit pauschal über Gesundheitswirkungen hinausgehende andere Beeinträchtigungen berücksichtigt, wie visuelle Störungen oder bis 2050 mögliche höhere Schutzansprüche (vgl. Kap. 6.2.1). Die angenommenen Schutzabstände sind deshalb keineswegs als Empfehlungen für die Planungspraxis zu verstehen.

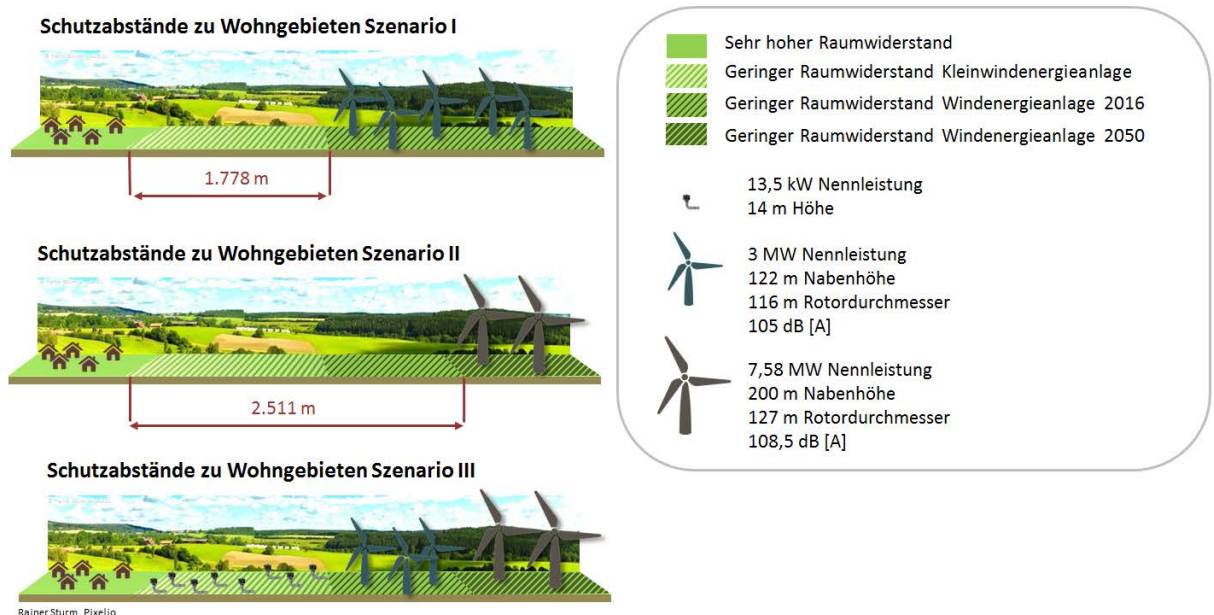


Abb. 33: Unterschiedliche Technologien der Windenergieanlagen in den einzelnen Szenarien führen aufgrund der Schallausbreitung zu unterschiedlichen Schutzabständen zu den Siedlungen

Szenario I

Anhand des Schallleistungspegels der Anlage 2016 von 105,0 dB[A] wurde ein Abstand zu Wohngebieten von 1.778 m ermittelt, hinzu kommt ein Abstand zu Flächen für Freizeit und Erholung von 3.162 m (vgl. Kap. 6.2.1). Der Abstand zu Industrie- und Gewerbegebieten beträgt aufgrund des Schallleistungspegels ca. 178 m. Landschaften mit besonders hoher ästhetischer Qualität wurden zusätzlich mit einer Pufferzone von 2.698 km umgeben (vgl. Kap. 6.2.1)

Szenario II

Aufgrund des um 3,5 dB[A] höheren Schallleistungspegels der Windenergieanlage 2050 gegenüber der Anlage von 2016 erhöhen sich die Abstände zu den Siedlungsbereichen auf 2.511 m, zu den Flächen für Freizeit und Erholung auf 4.466 m sowie zu den Gewerbegebieten auf 251 m. Die größere Sichtweite der Anlage führt zudem auch zu einer Vergrößerung der Abstände zu den Landschaften mit hoch bewertetem Landschaftsbild, die mit einem Puffer von 3.953 m umgeben wurden.

Szenario III

In Szenario III werden zunächst die bereits beschriebenen Abstände der anderen Szenarien berücksichtigt. Hinzukommt die Kleinwindanlage, die aufgrund der geringen Lautstärke ohne Berücksichtigung von Sicherheitsabständen zu Siedlungen eingesetzt werden kann. Da die Anlage nur eine Höhe von ca. 14 m aufweist, ist auch ein Schutzabstand zu ästhetisch wertvollen Landschaften nicht notwendig.

Tab. 15 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die unterschiedlichen Schutzabstände der einzelnen Szenarien zu den verschiedenen Flächenkategorien.

Tab. 15: Schutzabstände zu Siedlungsbereichen, Erholungsgebieten und Landschaften mit besonderer ästhetischer Qualität in den Szenarien I-III

Abstände zu:	Szenario I	Szenario II	Szenario III (Kleinwindanlage)
Wohngebieten	1.778 m	2.511 m	-
Freizeit/Erholung	3.162 m	4.466 m	-
Industrie/Gewerbe	178 m	251 m	-
Landschaftsbild > 56	2.698 m	3.953 m	-

Um die Flexibilität der Raumwiderstände und die in diesem Feld nutzbare Reserve an Stromertragspotenzialen zu verdeutlichen, wurde eine zusätzliche Szenarienvariante gerechnet, die ausschließlich die durch die TA-Lärm geforderten Abstandsberechnungen zu Grunde legt (vgl. Kap. 8.5).

7.3.2 Schutzabstände zu Infrastrukturen

Szenario I

Abstände zur Infrastruktur werden bei der Windenergieanlage 2016 (Szenario I) entsprechend der Nabenhöhe von 129 m sowie dem Rotordurchmesser von 109 m berechnet (vgl. Kap. 6.2.1), wodurch sich die in Tab. 16 und Abb. 34 dargestellten Abstände zwischen 78 m und 347 m ergeben. Lediglich für Flughäfen gilt der deutlich größere, gesetzlich vorgeschriebene Abstand von 5.000 m.

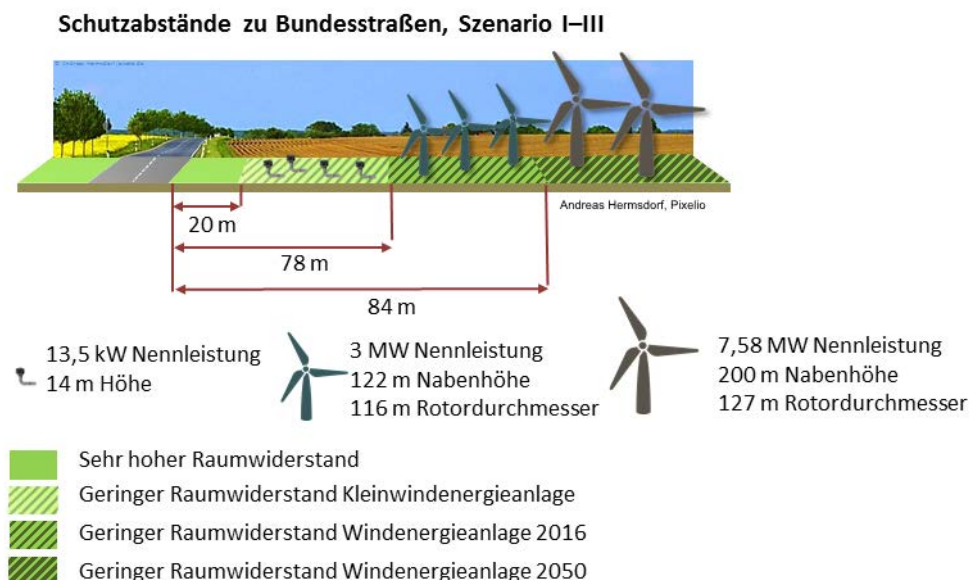


Abb. 34: Schutzabstände der Windenergieanlagen zu Bundesstraßen in den Szenarien I-III

Szenario II

Die größere Nabenhöhe von 200 m und der größere Rotordurchmesser von 127 m führen in Szenario II zu einer Erhöhung der Schutzabstände zwischen Windenergieanlage und Infrastrukturen auf bis zu 381 m (vgl. Abb. 34, Tab. 16)

Szenario III

Neben den Schutzabständen zu Infrastrukturen der oben genannten Anlagen, wird in Szenario III die Kleinwindanlage berücksichtigt. Da diese keine freiliegenden Rotorblätter besitzt, müssen nur solche Sicherheitsabstände eingehalten werden, die abhängig von der Anlagenhöhe ermittelt werden. Dies gilt z. B. für Abstände zu Autobahnen oder Bundesstraßen (vgl. Kap. 6.2.1, Abb. 34), zu denen ein Abstand von 20 m bzw. 40 m eingehalten werden müsste.

Tab. 16: Schutzabstände der Windenergieanlagen zu Infrastrukturen in den Szenarien I-III

Abstände zu:	Szenario I	Szenario II	Szenario III (Kleinwindanlage)
Autobahnen	98 m	104 m	40 m
Bundesstraßen	78 m	84 m	20 m
Leitungen	116 m	127 m	-
Seilbahnen	347 m	381 m	-
Bahntrassen	180 m	264 m	-
Flughäfen	5.000 m	5.000 m	5.000 m

7.4 Annahmen zum Naturschutz im Jahr 2050

Grundlage für die Berücksichtigung der Ziele des Naturschutzes bilden das derzeitige Schutzgebietsnetz und die Ziele der Biodiversitätsstrategie für das Jahr 2050. Ihnen werden in den drei Szenarien unterschiedliche Schutzniveaus zugeordnet, die die Bewertung der Raumwiderstände beeinflussen (vgl. Tab. 17).

Tab. 17: Einteilung der Raumwiderstandsklassen Windenergie in den Szenarien I-III

	Szenario I	Szenario II	Szenario III
Sehr hoher Raumwiderstand	• Flächen mit Neigungswinkel $\geq 30^\circ$ • Gewässer • Nationalparks • Naturschutzgebiete • Vogelschutzgebiete • FFH-Gebiete		
	• Schutzabstände Siedlungsbereiche: Wohngebiete: 1.778 m Freizeit/Erholung: 3.162 m Industrie/Gewerbe: 178 m • Schutzabstände Infrastruktur: Autobahnen: 98 m Bundesstraßen: 78 m Leitungen: 116 m Trassen nach BNetzA: 116 m Seilbahnen: 347m Bahntrassen: 180 m Flughäfen: 5.000 m	• Schutzabstände Siedlungsbereiche: Wohngebiete: 2.511 m Freizeit/Erholung: 4.466 m Industrie/Gewerbe: 251 m • Schutzabstände Infrastruktur: Autobahnen: 104 m Bundesstraßen: 84 m Leitungen: 127 m Trassen nach BNetzA: 127 m Seilbahnen: 381 m Bahntrassen: 264 m Flughäfen: 5.000 m • Grünes Band Deutschland, Truppenübungsplätze & Bergbaufolgelandschaften • Wildnis- & Waldentwicklungsgebiete	• Schutzabstände zu Siedlungsbereichen und Infrastruktur anlagenspezifisch; Kleinwindenergieanlage erfordert keine Schutzabstände • Grünes Band Deutschland, Truppenübungsplätze & Bergbaufolgelandschaften • Wildnis- & Waldentwicklungsgebiete
Hoher Raumwiderstand	• Biosphärenreservate • Ramsar-Feuchtgebiete • Historische Waldstandorte		
	• Vorkommen empfindlicher Vogel- und Fledermausarten außerhalb von Schutzgebieten der Kategorie sehr hoch zzgl. Pufferzone, • 200m Pufferzone um Nationalparks, Naturschutzgebiete, Natura 2000 Gebiete, • Wildnis- und Waldentwicklungsgebiete, • Truppenübungsplätze und Bergbaufolgelandschaften • Grünes Band Deutschland, • 200 m Pufferzone um historische Waldstandorte, • Landschaftsbildbewertung >56 von 100 zzgl. 2.698 m Pufferzone	• Vorkommen empfindlicher Vogelarten außerhalb von Schutzgebieten der Kategorie sehr hoch zzgl. Pufferzonen • 200m Pufferzone um Nationalparks, Naturschutzgebiete, Natura 2000 Gebiete, • Landschaftsbildbewertung >56 von 100 zzgl. 3.953 m Pufferzone	Für WEA 2016 und WEA 2050: • Vorkommen empfindlicher Vogelarten außerhalb von Schutzgebieten der Kategorie sehr hoch zzgl. Pufferzonen • 200m Pufferzone um Nationalparks, Naturschutzgebiete, Natura 2000 Gebiete, • Landschaftsbildbewertung >56 von 100 zzgl. anlagenspezifischer Pufferzone; Für Kleinwindenergieanlage: • Landschaftsbildbewertung >56 von 100
Mittlerer Raumwiderstand	• Natürliche Überflutungsräume • Unzerschnittene Verkehrsarme Räume • Nationaler Biotopverbund		
	• Landschaftsschutzgebiete • Laub- und Mischwälder zzgl. 200m Schutzabstand • Landschaftsbildbewertung 46-56 von 100	• Landschaftsschutzgebiete • Laub- und Mischwälder • Landschaftsbildbewertung 46-56 von 100	Für WEA 2016 und WEA 2050: • Landschaftsschutzgebiete • Laub- und Mischwälder • Landschaftsbildbewertung 46-56 von 100 Für Kleinwindenergieanlage: • Laub- und Mischwälder
Geringer Raumwiderstand	• Grünland • Ackerflächen • Nadelwälder		
	• Landschaftsbildbewertung <46 von 100	• Landschaftsbildbewertung <46 von 100	Für WEA 2016 und WEA 2050: • Landschaftsbildbewertung <46 von 100 Für Kleinwindenergieanlage: • Landschaftsschutzgebiete • Landschaftsbildbewertung <57 von 100

Szenario I

In Szenario I werden die Flächen des aktuellen Schutzgebietsnetzes den Raumwiderstandsklassen zugeordnet (vgl. Tab. 17). Für potenzielle Flächen zur Umsetzung der Ziele der Biodiversitätsstrategie (vgl. Kap. 6.2.2) wird ein hoher Raumwiderstand angenommen, dazu zählen potenzielle Wildnisflächen, natürliche Waldentwicklungsflächen, sowie Truppenübungsplätze und Bergbaufolgelandschaften. Aufgrund des hohen naturschutzfachlichen Wertes wurde auch dem Grünen Band Deutschlands ein hoher Raumwiderstand zugewiesen. Hinzu kommt eine Abstandsfläche von 300 m zum Kolonnenweg, um negative Auswirkungen auf das Band auszuschließen (MINISTERIUM FÜR INFRASTRUKTUR UND LANDWIRTSCHAFT THÜRINGEN 2016).

Szenario II

In Szenario II wird davon ausgegangen, dass die Biodiversitätsstrategie der Bundesregierung umgesetzt und das Schutzgebietsnetz entsprechend erweitert ist (vgl. Kap. 6.2.2). Das bedeutet: Das Grüne Band Deutschland wird als Naturmonument ausgewiesen sein und daher zu den Flächen mit sehr hohem Raumwiderstand zählen. Die Truppenübungsplätze sowie die potenziellen Wildnis- und natürlichen Waldentwicklungsgebiete haben als Nationalparks ebenfalls einen sehr hohen Raumwiderstand (vgl. Kap. 6.2.2). Aufgrund der Abschaltalgorithmen der Windenergieanlage 2050 in Szenario II werden die Verbreitungsgebiete von Fledermausarten nicht mehr berücksichtigt, da die Anlagen den Schutzauflagen entsprechen.

Szenario III

Die Annahmen des zweiten Szenarios gelten auch in Szenario III. Eine Beeinträchtigung von Vögeln und Fledermäusen durch die Kleinwindanlage wurde zunächst aufgrund der nicht freiliegenden Rotoren ausgeschlossen und die Raumwiderstände entsprechend angepasst. Wissenschaftliche Untersuchungen hierzu liegen allerdings nicht vor (vgl. Kap 8.3).

7.5 Annahmen zur Berechnung des Stromertragspotenzials

Die Berechnung der potenziell nutzbaren Stromerträge im Jahr 2050 wurde in den vorgelegten Szenarien nur für Windenergie und Photovoltaik im Innenbereich durchgeführt (vgl. Kap. 3.2). Weitere darüber hinaus gehende Stromertragspotenziale wurden nicht selbst berechnet, sondern als überschlägige Werte aus bestehenden Studien übertragen. Das naturverträgliche Energieertragspotenzial der Energieträger Wasserkraft sowie Geothermie ist demnach in allen Szenarien gleich und wurde der UBA-Studie (2010) entnommen. Laut der Studie liegen das naturverträgliche Stromertragspotenzial der **Wasserkraft bei 24 TWh/a** und das der **Geothermie bei 50 TWh/a**.

7.5.1 Annahmen zu Windenergie auf See

Szenario I

Das Potenzial für Windenergie auf See wurde überschlägig berechnet. In Szenario I wurde pauschal angenommen, dass der durch die Bundesregierung geplante Ausbau der Offshore-Windenergie (bis 2030) auf 15 GW (EEG 2017) à 4.500 Volllaststunden erfolgt ist

(BMWi 2017). Der jährliche potenzielle Stromertrag beträgt dann im Jahr 2050 etwa **67,5 TWh/a**.

Szenario II und III

In Szenario II und III wurde mit dem von der Bundesregierung im EEG 2014 angestrebten Entwicklungsziel zum Ausbau von Offshore-Windenergie für 2030 gerechnet. Dieses Ziel lag bei 25 GW à 4.500 Volllaststunden (FRAUNHOFER IWES o.J.), so dass sich für die Szenarien II und III ein potenzieller Stromertrag von **112,5 TWh/a** ergibt. Darüberhinausgehend wurden keine weiteren Offshore-Windparks in die Szenarien aufgenommen.

7.5.2 Annahmen zur Windenergie an Land

Szenario I

Die Leistungskennlinie der für Szenario I gewählten Anlage (2016) wurde zur Ertragsberechnung im Modell eingesetzt (vgl. Abb. 35). Die Anlage würde aus wirtschaftlicher Sicht nicht an allen ermittelten Standorten eingesetzt, da sie nicht überall die optimale Volllaststundenzahl erreicht. Die hier erfolgten überschlägigen Berechnungen der Ertragspotenziale zeigten, dass sie in den meisten Fällen trotzdem potenziell höhere Erträge erzielt, als es mit einer kleineren Anlage bei deren optimaler Auslastung möglich wäre. Die Wahl des Anlagentyps erfolgt in der Planungspraxis immer standortbezogen, was in dieser Studie aufgrund der bundesweiten Betrachtung aber nicht berücksichtigt werden konnte.

Szenario II

Die in Szenario II eingesetzte Windenergieanlage 2050 hat eine Nennleistung von 7,58 MW (vgl. Abb. 35). Auch hier ist die Anlage aus den oben genannten Gründen aus wirtschaftlicher Sicht nicht an allen Standorten optimal. Die berücksichtigten Abschaltalgorithmen für Fledermäuse führen zu einem Ertragsverlust von 1 % - 3 %, wobei mit einem Verlust von 3 % nur an extremen Schwachwindstandorten zu rechnen ist (BRINKMAN et al: 2011: 364ff). Aufgrund der geringen Ertragsverluste und weil eine genauere Berechnung im Zuge des Projektes nicht möglich war, wurden die Verluste bei der Berechnung des Gesamtstromertragspotenzials nicht weiter berücksichtigt.

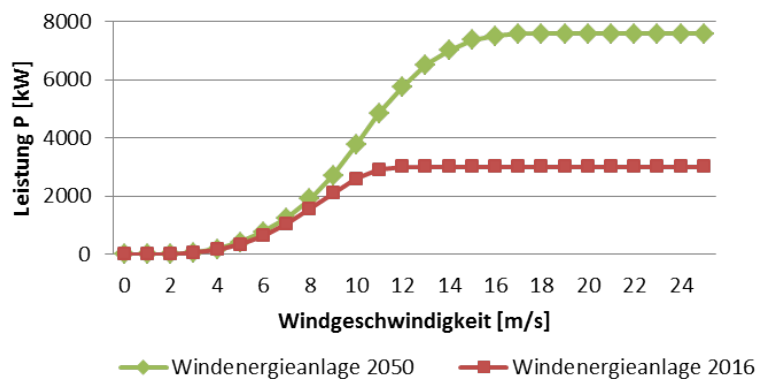


Abb. 35: Leistungskennlinien der Windenergieanlage 2016 und Windenergieanlage 2050 (nach ENERCON 2016 a & ENERCON 2016 b)

Szenario III

Die Nennleistung der in Szenario III zusätzlich berücksichtigten Kleinwindanlage liegt bei 13 kW (vgl. Abb. 36). Für die Ermittlung des potenziellen Stromertrags wurden ebenso wie in Szenario II im ersten Schritt die Flächen mit geringem Raumwiderstand für den Bau der Windenergieanlage 2050 als leistungsstärkste Anlage identifiziert und die potenziellen Erträge auf diesen Flächen berechnet. Anschließend wurden aus den verbliebenen Flächen diejenigen mit geringem Raumwiderstand gegenüber der Windenergieanlage 2016 herausgearbeitet und diese Anlage dort verortet. Im letzten Schritt wurden von den übrigen Flächen jene mit einem geringen Raumwiderstand gegenüber der Kleinwindanlage ermittelt und die Erträge dieser Anlage zusätzlich berechnet.

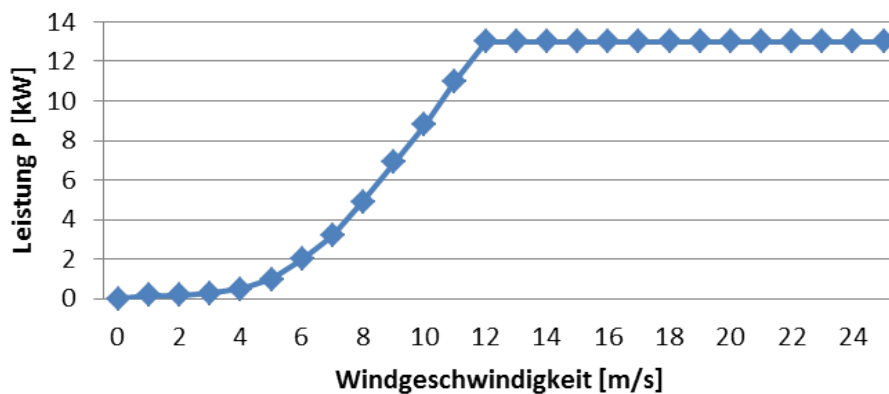


Abb. 36: Leistungskennlinie Kleinwindanlage (nach INVELOX 2017)

Bereits bestehende Windenergieanlagen

Das Stromertragspotenzial sowie das Optimierungspotenzial bereits bestehender Windenergieanlagen wurden lediglich überschlägig berechnet, da die tatsächlichen Standorte der Windenergieanlagen nicht als präziser Datensatz vorlagen.

Im Jahr 2016 wurden in Deutschland 27.270 Windenergieanlagen betrieben (BWE 2016b: www), von denen lediglich 15.058 Anlagen im vorliegenden Datensatz enthalten sind. Es ist davon auszugehen, dass hier sowohl einzelne Anlagen aber auch vollständige Windparks als ein Punktelement aufgenommen wurden. 14.907 dieser Punktelemente würden laut der Raumwiderstandsanalyse des Szenario I auf nicht menschen- und naturverträglichen Flächen stehen. Bei 12.406 Anlagen bzw. Windparks wurden die Abstände zu Siedlungen wie sie in Szenario I berechnet wurden nicht eingehalten. Dabei ist festzuhalten, dass in den Szenarien mit weitaus größeren Abständen gerechnet wurde, als vorgeschrieben. Aufgrund dessen und der Tatsache, dass die Standorte im Rahmen der jeweiligen Genehmigungsverfahren naturschutzfachliche Prüfungen erfolgreich durchlaufen haben, muss davon ausgegangen werden, dass die Standorte auch zukünftig noch genutzt werden und diese nicht per se ungeeignet oder mit hohen Risiken für den Naturschutz oder die menschliche Gesundheit behaftet wären.

Vor diesem Hintergrund wurde als vorläufige Größe ein Stromertragspotenzial von 141,95 TWh/a durch bereits bestehende Windenergieanlagen in die Betrachtung einbezogen. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich die Nennleistungen der bestehenden Anlagen im Zuge eines Repowerings erhöhen werden. Bei 27.270 Windenergieanlagen in

Deutschland mit einer installierten Gesamtnennleistung von 45.910 MW (BWE 2016a: [www](#)) ergibt sich eine aktuell durchschnittliche Leistung von 1,68 MW pro installierter Anlage. Werden die Anlagen im Rahmen des Repowering auf den heute standardisierten technologischen Stand gebracht, könnte die installierte Leistung bei 3 MW pro Anlagen liegen (vgl. Kap. 7.2). Zur Berechnung des Ertragspotenzials der bereits bestehenden Anlagen wurde daher der Energieertrag dieser höheren Nennleistung an den bereits bestehenden Standorten angenommen, auch wenn diese außerhalb der mensch- und naturverträglichen Flächen liegen (siehe Windenergieanlage 2016, Kap. 8.1.1). Ob diese teilweise deutlich größeren Anlagen an jedem der Standorte tatsächlich realisiert werden können, ist unsicher. Letztlich ist immer eine Einzelfallprüfung notwendig.

Beachtet werden muss allerdings auch, dass es durch die räumliche Verschneidung der Raumwiderstände für Neuanlagen mit den räumlich derzeit nur sehr unpräzise beschriebenen Bestandsanlagen im Einzelfall sogar zu Doppelbelegungen von Flächen durch einen neuen und einen bestehenden Windpark kommen kann.

Daher muss damit gerechnet werden, dass der Beitrag der Bestandsanlagen zu einer mensch- und naturverträglichen Stromerzeugung angesichts der unzulänglichen Daten zu hoch angesetzt ist. Dieser Fehler ist aber wiederum nicht hinreichend sicher abzuschätzen, um ihn in zulässiger Weise zu korrigieren. Angesichts dieser methodischen Schwierigkeit wurde entschieden, die bestehenden Windparke außerhalb der mensch- und naturverträglichen Flächen fortzuschreiben, aber deren Beitrag aufgrund der Unsicherheiten im Gesamtstrommix separat zu kennzeichnen.

Im Fall einer verfeinerten Analyse müssten die bestehenden Standorte auf der Basis besserer Daten nochmals überprüft werden.

7.5.3 Annahmen zu Photovoltaik im Innenbereich

In der vorliegenden Studie wurde der Einsatz von Photovoltaik im Innenbereich, d. h. auf Dächern, Fassaden oder auch Straßen angenommen, da hier nur wenige Konflikte mit dem Naturschutz erwartet werden. Eine Kombination der Solarmodule mit Systemen der Dachbegrünung beispielsweise ist in vielen Fällen möglich (LANDESHAUPTSTADT HANNOVER 2015). Durch eine solche Kombination kann der Einsatz von Photovoltaik sowohl möglichen kommunalen Zielen zum Ausbau der Dachbegrünung (z. B. STUTTGART 2017: [www](#)), als auch dem Ausbau erneuerbarer Energien gerecht werden.

Die Berücksichtigung der Belange des Denkmalschutzes konnte aufgrund fehlender Eingangsdaten nicht erfolgen. Die Installation von Photovoltaik auf Denkmälern ist grundsätzlich genehmigungspflichtig (BINDER et al. 2014). Dies gilt auch, wenn die Veränderungen nicht unmittelbar am denkmalgeschützten Gebäude selbst stattfinden, sondern in seinem Umfeld. Bewertungsgrundlage ist dabei die Bedeutungskategorie des Denkmals und die Beeinträchtigungsintensität der Anlage. Im Vordergrund stehen im Wesentlichen der Aspekt der Einsehbarkeit und die damit verbundenen Beeinträchtigungen des Erscheinungsbildes. Um eine hohe PV-Nutzung auf Dachflächen zu erreichen, müssen daher zukünftig denkmalschutzkonforme Lösungen gefunden und angewendet werden. Möglich ist beispielsweise eine andere Farbgestaltung als die bisher überwiegend blauen Module oder eine ästhetisch anspruchsvolle Einbindung der Solaranlage in den Bestand.

Szenario I

Zur Berechnung des Stromertragspotenzials aus Photovoltaik wurde in Szenario I von einem Bestand von 51,8 Mio. Gebäuden ausgegangen (Datensatz: Gebäudeumringe, BKG). Berechnet wurde der potenzielle Stromertrag aus kristallinen Silizium PV-Modulen, die Wirkungsgrade bis zu 20 % erreichen (BRENDL & NIEPELT 2016: 6, Anhang 6.2). Es wurde weiterhin angenommen, dass alle geeigneten Dächer mit Photovoltaik belegt werden (vgl. Kap.4.2.1). Daraus ergeben sich eine nutzbare Dachfläche von 1.950 km² (vgl. Abb. 37).

Zu dem Ertragspotenzial auf Dachflächen wurde das Ertragspotenzial an Fassaden sowie auf anderen versiegelten Siedlungsflächen hinzugerechnet. Die Berechnungsgrundlage hierfür bildeten potenzielle Flächen und Erträge der UBA-Studie „Energieziel 2050“ (UBA 2010). Demnach stehen zum Ausbau von Photovoltaik 150 km² Fassade sowie 670 km² versiegelte Siedlungsfläche zur Verfügung.

Szenario II und III

In Szenario II und III wurde der potenzielle Stromertrag aus PV-Modulen mit einem deutlich höheren Wirkungsgrad von bis zu 30 % berechnet (BRENDL & NIEPELT 2016: 4, Anhang 6.2). Diese technische Weiterentwicklung scheint derzeit bis zum Jahr 2050 umsetzbar, wobei die technologischen Entwicklungen deutlich vor 2050 erfolgen müssen, damit sie bis 2050 eine entsprechende Verbreitung (fast vollständige Marktdurchdringung) erfahren können. Aufgrund der Schätzung, dass die Wohnfläche pro Kopf in den Jahren 2000 bis 2014 von 39,5 m² auf 46,5 m² pro Einwohner steigen wird (UBA 2016: www), wird trotz angenommener Bevölkerungsdegression (12 %) (vgl. Kap. 2.2) von einem Gebäudezubau ausgegangen. Zwischen 2001 und 2016 wurden pro Jahr durchschnittlich 165.000 Gebäude in Deutschland neu errichtet (Statistisches Bundesamt 2011-2015). Während die Errichtung neuer Gebäude zwischen 2001 und 2009 noch sank, stieg die Neuerrichtung gegenüber 2009 in den letzten Jahren wieder leicht an. Hochgerechnet auf das Jahr 2050 ergibt sich so ein Zubau von rund 5,4 Mio. Gebäuden. Die Zahlen des Statistischen Bundesamtes in Bezug auf die Bautätigkeit (STATISTISCHES BUNDESAMT 2011-2015) zeigen, dass es neben dem Zubau einen Rückbau von rund 12.000 Gebäuden pro Jahr gab. Durch den gemittelten Zubau von 5,4 Mio. Gebäuden und den Rückbau von 396.000 Gebäuden ergibt sich bis zum Jahr 2050 ein Zuwachs von rund 5 Mio. Gebäuden.

Werden im Jahr 2050 sämtliche bestehenden und neu errichtete Gebäude für die Produktion von Strom aus Photovoltaik genutzt, ergibt sich in Szenario II eine nutzbare Dachfläche von 2.150 km² (vgl. Abb. 37).

Zusätzlich zum Ertragspotenzial auf Dachflächen wurde auch in Szenario II das Ertragspotenzial an Fassaden sowie auf anderen versiegelten Siedlungsflächen ermittelt. Die potenziellen Flächen und Erträge wurden dabei analog dem Szenario I der UBA Studie (2010) entnommen und auf den erhöhten Wirkungsgrad von 30 % angepasst. Zusätzlich zum Zubau von Gebäuden wurde auch der Ausbau von Infrastruktur berücksichtigt, indem die Fassadenfläche sowie die versiegelte Verkehrsfläche analog zum Gebäudezubau um ca. 10 % erhöht wurden. Dadurch ergeben sich ein Fassadenpotenzial von 165 km² und ein Potenzial an versiegelter Verkehrsfläche von 736 km².

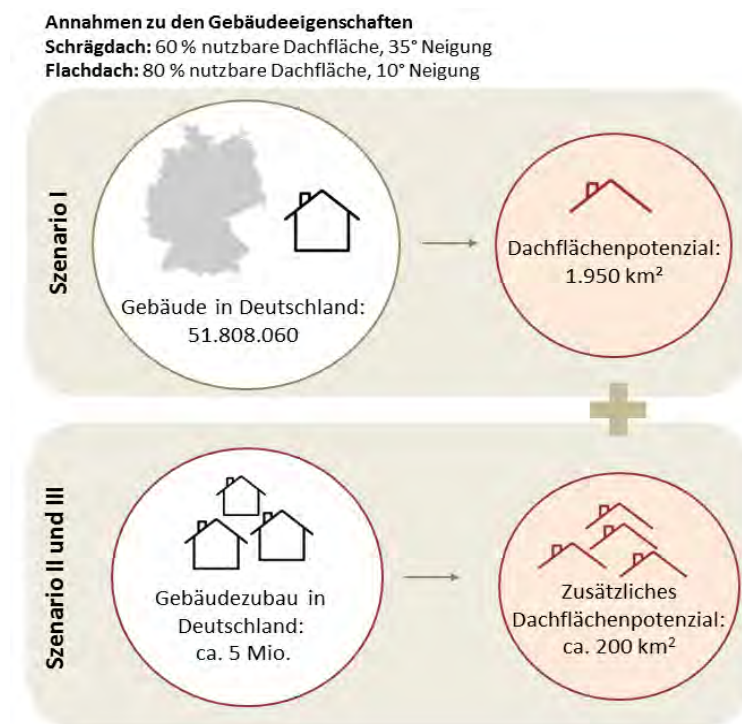


Abb. 37: Annahmen zur Berechnung des nutzbaren Dachflächenpotenzials in den Szenarien I-III

Bei der Anzahl der Gebäude handelt es sich um die im Shapefile enthaltenen Gebäudeumringe. Dieser Wert ist deshalb so hoch, weil der Datensatz auch Garagen und Häuser in Kleingarensiedlungen als einzelne Umringe und somit als eigenständige Gebäuden abbildet.

7.6 Annahmen zur Berechnung des nichtelektrischen Energieertragspotenzials

Neben Strom werden in Zukunft weiterhin Brenn- bzw. Treibstoffe als Energieträger benötigt (vgl. Kap. 2). Diese werden in vergleichsweise schwer zu elektrifizierenden Bereichen eingesetzt, z. B. im Gebiet der Prozesswärme, bei dem einzelne Industrieprozesse auf die Verbrennung (kohlenstoffhaltiger) Brennstoffe angewiesen sind. Weiterhin sind im Bereich der mobilen Anwendungen insbesondere Treibstoffe für Schiffe, Flugzeuge und ein (geringer) verbleibender Anteil kraftstoffbasierter Fahrzeuge vorgesehen.

Der projizierte Bedarf an nichtelektrischer Energie liegt bei 315 TWh/a (vgl. Kap. 2.8). Diese können durch biogene Reststoffe gedeckt werden sowie durch Stromüberschüsse, welche durch Power-to-X-Verfahren in Brennstoffe umgewandelt werden.

Holz oder Anbaubiomasse werden aus Gründen der Energie- und Flächeneffizienz nicht für die Deckung des Brennstoffbedarfs herangezogen, da biogene Reststoffe im Energiemix nur dann eine Rolle spielen sollten, wenn sie zuvor soweit möglich einer stofflichen Nutzung zugeführt wurden und die energetische Nutzung den Endpunkt der Kaskade darstellt. Nach dem Modell des „Smart use of Biomass“ nach EUROPEAN COMMISSION 2012 & 2013 wären auf dem Weg in eine post-fossile Gesellschaft alle Rohstoffe effizient zu nutzen (vgl. Abb. 38).

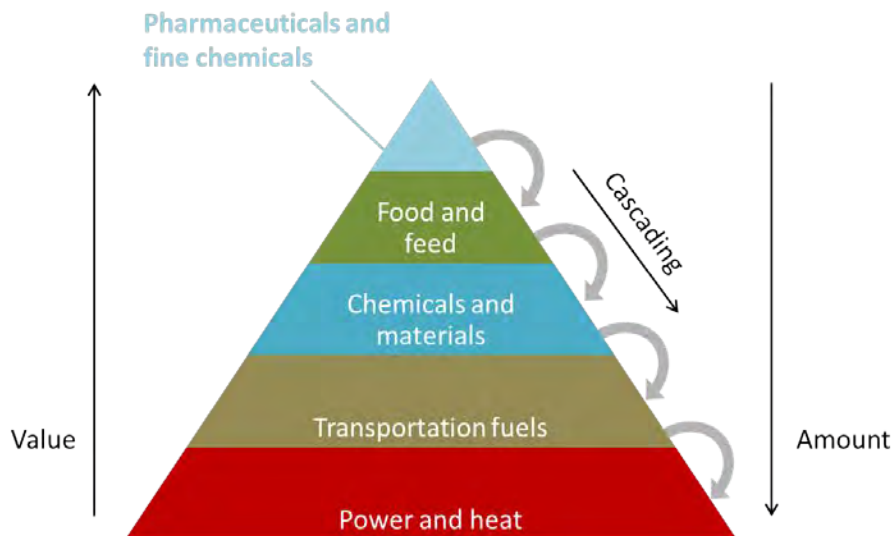


Abb. 38: Nutzungskaskade der Biomassefraktionen (nach EUROPEAN COMMISSION 2012 & 2013)

Zur Ermittlung des Ertragspotenzials aus Reststoffen, wurde die Studie „Energieziel 2050“ (UBA 2010) zugrunde gelegt. Die dort genannten Reststoffpotenziale wurden auf ihre Naturverträglichkeit überprüft und in Teilen übernommen (vgl. Tab. 18). Dies sind Rest- und Abfallstoffe aus der forstwirtschaftlichen Holznutzung oder solche, die im Zuge oder nach der stofflichen Nutzung anfallen sowie Industrie- und Altholz oder Holz im Hausmüll. Aus Naturschutzsicht unbedenklich sind darüber hinaus die Fraktionen Klärschlamm und Klärgas, sowie Abfälle aus Gewerbe, Industrie und Siedlungen.

Tab. 18: Aus Sicht des Naturschutzes unbedenkliche Reststoffe zur energetischen Nutzung (Potenziale nach UBA 2010)

Reststoff	Energieertragspotenzial	Energetische Nutzung
Abfälle aus Gewerbe, Industrie und Siedlung		
Abfälle aus Gewerbe und Industrie (Biogas)	2 TWh/a	Unbedenklich
Organische Siedlungsabfälle (Biogas)	6 TWh/a	
Reststoffe aus Holznutzung		
Holz im Hausmüll (Feststoffe)	6TWh/a	Unbedenklich
Industrieholz (Feststoff)	15 TWh/a	
Altholz (Feststoff)	19 TWh/a	
Klärschlamm und Klärgas	12 TWh/a	Unbedenklich

Während die oben genannten Reststoffe ohne Bedenken verwendet werden können, gibt Tab. 19 die Reststoffe an, bei denen eine relevante Umweltwirkung erwartet wird, wie z. B. tierische Exkremente und Einstreu. Eine relevante Umweltwirkung gilt beispielsweise auch für Reststoffe aus der Biotoppflege. Durch eine energetische Nutzung könnten Biotope besser/häufiger gepflegt werden und so der Wert für den Naturschutz erhalten bleiben. Eine übermäßige Entnahme muss dabei aber vermieden werden. Ernterückstände aus der Landwirtschaft sollten ebenfalls nur eingeschränkt entnommen werden (vgl. IFEU 2008, MALLAST et al. 2015, BLUME et al 2010). Es handelt sich um Pflanzenteile, welche nach der Ernte auf

dem Feld oder im Boden verbleiben und eine wichtige Nahrungsressource für viele Tierarten bilden, den Wasser- und Lufthaushalt sowie die Humusversorgung des Bodens verbessern und zur Vermeidung der Bodenerosion beitragen. Die Wirkung der Ernterückstände hängt stark von ihrer Zusammensetzung ab.

Eine Nutzung dieser Fraktionen ist nur mit Auflagen naturverträglich möglich. Darüber hinaus wird angenommen, dass sie im Jahr 2050 anderweitig stofflich genutzt werden und für die energetische Nutzung aufgrund von Bedarfen anderer Industriezweige im post-fossilen Zeitalter gar nicht mehr für die Energieproduktion zur Verfügung stehen bzw. zu teuer sind. Sie werden daher bei den Ertragsberechnungen nicht berücksichtigt.

Tab. 19: Mit naturschutzfachlichen Auflagen nutzbare Reststoffe (Potenziale nach UBA 2010)

Reststoff	Energieertrags-potenzial	Energetische Nutzung
Reststoffe aus Biotoppflege		
Grünschnitt: Kompensationsflächen (Feststoff)	2 TWh/a	mit Auflagen
Biotopverbund-Acker (Feststoff)	5 TWh/a	
Extensives Grünland (Feststoff)	8 TWh/a	
Ernterückstände aus der Landwirtschaft		
Stroh (Feststoff)	15 TWh/a	mit Auflagen
Ernterückstände der Landwirtschaft (Biogas)	2 TWh/a	
Tierische Exkremente und Einstreu (Biogas)	24 TWh/a	mit Auflagen

Werden die in UBA 2010 angegebenen und als unbedenklich eingestufteten Energieertragswerte für unterschiedliche Reststoffe zu Grunde gelegt, ergibt sich ein Gesamtertragspotenzial durch die biogenen Reststoffe von 60 TWh/a (vgl. Tab. 18). Dieses allein reicht nicht zur Deckung des nichtelektrischen Energiebedarfs von 315 TWh/a, es entstünde ein bilanzielles Defizit von 255 TWh/a nichtelektrischer Energie. Es muss also ein zusätzlicher Strombedarf kalkuliert werden, um Brennstoffe durch Power-to-X-Verfahren zu erzeugen. Power-to-X umfasst viele unterschiedliche Umwandlungsverfahren, die jeweils mit Energieverlusten verbunden sind. In der vorliegenden Studie wurden pauschal Umwandlungsverluste von 50 % für die Produktion von Brennstoffen aus Strom angenommen. Dadurch liegt der zusätzliche Strombedarf für die bilanzielle Deckung des Defizits (255 TWh/a nichtelektrische Energie) bei 510 TWh/a.

7.7 Annahmen zum Netzausbau

Die Auswirkungen der EE-Erzeugung und Verbräuche in den drei Szenarien auf die Netzdimensionierung der Verteilnetzebene werden exemplarisch und vereinfacht anhand eines Beispielnetzes dargestellt. Bei dem betrachteten Netzgebiet handelt es sich um den Versorgungsbereich einer Ortsnetzstation in Niedersachsen. Die Ortsnetzstation hat eine Nennleistung von 250 kVA und versorgt 76 Haushalte. Es wird entsprechend der Energiebedarfsprojektion eine vollständige Durchdringung des Netzes mit Wärmepumpen und mit Elektrofahrzeugen (Ausstattung mit 98 Fahrzeugen) angenommen und simuliert und im Anschluss zum Gesamtlastgang überlagert.

Im Winter wird aufgrund der kalten Winterwoche bei den Wärmepumpen oder der elektrischen Gebäudebeheizung ein im Vergleich zur Netzdimensionierung sehr hoher, durchgehender Leistungsbedarf zugrunde gelegt. Eine weitere Kombination mit Wärmespeichern

und eine Optimierung der Heizungssteuerung kann gewisse Leistungsspitzen reduzieren, allerdings muss dabei berücksichtigt werden, dass kalte Perioden auch für einen längeren und einen kälteren als in Abb. 39 dargestellten Zeitraum anstehen können (siehe DIN EN 12831) und dass für diesen Zeitraum ausreichend Leistung für die Haushalte bereitgestellt werden muss. Im Sommer hingegen muss nur der Warmwasserbedarf gedeckt werden, wobei in dem Beispiel der elektrischen Deckung von einer Kombination aus PV-Anlage und Wärmepumpe ausgegangen wird.

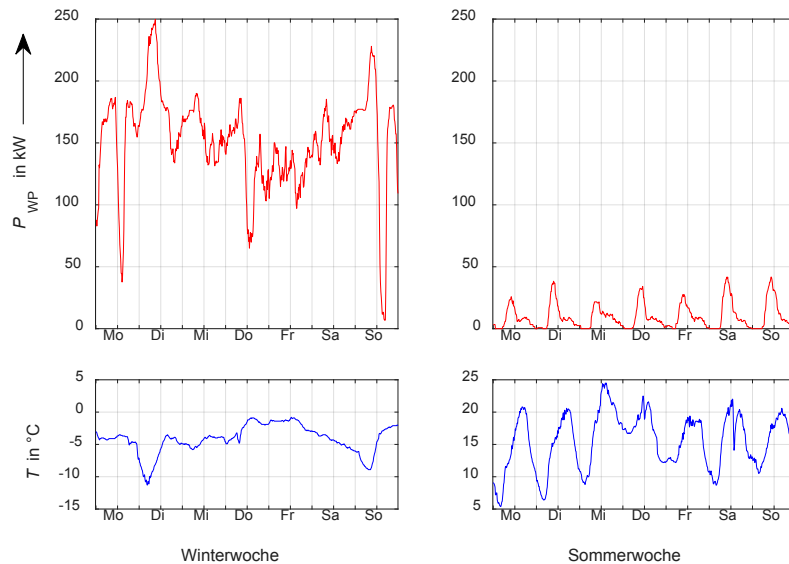


Abb. 39: Darstellung des ungesteuerten Lastgangs der elektrischen Wärmebereitstellung durch Wärmepumpen in den 76 Haushalten für eine Winter- und eine Sommerwoche

Abb. 40 zeigt den Lastgang, der durch eine Ausstattung der Haushalte mit 98 Elektrofahrzeugen entsteht. Die Simulation basiert auf der Überlagerung von Messdaten aus zwei unterschiedlichen Forschungsprojekten (E-HOME 2020 und SCHAUFENSTER-PROGRAMM ELEKTROMOBILITÄT O.J.). Die durchschnittliche tägliche Fahrleistung der Fahrzeuge beträgt 43 km, so dass ein Nachladen bei einer durchschnittlichen Akkureichweite von etwa 160 km nicht jeden Tag erforderlich ist.

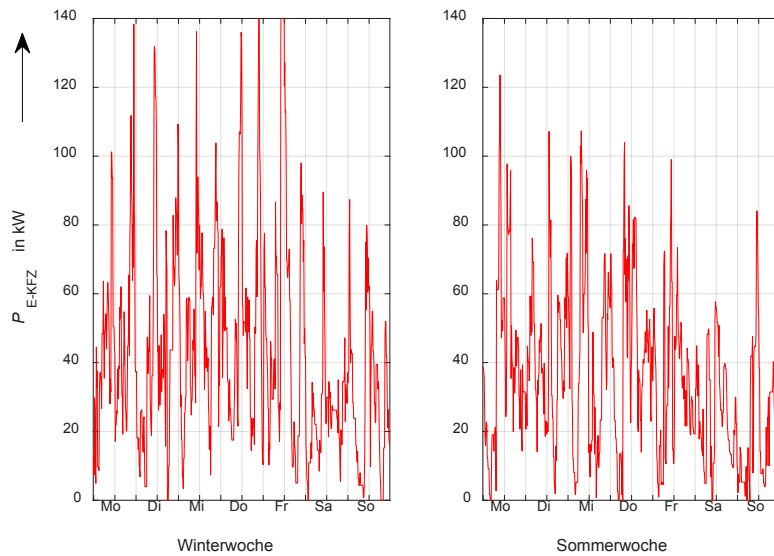


Abb. 40: Darstellung des ungesteuerten Lastgangs für die vollständige Ausstattung der Haushalte mit Elektrofahrzeugen

Die Ergebnisse der umfassenden Ortsnetzbetrachtung werden zunächst an einem exemplarischen Ort aus dem Versorgungsbereich dargestellt. Anschließend werden die Ergebnisse eines größeren Versorgungsgebietes hinzugezogen. Dieses umfasst eine Fläche von 287 km² und besteht aus 203 Ortsnetzstationen, über die die angeschlossenen Niederspannungsnetze versorgt werden. Neben diesen Ortsnetzstationen bestehen 71 weitere Stationen, über die Gewerbebetriebe, Biogasanlagen und Windkraftanlagen mit dem Netz verbunden werden. Ferner sind in dem Netzgebiet etwa 420 km Niederspannungsleitungen und 266 km Mittelspannungsleitungen vorhanden. Das exemplarische Netzgebiet umfasst 8.496 Hausanschlüsse, die von 191 Ortsnetzstationen versorgt werden. An das MS-Netz sind außerdem 28 reine EEG-Einspeisestationen und 47 Kundenstationen angeschlossen.

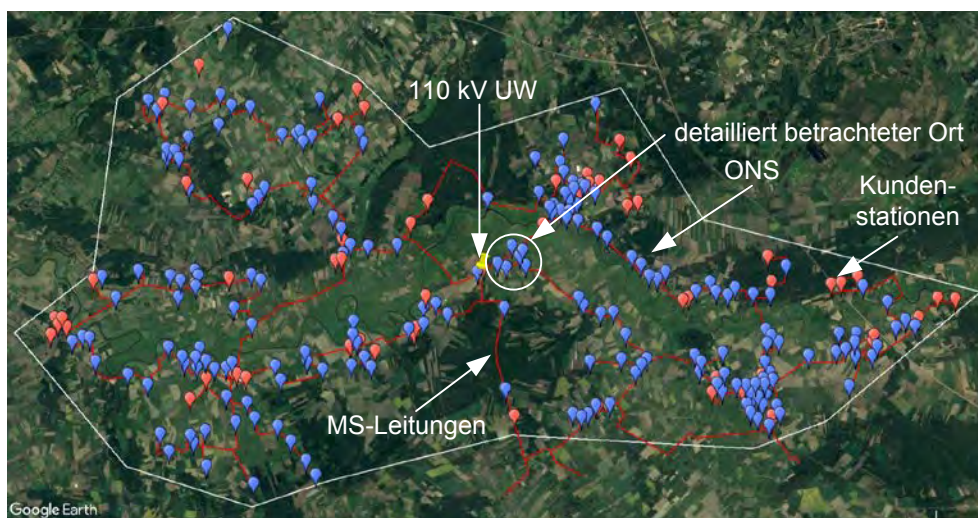


Abb. 41: Darstellung eines detailliert untersuchten Netzbereichs



Abb. 42: Darstellung des ländlichen Versorgungsgebietes einer Ortsnetzstation

C – ERGEBNISSE: SZENARIEN ZU DEN MÖGLICHKEITEN EINER MENSCH- UND NATURVERTRÄGLICHEN ENERGIEVERSORGUNG IM JAHR 2050

8 Ergebnisse zum Energieertragspotenzial in den drei Szenarien

8.1 Szenario I: heutige Technologien und Standards zum Schutz von Mensch und Natur

Im ersten Szenario wurden heutige Technologien als Standard für das Jahr 2050 angenommen. Zum Schutz von Mensch, Natur und Landschaft findet eine optimale Anlagenverteilung unter Berücksichtigung heute bereits ausgewiesener Schutzgebiete und potenzieller Flächen für die Umsetzung von Naturschutzzieleen statt.

8.1.1 Stromertragspotenzial in Szenario I

Windenergie an Land

Durch die Modellierung unter den in Kap. 7 beschriebenen Annahmen ergeben sich in Szenario I insgesamt 276.234 km² Fläche mit einem sehr hohen Raumwiderstand gegenüber der Windenergieanlage aus Szenario I (vgl. Abb. 43). Dies macht 77 % der deutschen Landfläche aus. Hinzu kommen 20 % der Landfläche, die aufgrund eines hohen Raumwiderstandes nicht zum Bau von Windenergieanlagen genutzt werden und 2 %, auf denen die Windenergienutzung aufgrund eines mittleren Raumwiderstands ausgeschlossen wird.

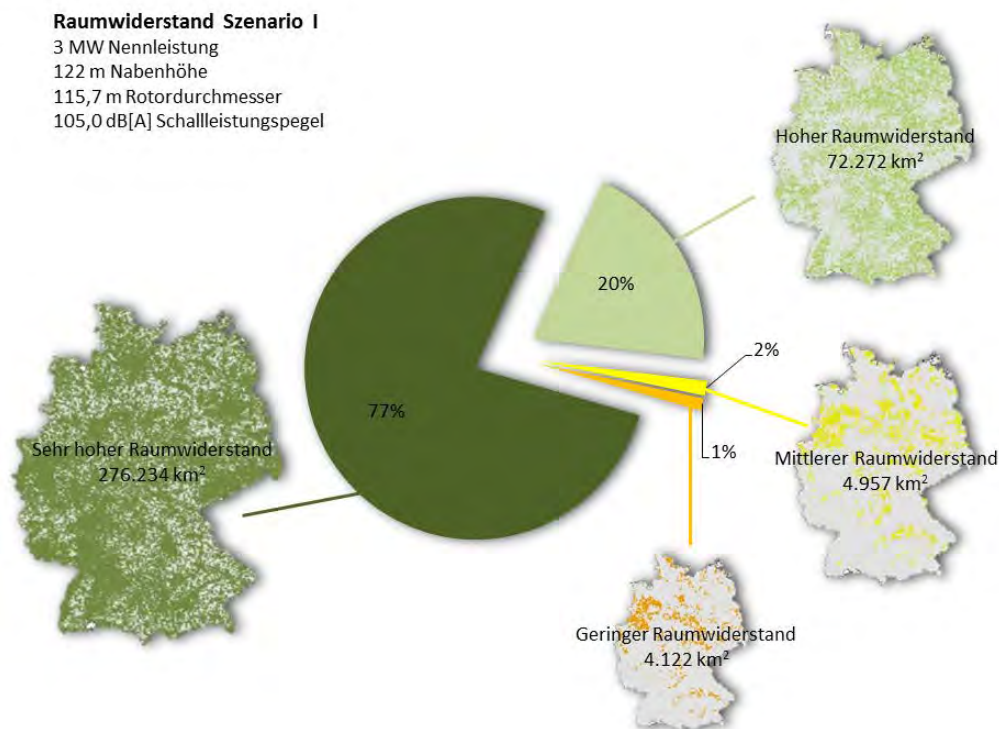


Abb. 43: Prozentuale Flächenanteile der einzelnen Raumwiderstandsklassen beim Einsatz der Windenergieanlage 2016 in Szenario I

Mit einem geringen Raumwiderstand bewertet und damit gut geeignet für die Installation von Windenergieanlagen sind rund 4.122 km², 0,1 % der deutschen Landfläche. Hier könnten mit 19.461 Anlagen potenziell rund 186 TWh/a Strom produziert werden (vgl. Abb. 44).

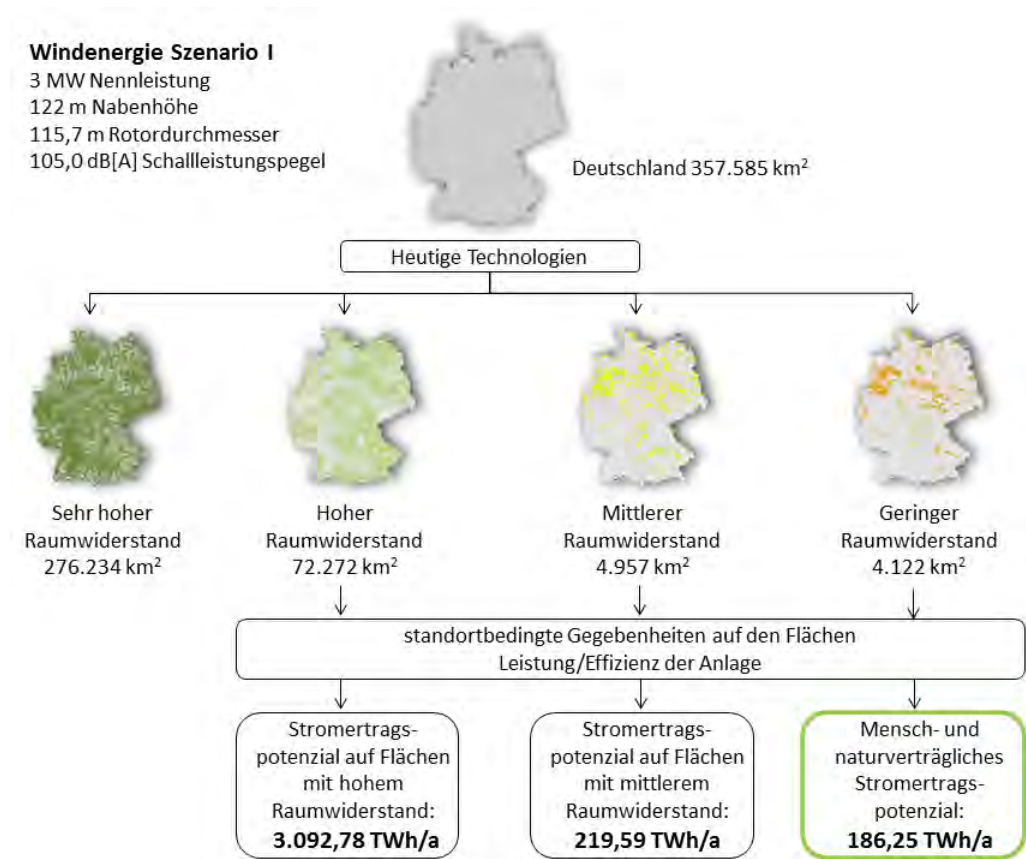


Abb. 44: Stromertragspotenziale der Flächen verschiedener Raumwiderstandsklassen beim Einsatz der Windenergieanlage 2016 aus Szenario I

Photovoltaik im Innenbereich

Aufgrund der Annahmen zum Dachflächenpotenzial ergibt sich ein Stromertragspotenzial von 406 TWh/a auf Dächern. Hinzu kommt das Stromertragspotenzial an Fassaden und auf sonstigen versiegelten Flächen. Bei dem in der UBA-Studie angenommenen Wirkungsgrad von 17 % ergibt sich ein Ertragspotenzial von 23 TWh/a an Fassaden sowie 102,5 TWh/a auf sonstigen versiegelten Flächen. Werden diese Ertragspotenziale dem Wirkungsgrad aus Szenario I von 20 % angepasst, entsteht ein Ertragspotenzial von 27 TWh/a an Fassaden und 120 TWh/a auf versiegelten Siedlungsflächen (vgl. Tab. 20). Insgesamt liegt die potenzielle Stromerzeugung von PV im Innenbereich bei 553 TWh/a.

Tab. 20: Stromertragspotenzial aus Photovoltaik im Innenbereich in Szenario I

Innerstädtischer Bereich	Fläche	Stromertragspotenzial
Dächer	1.950 km ²	406 TWh/a
Fassaden	150 km ²	27 TWh/a
versiegelte Siedlungsfläche	670 km ²	120 TWh/a

8.1.2 Strommix und Flächeninanspruchnahme in Szenario I

Strommix

Bei Berücksichtigung aller betrachteten Energieträger wurde für Szenario I ein potenzieller Stromertrag von 1.023 TWh/a berechnet, mit einem Anteil an Photovoltaikstrom von 54 % (553 TWh/a) (vgl. Abb. 45, Tab. 21).

Tab. 21: Stromertragspotenzial der einzelnen Energieträger und Strommix in Szenario I

Energieträger	Stromertragspotenzial	Prozentualer Anteil am Strommix
PV im Innenbereich	553 TWh/a	54 %
Windenergie an Land: bestehende Anlagen	142 TWh/a	14 %
Windenergie an Land: mensch- und naturverträgliche Stromertragspotenzial	186 TWh/a	18 %
Windenergie auf See	68 TWh/a	7 %
Geothermie	50 TWh/a	5 %
Wasserkraft	24 TWh/a	2 %

Der mensch- und naturverträgliche Strom aus Windenergieanlagen macht mit rund 186 TWh/a 18 % des Strommixes aus, hinzu kommen ein Anteil von 14 % Strom aus bereits bestehenden Anlagen (142 TWh/a) sowie die Offshorepotenziale mit einem Anteil von 7 % (67 TWh/a).

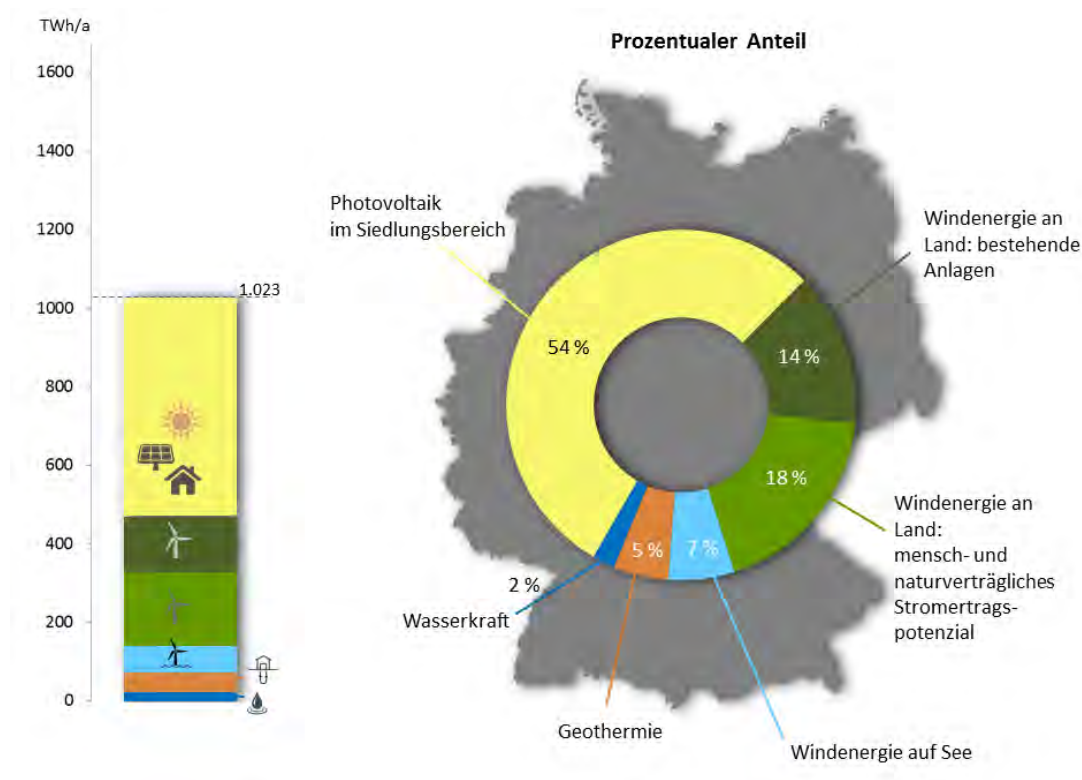


Abb. 45: Stromertragspotenzial und Strommix in Szenario I

Bilanzierung

Der potenzielle Stromertrag aus Szenario I würde nicht ausreichen, den Strombedarf von 1.138 TWh/a bei einer ambitionierten Energiebedarfsentwicklung zu decken, da ein bilanzielles Defizit von -115 TWh/a entstehen würde. Wird hingegen die sehr ambitionierte Energiebedarfsentwicklung mit einem Strombedarf von 818 TWh/a erreicht, käme es zu einem Stromüberschuss von 205 TWh/a (vgl. Abb. 46).

Wird zusätzlich der Speicherbedarf und die damit verbundenen Umwandlungsverluste in die Bilanzierung einbezogen, erhöht sich der projizierte Strombedarf auf 1.707 TWh/a (ambitioniert) bzw. 1.227 TWh/a (sehr ambitioniert, vgl. Kap. 2.8). Das Stromertragspotenzial würde dann zur Deckung des Bedarfs in beiden Fällen nicht mehr ausreichen. Bei einer ambitionierten Strombedarfsentwicklung entstünde ein Defizit von 684 TWh/a, während beim Erreichen der sehr ambitionierten Strombedarfsentwicklung mit einem Defizit von 204 TWh zu rechnen ist (vgl. Abb. 46).

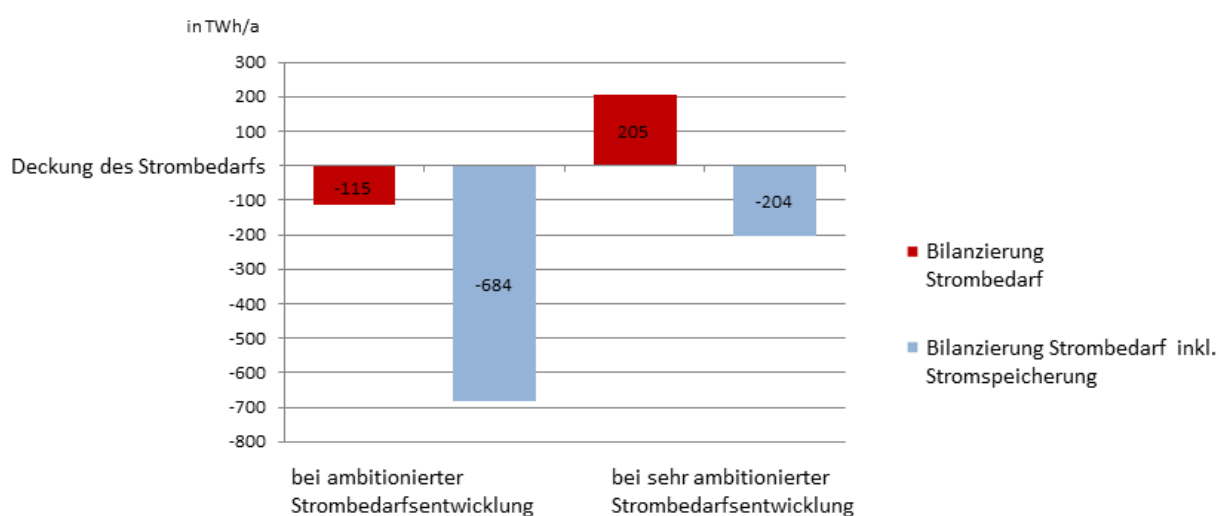


Abb. 46: Bilanzierung von potenziellem Stromertrag und Strombedarf in Szenario I

Flächeninanspruchnahme

Insgesamt werden für den Ausbau erneuerbarer Energien in Szenario I 6.892 km² Fläche genutzt, zzgl. der Fläche bestehender Windenergieanlagen und für Wasserkraft sowie Geothermie. Davon dienen mit 2.770 km² rund 10 % der Siedlungs- und Verkehrsfläche dem Ausbau von Photovoltaik. Die restlichen 4.122 km² werden im Außenbereich für den Bau von Windenergieanlagen genutzt. Landwirtschaftliche Nutzfläche wird dabei im Umfang von rund 3.850 km² belegt, was einem Anteil von unter 2 % entspricht. Zudem würden 0,14 % der Waldfläche Deutschlands sowie 0,69 % sonstige Fläche benötigt (vgl. Abb. 47). Bei den Angaben handelt es sich um die Fläche des Windparks, nicht um die tatsächlich durch Windenergieanlagen versiegelte Fläche.

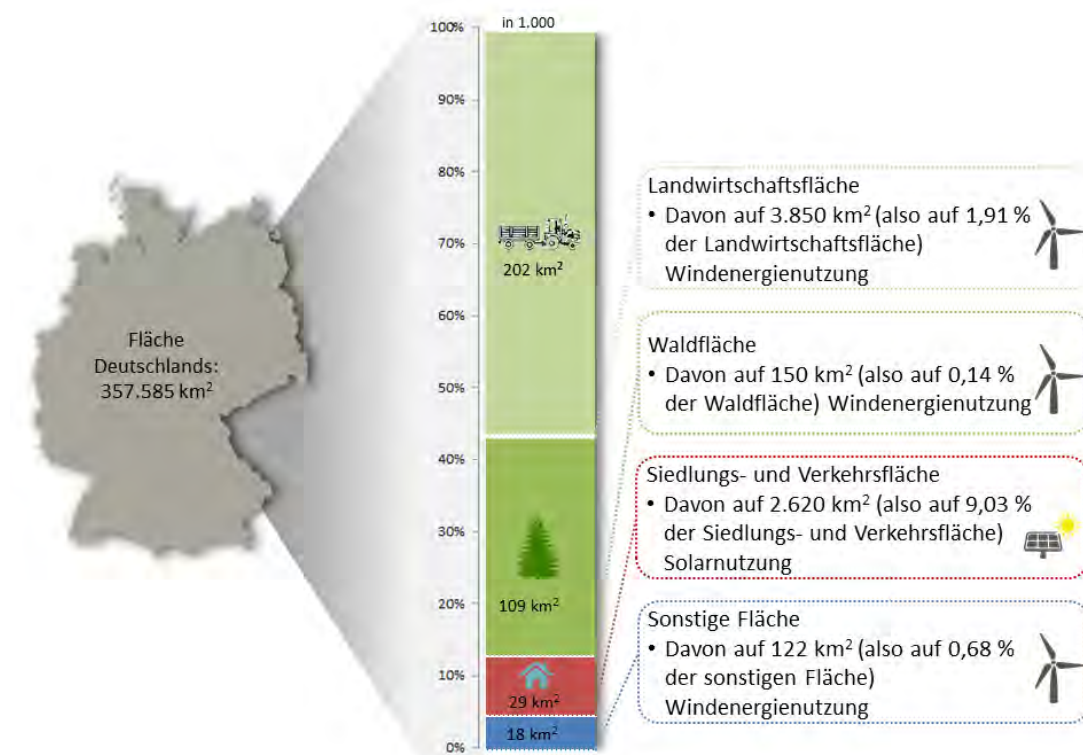


Abb. 47: Bestehende Flächennutzung und potenzielle Flächeninanspruchnahme zur Stromerzeugung durch Windenergie an Land und Photovoltaik im Innenbereich in Szenario I

8.1.3 Konsequenzen der Stromertragspotenziale aus Szenario I für den Netzausbau

Die naturverträgliche Allokation der Windkraft- und Solaranlagen sowie die zunehmende Elektrifizierung des Energiebedarfs führen zu einem steigenden Energietransportbedarf, der mit den heute existierenden Netzen nur bedingt bewältigt werden kann. Im Folgenden wird exemplarisch auf die Analysen der einzelnen Netzebenen eingegangen.

Übertragungsnetz

Die räumliche Verteilung der Flächen mit geringem Raumwiderstand bzw. der für PV nutzbaren Dachflächen zeigt, dass rund 46 GW installierte Windleistung und 46 GW Photovoltaikstrom in Szenario I nördlich der bestehenden Engpassstelle produziert würden. Die bestehenden Netzentwicklungspläne gehen für diese Entwicklung noch nicht weit genug und weitere Erhöhungen der Kraftwerkskapazitäten werden in Zukunft notwendig sein, wie sie bereits im Netzentwicklungsplan 2030 anhand weiterer HGÜ-Korridore angedeutet sind (vgl. Abb. 48).

Eine weitere vergleichbare Engstelle befindet sich auf der Höhe von Frankfurt am Main/Nord-Bayern, daher enden die geplanten HGÜ-Korridore auch kurz hinter dieser Stelle.

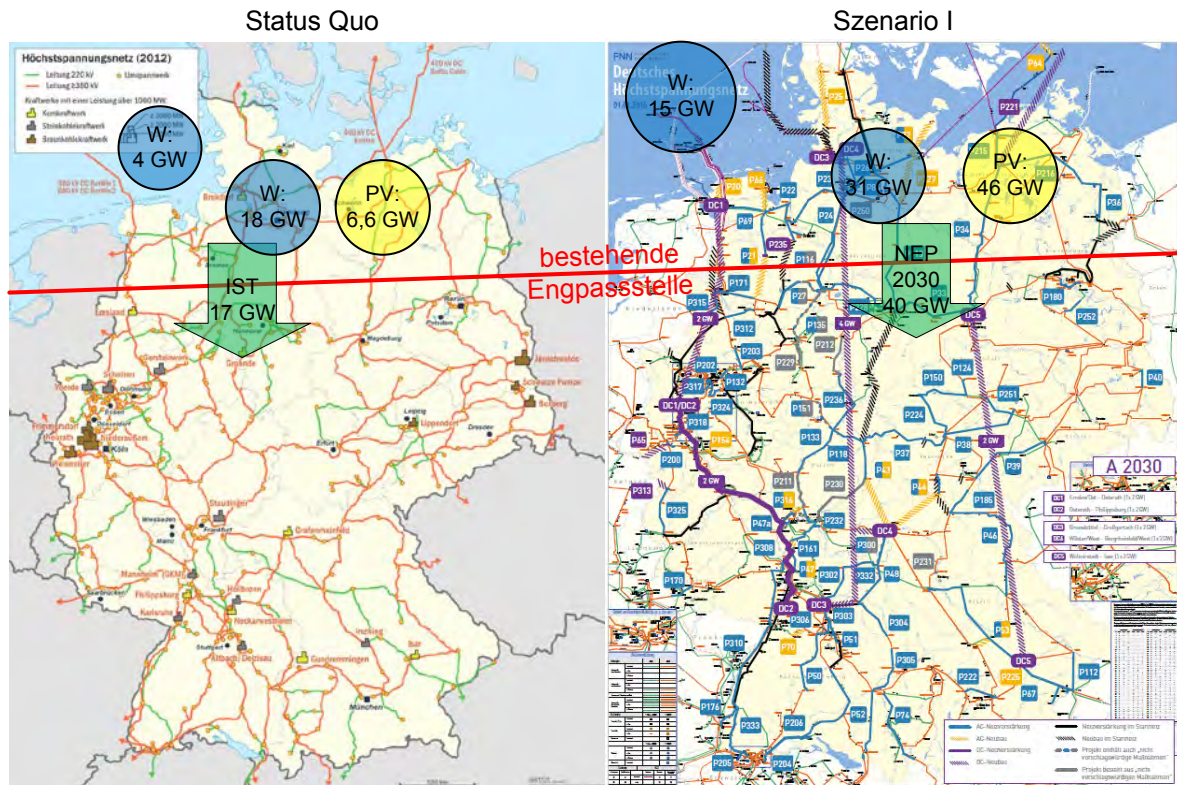


Abb. 48: Vereinfachte Darstellung der Netzverstärkungsmaßnahmen Nord-Süd in Norddeutschland (Quellen: links: ALEXRK2 (OpenStreetMap Data); rechts: NETZENTWICKLUNGSPLAN 2030)

Exemplarische Überlagerung der Zukunftstechnologien

Abb. 49 zeigt den simulierten Leistungsbedarf der Haushalte für eine Sommer- und eine Winterwoche für die übliche Haushaltslast und den Ertrag der Aufdach-PV-Anlagen. Die in Szenario I vorgesehene durchschnittliche PV-Anlagengröße in dem Wohngebiet beträgt 9,64 kW_p. Durch die Inanspruchnahme der jeweils gesamten Dachflächen liegen diese Werte über den Werten, die heute typischerweise in Wohngebieten zu finden sind. Die dargestellten exemplarischen Wochen wurden aus dem Jahresverlauf ausgewählt, weil es in der Winterwoche besonders kalt ist und in der Sommerwoche sehr gutes Wetter für hohe PV-Erträge herrscht. Da es sich bei dem PV-Ertrag um eine Einspeisung handelt, wird diese mit einem negativem Vorzeichen belegt, sodass eine einfache Addition der Graphen möglich wird.

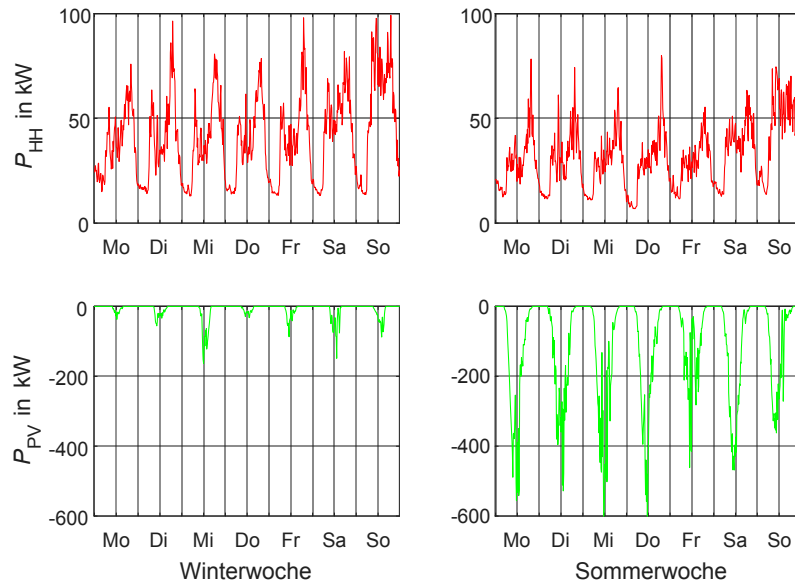


Abb. 49: Darstellung des Haushaltslastgangs (ohne E-Mobilität und Wärmepumpen, oben) und die in Szenario I angenommene PV-Anlagenleistung (unten) einer Winter- und eine Sommerwoche in Szenario I

Die Überlagerung aller zusätzlichen Lasten und der PV-Produktion zum resultierenden Lastgang wird in Abb. 50 dargestellt. Es zeigt sich, dass sich das Bezugsmaximum im ungesteuerten Fall von 120 kW auf fast 400 kW mehr als verdreifacht, wobei im Sommer mit Rückspeisespitzen von 500 kW in Szenario I zu rechnen ist. Durch den Einsatz von netzdienlichen Batteriespeichern ist es möglich, die Bezugsleistung auf etwa 220 kW zu drosseln. Diese Leistung liegt allerdings immer noch bei der nahezu doppelten zu erwartenden Leistung, die heute in Hinblick auf die Haushalte vorliegt.

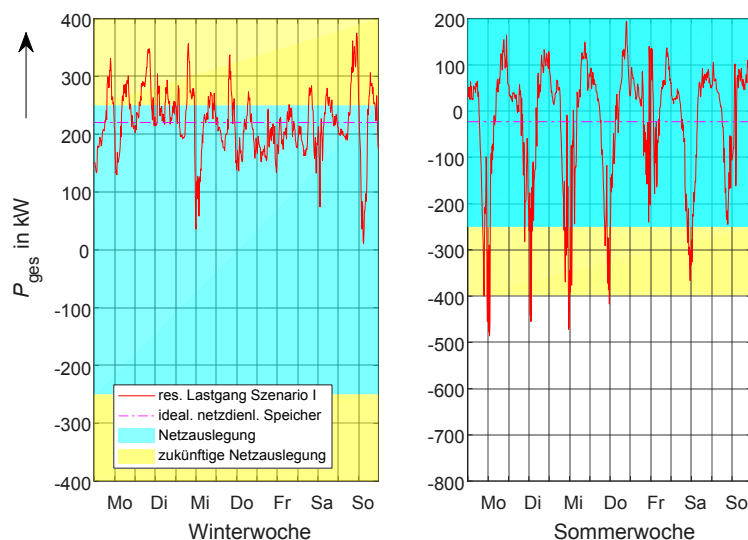


Abb. 50: Überlagerung zum Gesamtlastgang (Haushalt + Wärmepumpe + Photovoltaik) sowie idealer Tag/Nacht-Ausgleich durch Batteriespeicher und Darstellung des zukünftigen Netzdimensionierungsbereichs

Exemplarische Abschätzung der notwendigen Übertragungsleistung

Die notwendige Übertragungsleistung des Verteilnetzes, hier mit Fokus auf die NS-Ebene, wird durch die Anforderungen des resultierenden Lastgangs, d.h. durch die Photovoltaik-Einspeisung, die Nachfrage der Haushalte und Gewerbebetriebe sowie die zukünftig mögliche Ausgleichsfunktion der Batteriespeicher bestimmt.

Abb. 51 zeigt eine vereinfacht dargestellte Übersicht über die notwendige Batteriespeicherkapazität, den Netzausbauaufwand sowie die alternativ abgeregelte PV-Energie anhand der exemplarischen Ortsnetzstation aus Abb. 41 im ländlichen Raum. Als mögliches maximales PV-Potenzial wird das Ergebnis von Szenario I zugrunde gelegt.

Es wird dabei vorausgesetzt, dass die Last der Haushalte auch ohne Speichereinsatz befriedigt werden muss, so dass eine Mindestauslegung des Netzes auf 400 kVA Übertragungsleistung bezugsseitig erfolgt. Aufgrund der heterogenen Dachausrichtung kann davon ausgegangen werden, dass die maximal eingespeiste Leistung 85 % der installierten Nennleistung nicht überschreitet. Durch die gesteigerte verbleibende Last der Haushalte reduziert sich weiterhin die Leistung, die an das überlagerte Netz abgegeben wird, so dass bei einer Dimensionierung der Übertragungsleistung in das Mittelspannungsnetz auf 60 % der installierten PV-Leistung nahezu die vollständige PV-Energie ohne Speichereinsatz abtransportiert werden kann. Es zeigt sich, dass das zur Deckung der lokalen Lastspitze notwendige NS-Netz in der Lage ist, etwa 98 % der überschüssig in dem Netzgebiet erzeugten Energie abzuführen.

Die Kosten des NS-Netzes zur Integration der weiteren Rückspeiseleistungen über einen Betrachtungszeitraum von 35 Jahren steigen in erster Näherung linear in Abhängigkeit zur auslegungsrelevanten Übertragungsleistung an. Alternativ zum Netzausbau ist der Einsatz von netzdienlichen Speichern möglich. Der rote Verlauf zeigt hierzu die notwendige Speicherkapazität, bezogen auf die installierte PV-Anlagenleistung.

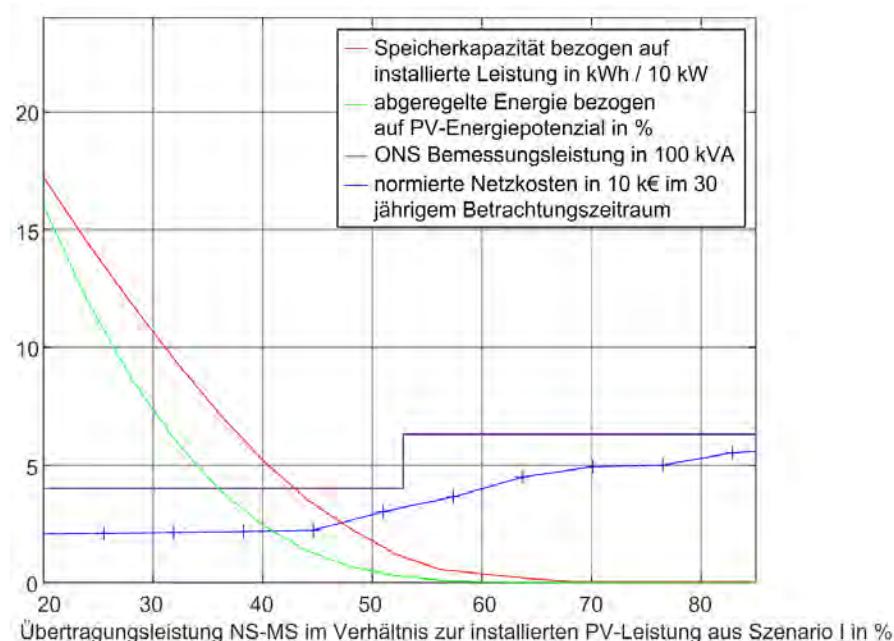


Abb. 51: Grafik der Netzausbau- und Betriebskosten, der notwendigen Speicherkapazität und abgeregelten Energie in Abhängigkeit zur installierten PV-Leistung in dem Wohngebiet aus Abb. 41.

Netzausbaumaßnahmen in den Ortsnetzen

Der in Abb. 52 a dargestellte Beispiellort umfasst 428 Hausanschlüsse und wird über sechs Ortsnetzstationen an das überlagerte MS-Netz angeschlossen. Die Punkte in der Grafik stellen die einzelnen Hausanschlüsse dar, wobei die farbliche Kennzeichnung die Stationszugehörigkeit darstellt. Die schwarzen Sterne mit Nennleistungsangabe beschreiben die vorhandenen Ortsnetzstationen. Die NS-Netze werden als Strahlennetze betrieben, wobei Unterbrechungen in den Leitungsverläufen die ermittelten Trennstellen darstellen. Die ermittelte Gesamtkabellänge im NS-Netz beträgt 14,26 km, wobei in Stationsnähe Verstärkungsleitungen notwendig sind, die schwarz dargestellt sind. Die Hausanschlussleitungen werden bei der Gesamtlänge nicht berücksichtigt.

Die notwendigen Netzausbaumaßnahmen zur vollständigen Integration des Szenarios I sind in Abb. 52 b dargestellt und die Kennzahlen in Tab. 22 angegeben. Zur Realisierung des Zukunftsszenarios sind in diesem beispielhaften Ortsnetz zwei weitere Ortsnetzstationen in der Ortsmitte erforderlich, der Leitungszubau konnte durch die optimierte Betrachtung auf 18,38 % des Leitungsbestandes reduziert werden.

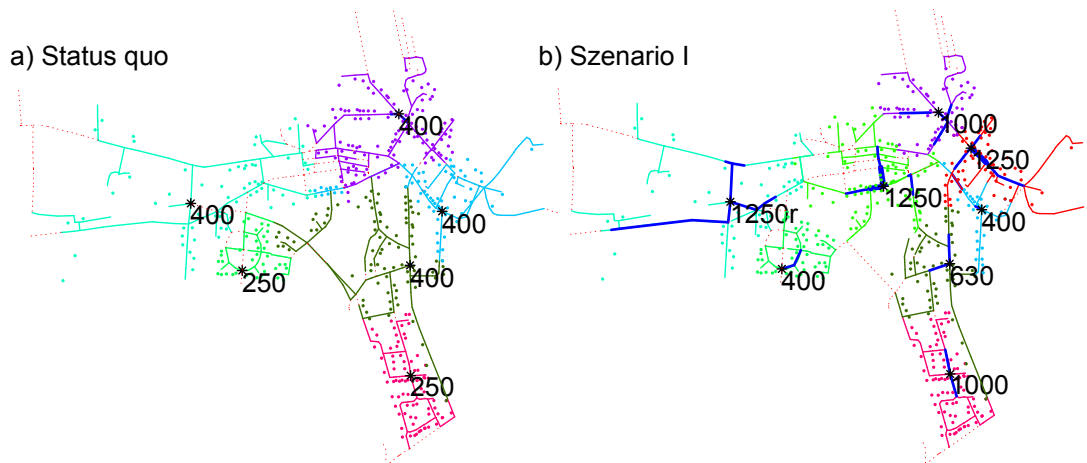


Abb. 52: Status Quo und Optimierungsergebnis für einen Beispiellort für das Szenario I

Die Kernergebnisse für das gesamte Versorgungsgebiet sind ebenfalls zusammengefasst in Tab. 22 angegeben. Zur Deckung der zukünftigen Last- und Einspeiseannahmen aus den Energieszenarien muss die Anzahl der Ortsnetzstationen um etwa 31 % erhöht werden. Der Leitungsbestand muss dafür in Bezug auf das Gesamtnetz um etwa 16 % erhöht werden. Im NS-Netz kann der Netzausbau deutlich reduziert werden, wenn etwa ein Viertel der Ortsnetzstationen als intelligente, regelbare Stationen ausgeführt werden. Die installierte Leistung der Ortsnetzstationen verdreifacht sich im Vergleich zum Status quo.

Tab. 22: Ergebnis der Auswertung eines Versorgungsgebietes von 287 km²

Eigenschaft \ Variante		Ortsnetz		287 km ² Versorgungsgebiet	
		Status quo	Szenario II	Status quo	Szenario II
Netzausbau in %		0	18,38	0	16,08
Ortsnetzstationen	gesamt	6	8	203	296
	neue	0	2	0	114
	unverändert	0	1	0	50
	aufgelöst	0	0	0	21
rONT-Anteil in %		0	12,5	0	24,3
Ortsnetzstationen-Leistung in MVA		2,1	7,18	62,53	203,98
Spitzenleistungen in MVA		1,3	2,18	25,3	42,1
		– 0,2	– 6,35	– 7,9	– 167,3

8.1.4 Nichtelektrisches Energieertragspotenzial Szenario I

Neben dem Strombedarf muss auch der nichtelektrische Energiebedarf von 315 TWh/a mensch- und naturverträglich gedeckt werden. Hierfür stehen zunächst 60 TWh/a aus biogenen Reststoffen zur Verfügung (vgl. Kap. 7.6). Um die restlichen 255 TWh/a mensch- und naturverträglich über PtX bereitstellen zu können, müssten weitere 510 TWh/a Strom zur Verfügung stehen. In Szenario I entsteht auch bei Erreichen der sehr ambitionierten Strombedarfsentwicklung ein bilanzielles Defizit, da der Speicherbedarf bei einem Anteil von 100 % erneuerbaren Energien sehr hoch ist (vgl. Kap. 2.7). Der für das Jahr 2050 projizierte Endenergiebedarf kann mit den in Szenario I getroffenen Annahmen also nicht naturverträglich gedeckt werden und es müssen Reserven der Energieerzeugung genutzt werden (vgl. Kap. 8.5).

8.2 Szenario II: Absehbare Fortentwicklung heutiger Technologien

In Szenario II wurden heute absehbare Entwicklungen im Bereich der Bereitstellungstechnologien als zukünftiger Standard angenommen (vgl. Kap. 7.5.2). Die Flächen(anteile) mit unterschiedlichen Raumwiderständen wurden unter Berücksichtigung dieser technischen Veränderungen neu berechnet. Zudem wurden die Ziele des Naturschutzes, z. B. aus der Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt und zur Erweiterung des Schutzgebietsnetzes, als umgesetzt mit einbezogen.

8.2.1 Stromertragspotenzial in Szenario II

Windenergie an Land

Aufgrund der Unterschiede der Windenergieanlage 2050 zu der Windenergieanlage 2016 kommt es zu veränderten Auswirkungen auf Natur und Landschaft und zu einer Neubewertung der aus Mensch- und Naturschutzsicht geeigneten Flächen.

Die Annahme, dass die Naturschutzziele in 2050 umgesetzt sind, verändert ebenfalls die Raumwiderstandsklassen einzelner Flächenkategorien.

Durch das Zusammenführen und Verschneiden der Flächen der einzelnen Raumwiderstandsklassen und das Entfernen der Überlagerungen ergibt sich ein sehr hoher Raumwiderstand für eine Fläche von 317.856 km² (vgl. Abb. 53). Dies macht fast 89 % der Landfläche Deutschlands aus, während 10 % der Landflächen einen hohen und 0,60 % einen mittleren Raumwiderstand aufweisen.

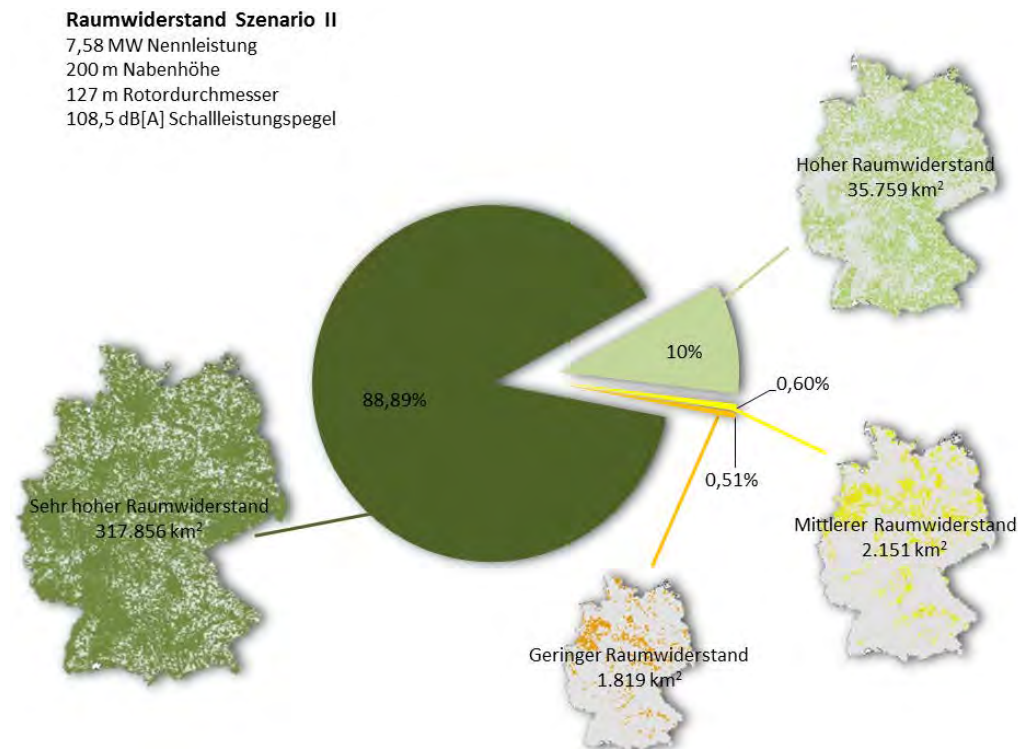


Abb. 53: Prozentuale Flächenanteile der einzelnen Raumwiderstandsklassen beim Einsatz der Windenergieanlage 2050 in Szenario II

Die für Windenergie nutzbare Fläche mit geringem Raumwiderstand verringert sich auf rund 1.819 km². Das auf dieser Fläche menschen- und naturverträglich erzeugbare Stromertragspotenzial, produziert durch 7.050 Anlagen, beträgt rund 122 TWh/a Strom (vgl. Abb. 54).

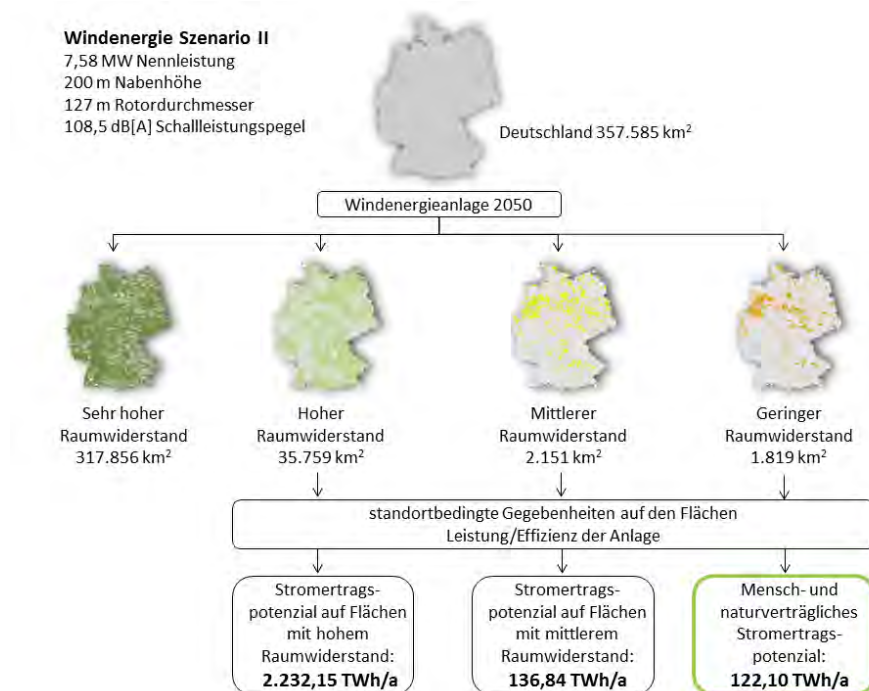


Abb. 54: Stromertragspotenziale der Flächen verschiedener Raumwiderstandsklassen beim Einsatz der Windenergieanlage 2050 aus Szenario II

Photovoltaik im Innenbereich

Durch die Zunahme des Flächenpotenzials sowie die Effizienzsteigerung der PV-Module (vgl. Kap. 7.5.3) steigt das Stromertragspotenzial auf Dachflächen auf 670 TWh/a, an Fassaden auf insgesamt 44 TWh/a und das der versiegelten Verkehrsflächen auf 198 TWh/a. Insgesamt ergibt sich dadurch ein Stromertragspotenzial durch PV von 912 TWh/a (vgl. Tab. 23).

Tab. 23: Stromertragspotenzial aus Photovoltaik im Innenbereich in Szenario II

Innerstädtischer Bereich	Fläche	Stromertragspotenzial
Dachflächenpotenzial	1.950 km ²	608 TWh/a
Dachflächenpotenzial durch Zubau	200 km ²	62 TWh/a
Potenzial an Fassaden inkl. Zubau	165 km ²	44 TWh/a
Potenzial auf versiegelter Verkehrsfläche inkl. Zubau	736 km ²	198 TWh/a

8.2.2 Strommix und Flächeninanspruchnahme in Szenario II

Strommix

Bei Berücksichtigung aller betrachteten Energieträger (vgl. Tab. 24, Abb. 55) ergibt sich in Szenario II ein potenzieller Stromertrag von insgesamt 1.363 TWh/a. Dabei erhöht sich der Anteil der Solarenergie im potenziellen Strommix aufgrund höherer Wirkungsgrade der Anlagen auf 67 % (vgl. Tab. 24, Abb. 55).

Tab. 24: Stromertragspotenzial der einzelnen Energieträger und Strommix in Szenario II

Energieträger	Stromertragspotenzial	Prozentualer Anteil am Strommix
PV im Innenbereich	912 TWh/a	67 %
Windenergie an Land: bestehende Anlagen	142 TWh/a	10 %
Windenergie an Land: mensh- und naturverträgliche Stromertragspotenzial	122 TWh/a	9 %
Windenergie auf See	113 TWh/a	8 %
Geothermie	50 TWh/a	4 %
Wasserkraft	24 TWh/a	2 %

Der mensh- und naturverträgliche Stromertrag aus Wind liegt bei 122 TWh (9 % des Gesamtstromertragspotenzials). Das Stromertragspotenzial aus bereits bestehenden Windenergieanlagen (vgl. Kap. 7.5.2) macht noch einen Anteil von 10 % aus und der Anteil der Windenergie auf See (113 TWh) steigt auf 8 % des Strommixes an.

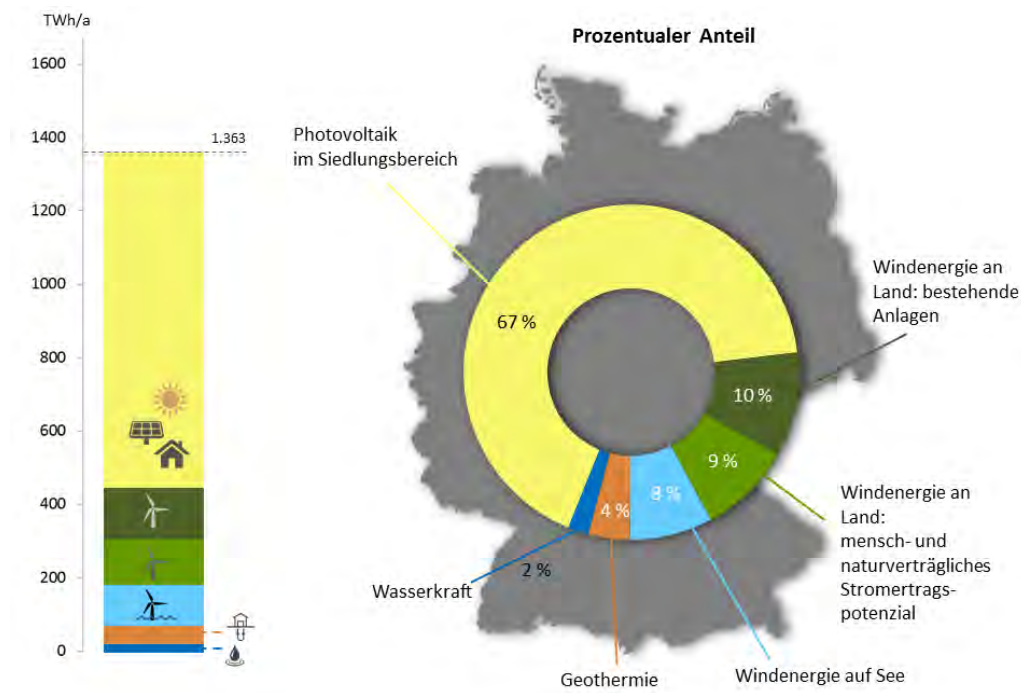


Abb. 55: Stromertragspotenzial und Strommix in Szenario II

Bilanzierung

Die Bilanzierung von Stromertragspotenzial und Strombedarf ergibt, dass bei einer ambitionierten Strombedarfsentwicklung ein bilanzieller Überschuss von 225 TWh/a entsteht, während bei einer sehr ambitionierten Strombedarfsentwicklung sogar ein bilanzieller Überschuss von 545 TWh/a möglich ist (vgl. Abb. 56).

Werden der Speicherbedarf und die speicherbedingten Umwandlungsverluste mit betrachtet, liegt das Stromertragspotenzial bei einer ambitionierten Bedarfsentwicklung 344 TWh/a unter dem Strombedarf (vgl. Abb. 56). Werden allerdings die sehr ambitionierten Strombedarfsentwicklungsziele erreicht, kann der projizierte Strombedarf auch bei einer Stromspeicherung von 50 % gedeckt werden mit einem bilanziellen Überschuss von 136 TWh/a.

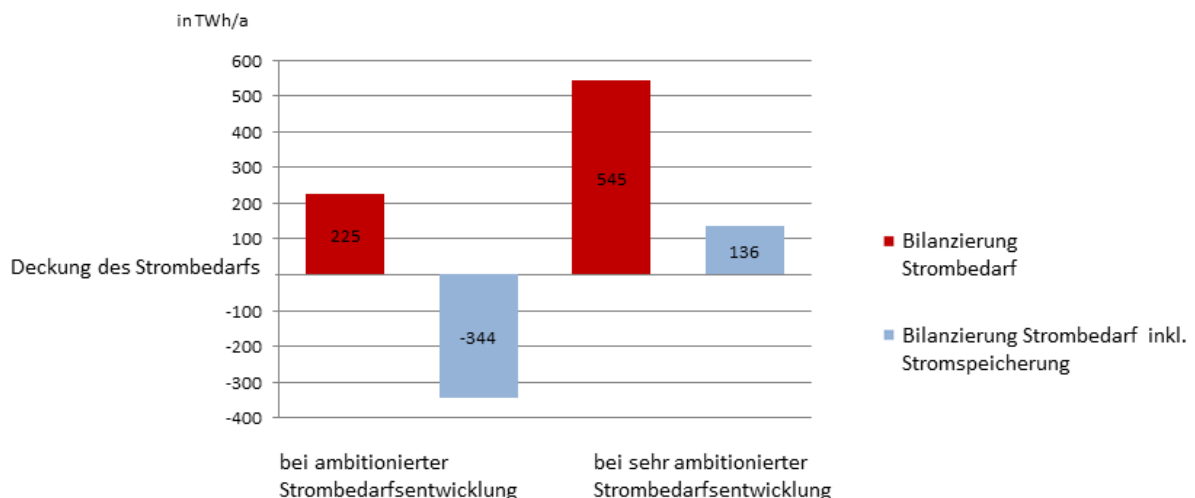


Abb. 56: Bilanzierung von potenziellem Stromertrag und Strombedarf in Szenario II

Flächeninanspruchnahme

Um das in Szenario II errechnete Stromertragspotenzial nutzen zu können, müssten 4.864 km² Fläche für den Ausbau erneuerbarer Energien verwendet werden (zzgl. der Fläche bereits bestehender Windenergieanlagen sowie Geothermie und Wasserkraft). Dabei werden mit 2.886 km² rund 10 % der Siedlungsfläche durch Photovoltaik in Anspruch genommen. Im Außenbereich würden 1.819 km² mit Windenergieanlagen belegt, wobei von der landwirtschaftlichen Nutzfläche Deutschlands 0,84 %, von der Waldfläche nur 0,07 % genutzt würden (vgl. Abb. 57). Wie in Szenario I handelt es sich bei der in Anspruch genommenen Fläche um die Gesamtfläche des Windparks und nicht um die durch einzelne Windenergieanlagen versiegelte Fläche. Eine landwirtschaftliche Flächenbewirtschaftung wäre also zwischen den Anlagen weiterhin möglich.

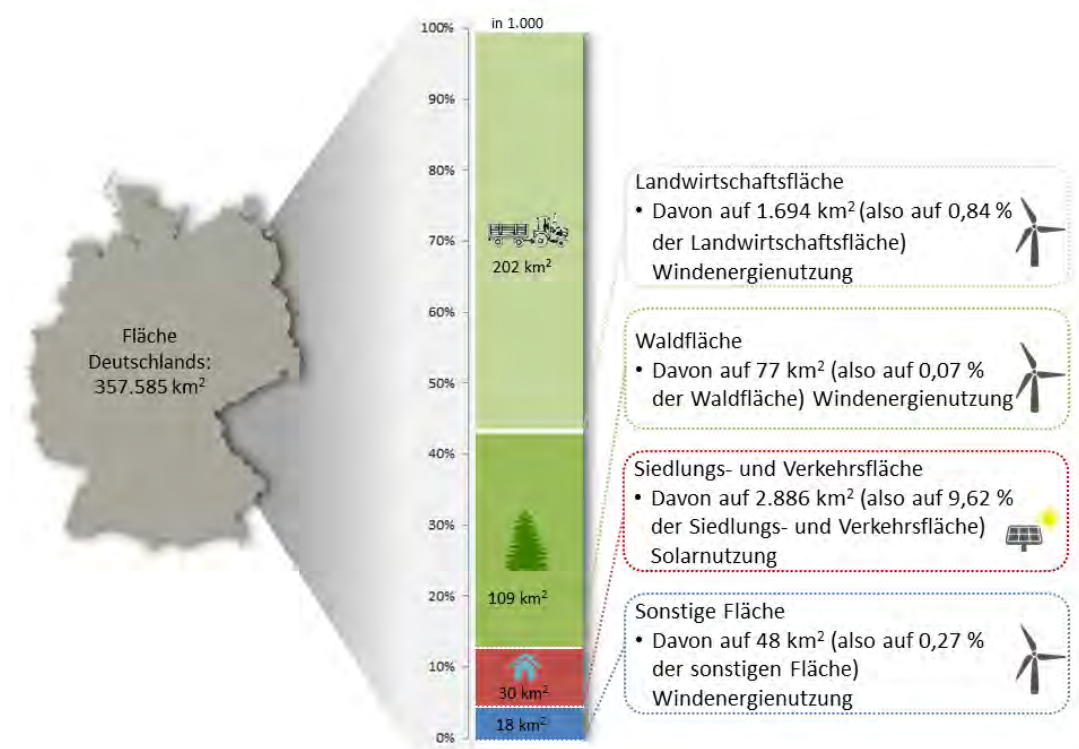


Abb. 57: Bestehende Flächennutzung und potenzielle Flächeninanspruchnahme zur Stromerzeugung durch Windenergie an Land und Photovoltaik im Innenbereich in Szenario II

8.2.3 Netzausbau bei fortentwickelter Technologie in Szenario II

Die naturverträgliche Allokation der Windkraft- und Solaranlagen bei fortentwickelter Technologie führt im Vergleich zu Szenario I zu einem weiteren steigenden Energietransportbedarf, der mit den heute existierenden Netzen nur bedingt bewältigt werden. Im Folgenden wird exemplarisch auf die Analysen der einzelnen Netzebenen eingegangen.

Übertragungsnetz

Abb. 58 zeigt analog zu Abb. 48 den Status quo des deutschen Übertragungsnetzes sowie die im Netzentwicklungsplan 2017 vorgesehenen Netzausbaumaßnahmen.

Angesichts der installierten Windleistungen von 68 GW und 72 GW Photovoltaik in Szenario II nördlich der bestehenden Engpasssstelle zeigt sich, dass die bestehenden Netzentwicklungspläne noch bei weitem nicht ausreichend sind, um die maximal zu erwartenden Leistungsflüsse in dem Szenario zu bewerkstelligen.

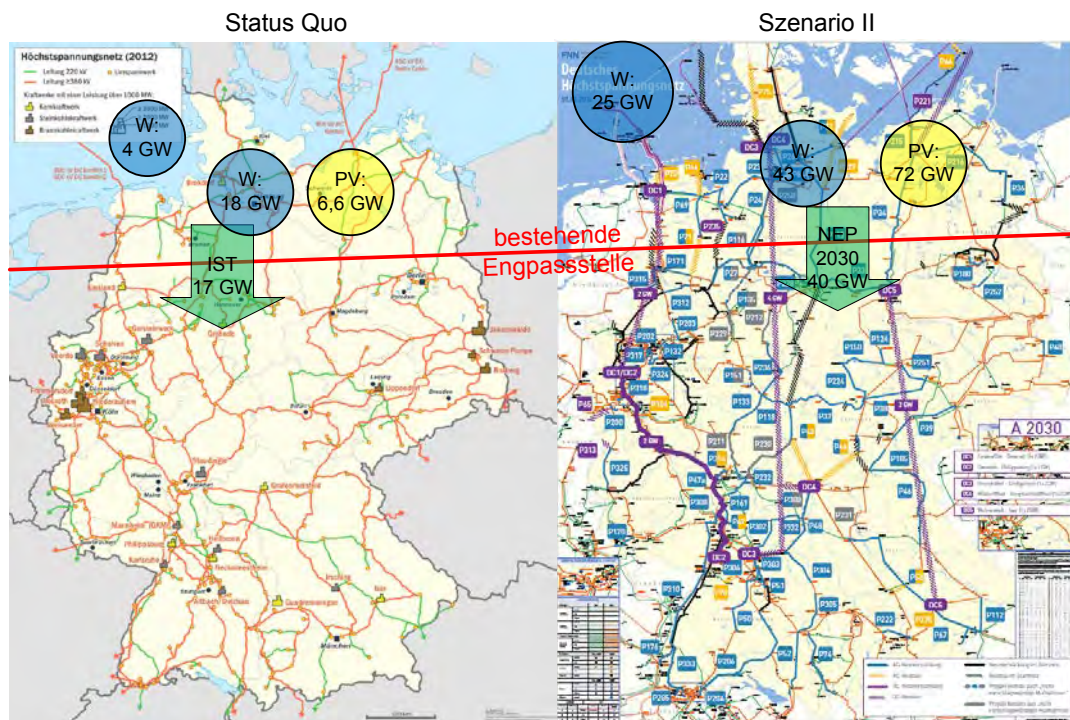


Abb. 58: Vereinfachte Darstellung der Netzverstärkungsmaßnahmen Nord-Süd in Norddeutschland (Quellen: links: ALEXRK2 (OpenStreetMap Data); links: NETZENTWICKLUNGSPLAN 2030)

Exemplarisches Verteilnetz

Unter den gleichen Randbedingungen wie Abb. 50 zeigt Abb. 59 den Gesamtlastgang der exemplarischen Ortsnetzstation unter den Annahmen von Szenario II. Die durchschnittlich auf den Dachflächen installierte PV-Leistung beträgt 12,3 kWp. Während sich die Lastseite im Vergleich zu Szenario I nicht verändert hat, ist im Sommer mit Rückspeisespitzen von bis zu 800 kW zu rechnen, sofern eine vollständige Einspeisung ohne die netzdienliche Unterstützung dezentraler Batteriespeicher gefordert ist.

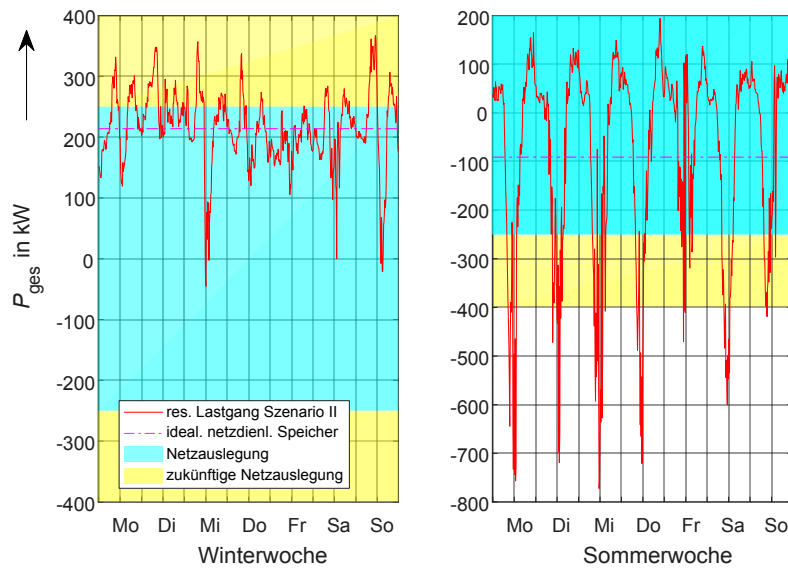


Abb. 59: Überlagerung zum Gesamtlastgang (Haushalt + Wärmepumpe + Photovoltaik) sowie idealer Tag/Nacht-Ausgleich durch Batteriespeicher und Darstellung des zukünftigen Netzdimensionierungsbereichs

Exemplarische Abschätzung der notwendigen Übertragungsleistung

Abb. 60 zeigt analog zu Abb. 51 eine vereinfacht dargestellte Übersicht über die notwendige Batteriespeicherkapazität, den Netzausbauaufwand sowie die alternativ abgeregelte PV-Energie anhand der exemplarischen Ortsnetzstationen aus Abb. 41. Als mögliches maximales PV-Potenzial wird das Ergebnis von Szenario II zugrunde gelegt. Es zeigt sich, dass das bestehende NS-Netz in der Lage ist, etwa 81 % der überschüssig in dem Netzgebiet erzeugten Energie abzuführen. Durch den zur Lastdeckung notwendigen Netzausbau erhöht sich diese Grenze auf 93 % der regenerativ erzeugten Energie.

Die Kosten des NS-Netzes zur Integration der Rückspeiseleistungen steigen in erster Näherung linear in Abhängigkeit zur auslegungsrelevanten Übertragungsleistung an. Da allerdings nur eine Ortsnetzstation berücksichtigt wird, kommen diskrete Sprünge hinzu, wenn die Stationsleistung nicht mehr ausreichend ist. Alternativ zum Netzausbau ist der Einsatz von netzdienlichen Speichern möglich. Der rote Verlauf zeigt hierzu die notwendige Speicherkapazität, bezogen auf die installierte PV-Anlagenleistung.

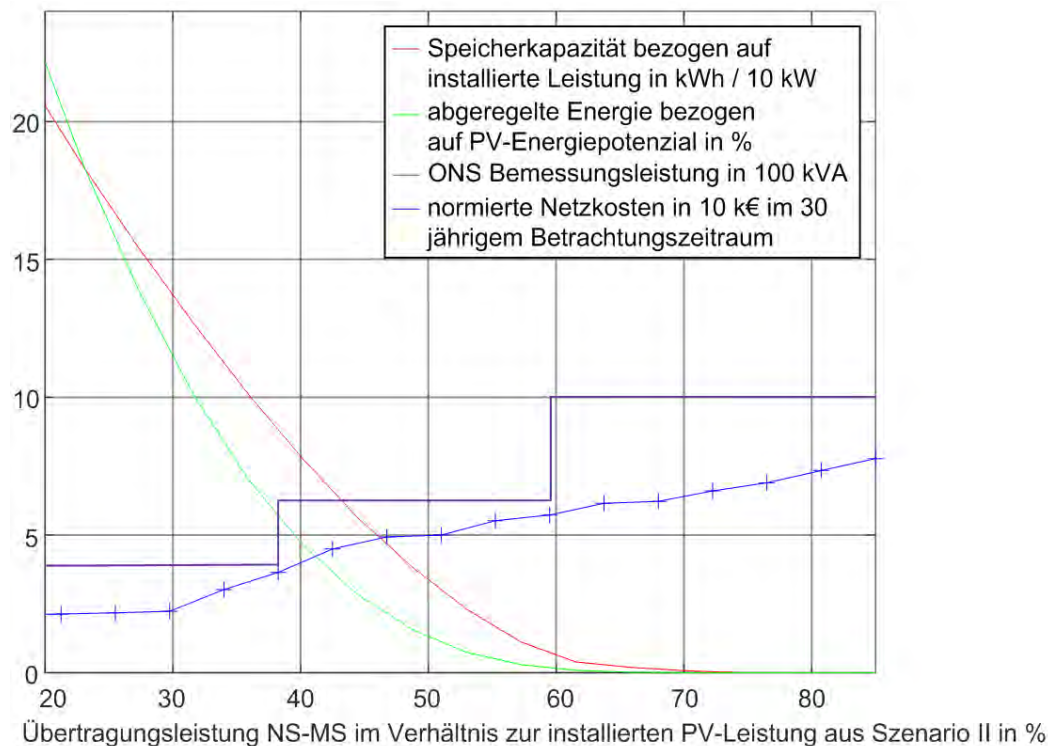


Abb. 60: Grafik der Netzausbau- und Betriebskosten, der notwendigen Speicherkapazität und abgeregelten Energie in Abhängigkeit zur installierten PV-Leistung in dem Wohngebiet aus Abb. 42.

Netzausbaumaßnahmen in den Ortsnetzen

Abb. 61 zeigt den Netzausbaubedarf, der notwendig wäre, um in dem exemplarischen Ort Szenario II zu erreichen. Die Punkte in der Grafik stellen die einzelnen Hausanschlüsse dar, wobei die farbliche Kennzeichnung die Stationszugehörigkeit darstellt. Die schwarzen Sterne mit Nennleistungsangabe beschreiben die vorhandenen Ortsnetzstationen. Die NS-Netze werden als Strahlennetze betrieben, wobei Unterbrechungen in den Leitungsverläufen die ermittelten Trennstellen darstellen. Zur vollständigen Integration des Szenarios ohne den Einsatz von Batteriespeichern in der Verteilnetzebene ist eine Erweiterung des Netzbestandes um 24,29 % erforderlich. Weiterhin müssen deutlich mehr Ortsnetzstationen aufgestellt werden, um die Leistung in höhere Netzebenen abzuführen.

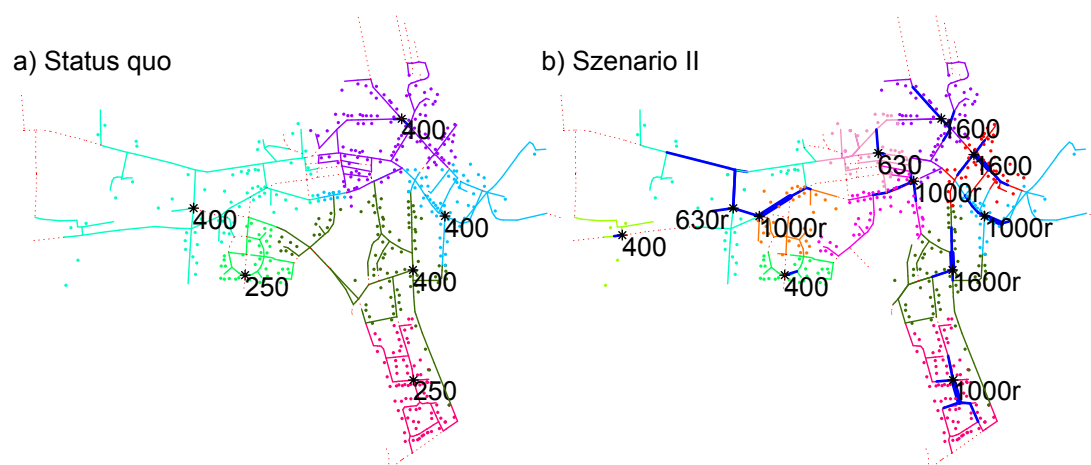


Abb. 61: Status Quo und Optimierungsergebnis für einen Beispielort für das Szenario II

Die wesentlichen Ergebnisse für das gesamte Versorgungsgebiet sind in Tab. 25 angegeben. Zur Deckung der zukünftigen Last- und Einspeiseannahmen aus den Energieszenarien müsste die Anzahl der Ortsnetzstationen um etwa 75 % und damit deutlich erhöht werden. Der Leitungsbestand muss dafür in Bezug auf das Gesamtnetz um etwa ein Viertel erhöht werden. Die installierte Leistung der Ortsnetzstationen versechsfacht sich im Vergleich zum Status quo.

Tab. 25: Ergebnis der Auswertung eines ländlichen Versorgungsgebietes von 287 km²

Variante Eigenschaft		Ortsnetz		287 km ² Versorgungsgebiet	
		Status quo	Szenario II	Status quo	Szenario II
Netzausbau in km		0	24,29	0	26,8
Ortsnetz- stationen	gesamt	6	12	203	356
	neue	0	6	0	185
	unverändert	0	1	0	31
	aufgelöst	0	0	0	35
rONT-Anteil in %		0	58,3	0	53,09
Ortsnetzstationen-Leistung in MVA		2,1	10,66	62,53	314,24
Spitzenleistungen in MVA		1,3	2,18	25,3	42,1
		- 0,2	- 9,06	- 7,9	- 238,4

Dadurch, dass die PV-Einspeiseleistung sehr hohe Leistungsspitzen in der Mittagszeit erzeugt und die Einspeiseleistung in Szenario II deutlich über den maximal zu erwartenden Lasten im Winter liegt, entsteht ohne den Einsatz von netzdienlichen Speichern oder die Begrenzung der Einspeiseleistung ein massiver Netzausbaubedarf. Allerdings enthalten diese Leistungsspitzen nur einen sehr geringen Anteil der tatsächlich erzeugten Energien, sodass eine Abregelung auf 60 oder 70 % der installierten Leistungen den Netzausbaufwand deutlich reduzieren würde. Der entstehende Ertragsverlust, müsste allerdings durch zusätzliche Anlagen bzw. den passenden Mix erneuerbarer Energien kompensiert werden.

8.2.4 Nichtelektrisches Energieertragspotenzial in Szenario II

Der nichtelektrische Energiebedarf von 315 TWh/a wird auch in Szenario II zunächst mit 60 TWh/a aus biogenen Reststoffen gedeckt (vgl. Kap. 7.6). Um die restlichen 255 TWh/a menschen- und naturverträglich über PtX bereitstellen zu können, müssten weitere 510 TWh/a Strom zur Verfügung stehen. In Szenario II ergeben sich unter Berücksichtigung des Speicherbedarfs bilanzielle Stromüberschüsse von 136 TWh/a, wenn die sehr ambitionierte Strombedarfsentwicklung erreicht wird. Der nichtelektrische Energiebedarf kann nicht vollständig gedeckt werden, da aus dem bilanziellen Stromüberschuss aufgrund der Umwandlungsverluste des Power-to-X Verfahrens nur 68 TWh/a nichtelektrische Energie zur Verfügung gestellt werden können. Somit ergäbe sich im Vergleich zum Endenergiebedarf ein Defizit von 187 TWh/a (vgl. Abb. 62).

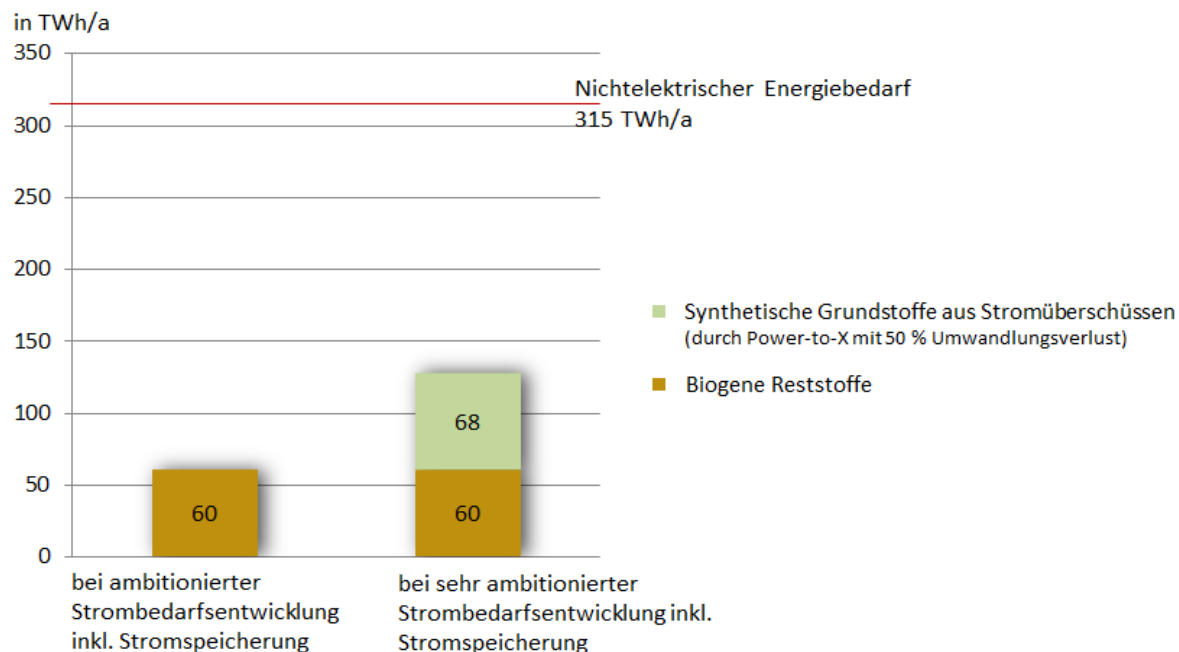


Abb. 62: Potenzial zur Deckung des nichtelektrischen Energiebedarfs durch biogene Reststoffe und synthetische Grundstoffe aus Stromüberschüssen in Szenario II

8.3 Szenario III: Technische Innovation „plus“ für Mensch und Natur

Szenario III ist eine Erweiterung des ersten und zweiten Szenarios um die Berechnung der Ertragspotenziale eines innovativen Windenergiesystemes (vgl. Kap. 7.5.2). Aufgrund des unterschiedlichen Bautyps der Kleinwindanlage und der zu erwartenden veränderten Umweltauswirkungen dieser Technologie ist es möglich, diese Anlage auf Flächen zu errichten, die in Szenario I und II mit sehr hohem, hohem oder mittlerem Raumwiderstand eingestuft wurden. Der Umfang der Flächen mit sehr hohem Raumwiderstand nimmt ab und das mensch- und naturverträglich nutzbare Stromertragspotenzial vergrößert sich. Derzeit sind nur geringe Auswirkungen auf Natur und Landschaft zu erwarten. Sollten sich im Praxisbetrieb neue Auswirkungen ergeben, müssen diese zukünftig in die Raumanalyse aufgenommen werden.

8.3.1 Stromertragspotenzial in Szenario III

Windenergie an Land

Das Stromertragspotenzial für das dritte Szenario ergibt sich aus den mensch- und naturverträglichen Stromertragspotenzialen aller drei Windenergieanlagen:

- 122 TWh/a aus der Anlage 2050 des Szenarios II
- rund 110 TWh/a aus der Windenergieanlage 2016 auf den Flächen, die noch nicht durch die Anlage 2050 belegt sind, sowie
- 2,3 TWh/a der Kleinwindanlage

Die Flächenanalysen bezogen auf die Kleinwindanlage haben gezeigt, dass es für ihren Bau aufgrund der geringen Auswirkungen ein sehr hohes Flächenpotenzial gibt. Der größtmögliche und damit nahezu flächendeckende Einsatz von Kleinwindanlagen ist aber einerseits aus technischer Sicht nicht sinnvoll (z. B. Anschluss der Anlagen an das Stromnetz) und andererseits durch die Errichtung baulicher Anlagen in dieser Größenordnung doch mit Umweltwirkungen verbunden. Es wurden daher nur die Stromerträge berücksichtigt, die verbrauchernah erzeugt werden. Verbrauchernah bedeutet in diesem Fall in unmittelbarer Nähe zu Siedlungsbereichen. Auf diese Weise kann der lautlose Betrieb als Vorteil der Technologie „Kleinwindanlage“ in den Ausschlussgebieten um Siedlungsbereiche genutzt werden, während die übrigen Gebiete effizienteren Technologien vorbehalten bleiben.

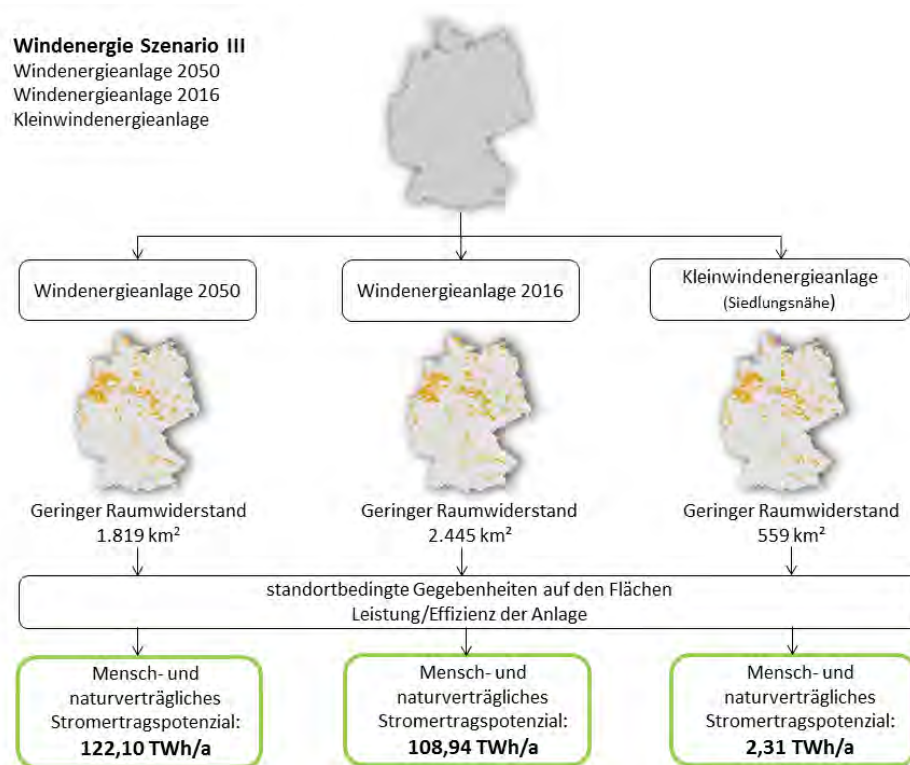


Abb. 63: Mensch- und naturverträgliches Stromertragspotenzial unter der Annahme der Eigenschaften der verschiedenen Windenergieanlagen in Szenario III

Photovoltaik im Innenbereich

Die Annahmen zum Dachflächenpotenzial sowie zu den Wirkungsgraden der PV-Anlagen entsprechen ebenfalls denen aus Szenario II. Auch im dritten Szenario ist durch Photovoltaik auf Dachflächen mit einem Ertrag von 670 TWh/a zu rechnen. Hinzu kommen auch hier die potenziellen Erträge von 44 TWh/a an Fassaden sowie 198 TWh/a auf versiegelten Siedlungsflächen (vgl. Tab. 26), wodurch PV im Innenbereich ein Gesamtertragspotenzial von 912 TWh/a aufweist.

Tab. 26: Stromertragspotenzial aus Photovoltaik im Innenbereich in Szenario II

Innerstädtischer Bereich	Fläche	Stromertragspotenzial
Dächer	1.950 km ²	608 TWh/a
Dachflächenpotenzial	200 km ²	62 TWh/a
Potenzial an Fassaden	168 km ²	44 TWh/a
Potenzial auf versiegelter Verkehrsfläche	736 km ²	198 TWh/a

8.3.2 Strommix und Flächeninanspruchnahme in Szenario III

Strommix

In Szenario III zeigte sich, dass der standortangepasste Einsatz verschiedenartiger Technologien das menschen- und naturverträgliche Stromertragspotenzial erhöhen kann. Durch den Einsatz von drei verschiedenen Anlagentypen steigt der potenzielle Gesamtstromertrag der betrachteten Energieträger auf 1.474 TWh/a, wobei im Strommix des Szenarios III der Anteil der Windenergie an Land im Vergleich zu den Szenarien I und II ansteigt und 16 % erreicht (vgl. Abb. 64).

Tab. 27: Stromertragspotenzial der einzelnen Energieträger und Strommix in Szenario III

Energieträger	Stromertragspotenzial	Prozentualer Anteil am Strommix
PV im Innenbereich	912 TWh/a	62 %
Windenergie an Land: bestehende Anlagen	142 TWh/a	10 %
Windenergie an Land: menschen- und naturverträgliche Stromertragspotenzial	233 TWh/a	16 %
Windenergie auf See	113 TWh/a	8 %
Geothermie	50 TWh/a	3 %
Wasserkraft	24 TWh/a	1 %

Der Anteil der Solarenergie liegt in Szenario III aufgrund der höheren Windenergieertragspotenziale nur noch bei 62 % (vgl. Abb. 64, Tab. 27).

In Szenario III muss beachtet werden, dass die Integration von Kleinwindanlagen in Siedlungsnähe die Einspeisung in das örtliche Stromnetz erhöht und dadurch neue Herausforderungen im Netzausbau zu erwarten sind.

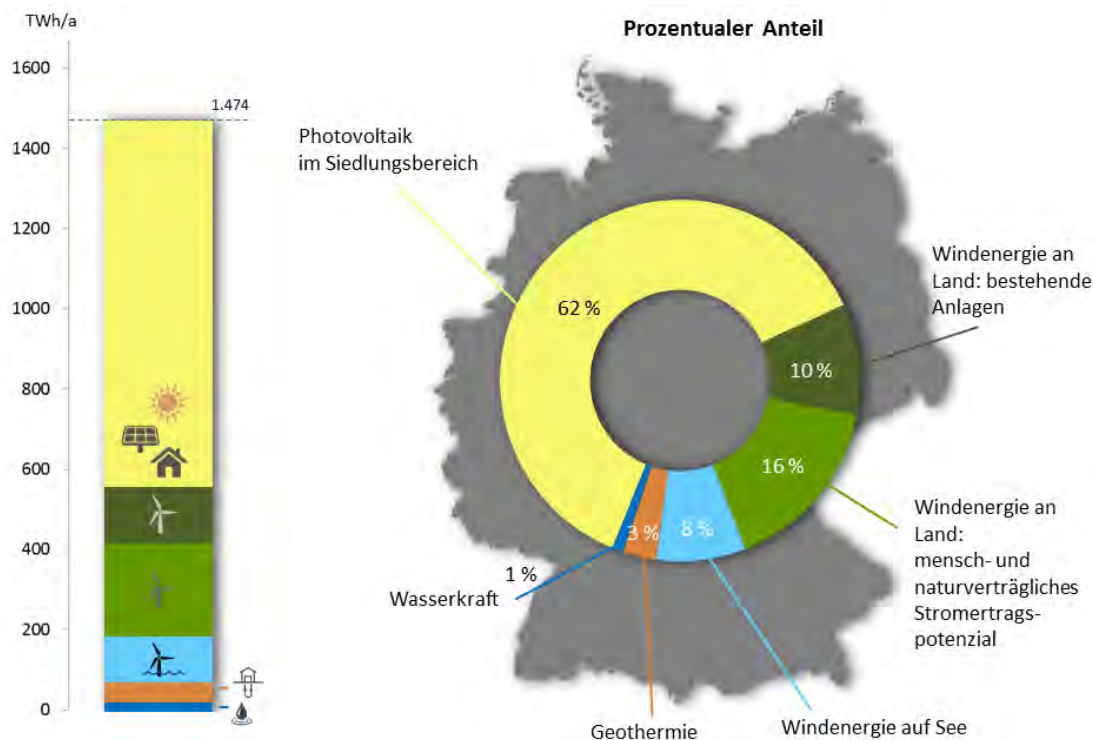


Abb. 64: Stromertragspotenzial und Strommix in Szenario III

Bilanzierung

Die Bilanz von Stromertragspotenzial und Strombedarf zeigt, dass sowohl bei der sehr ambitionierten Strombedarfsentwicklung als auch bei der ambitionierten Strombedarfsentwicklung die Erzeugungspotenziale mit 656 TWh/a bzw. 336 TWh/a über denen des Bedarfs liegen würden (vgl. Abb. 65).

Bei Berücksichtigung der speicherbedingten Umwandlungsverluste wird deutlich, dass der Strombedarf nur bei sehr ambitionierten Annahmen zur Strombedarfsentwicklung gedeckt und mit einem bilanzieller Überschuss von 247 TWh/a gerechnet werden kann (vgl. Abb. 65).

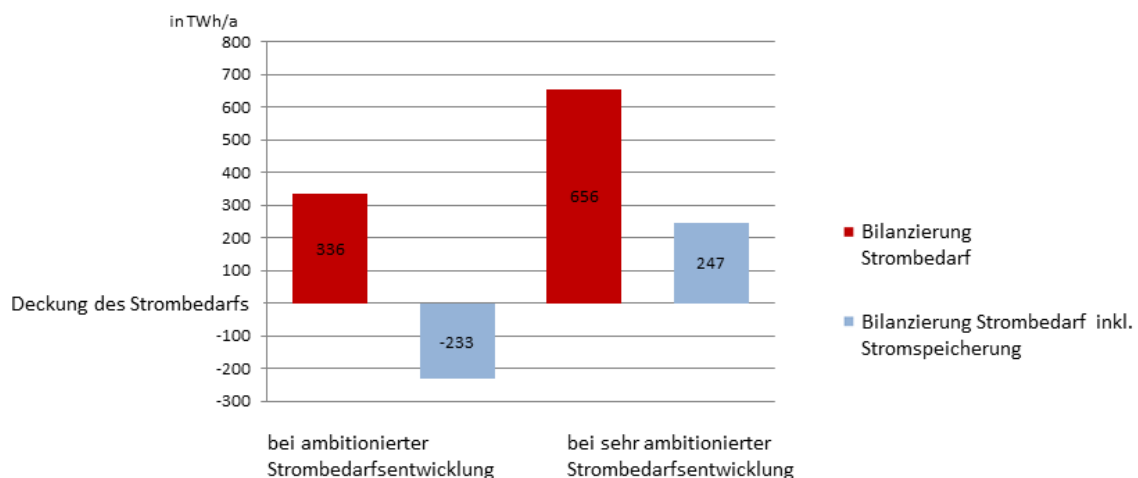


Abb. 65: Bilanzierung von potenziellem Stromertrag und Strombedarf in Szenario III

Flächeninanspruchnahme

Um das Stromertragspotenzial aus Szenario III zu erreichen, müssen 7.868 km² (zzgl. Fläche bestehender Anlagen und für Wasserkraft und Geothermie) genutzt werden, davon 3.045 km² im Innenbereich sowie 4.823 km² im Außenbereich. Zum Ausbau von Photovoltaik im innerstädtischen Bereich würden rund 10 % der Siedlungs- und Verkehrsfläche genutzt. Um das menschen- und naturverträgliche Windenergieertragspotenzial des dritten Szenarios erreichen zu können, müssten 2,13 % der landwirtschaftlichen Fläche durch Windenergieanlagen in Anspruch genommen werden, 0,19 % der Waldfläche Deutschlands sowie 1,8 % der sonstigen Fläche (vgl. Abb. 66). Wie in den beiden vorherigen Szenarien handelt es sich bei dieser Fläche um die Bereiche, auf denen insgesamt der Bau von Windparks möglich ist und nicht um die versiegelte Fläche, die durch die einzelnen Anlagen genutzt werden würde.

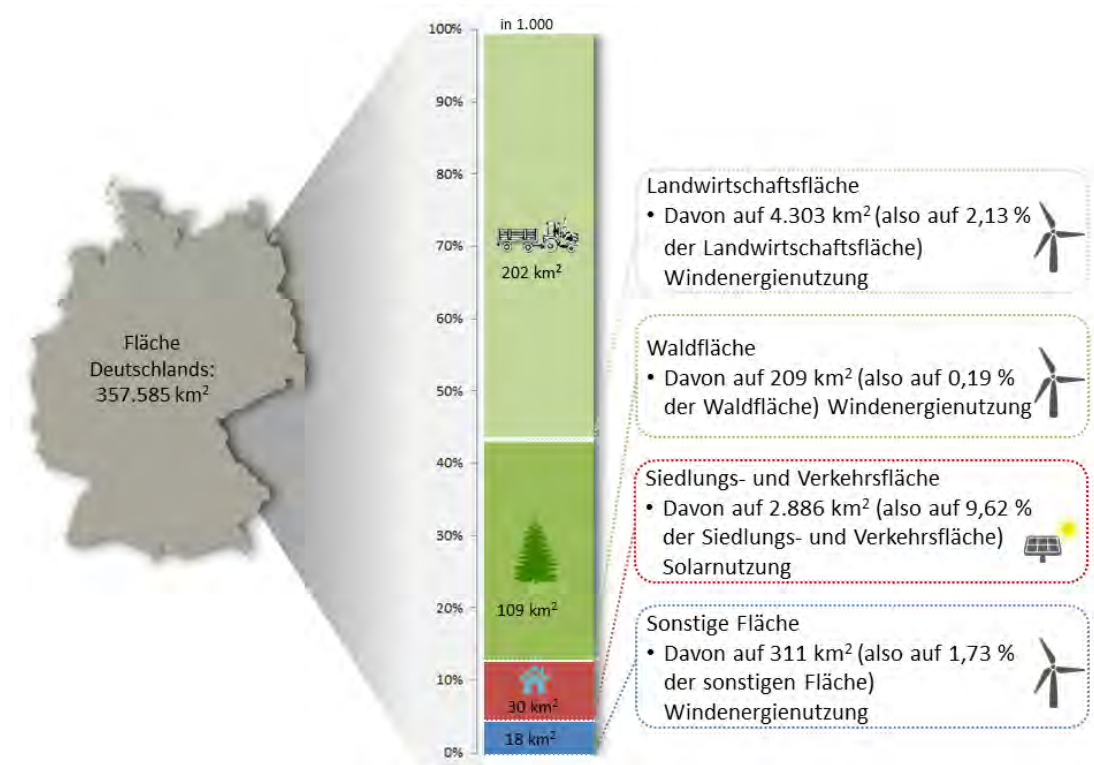


Abb. 66: Bestehende Flächennutzung und potenzielle Flächeninanspruchnahme zur Stromerzeugung durch Windenergie an Land und Photovoltaik im Innenbereich in Szenario III

8.3.3 Nichtelektrisches Energieertragspotenzial Szenario III

Beim Erreichen der sehr ambitionierten Strombedarfsentwicklung in 2050 könnten aus dem überschüssigen Strom rund 247 TWh/a per Power-to-X in nichtelektrische Energie umgewandelt werden. Aufgrund der Verluste im Rahmen der Umwandlungsprozesse stünden anschließend 123,5 TWh/a zur nichtelektrischen Nutzung zur Verfügung, hinzu kämen 60 TWh/a aus der Nutzung biogener Reststoffe. Eine vollständige Deckung des nichtelektrischen Energiebedarfs ist somit auch in diesem Szenario nicht menschen- und naturverträglich möglich (vgl. Abb. 67).

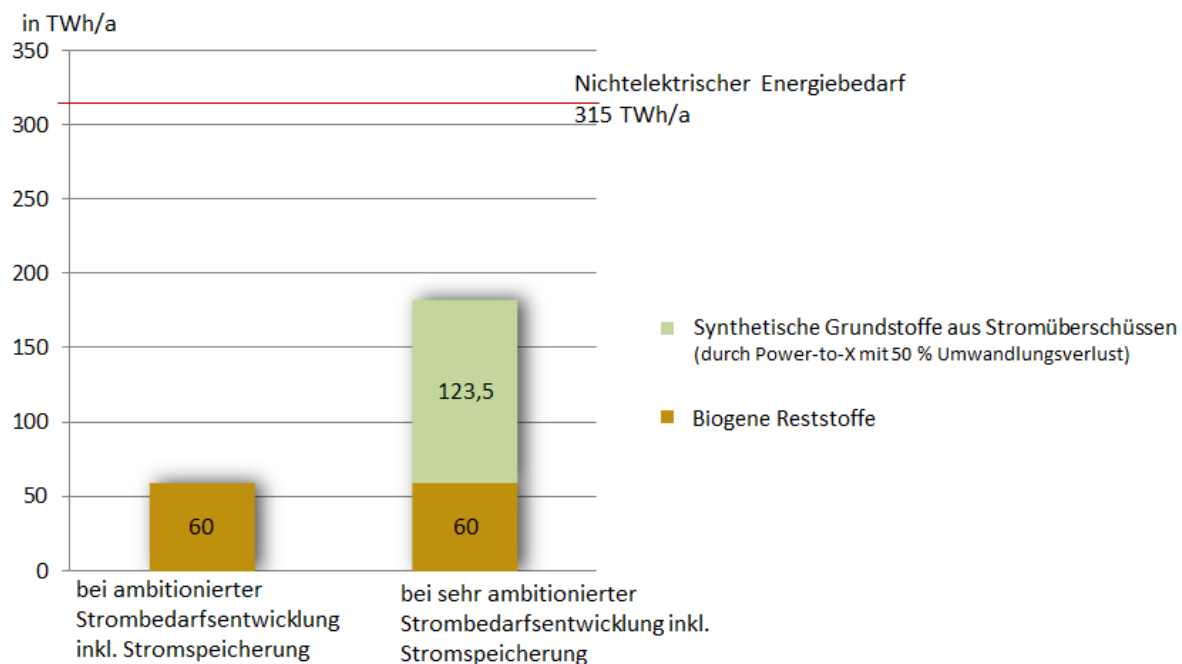


Abb. 67: Potenzial zur Deckung des nichtelektrischen Energiebedarfs durch biogene Reststoffe und synthetische Grundstoffe aus Stromüberschüssen in Szenario III

8.4 Gegenüberstellung von Endenergiebedarf und Energieertragspotenzialen und Flächeninanspruchnahme

Der Endenergiebedarf wurde in die Sektoren Strom, nichtelektrische Energie und Wärme untergliedert um Handlungsnotwendigkeiten darstellen zu können. Bezogen auf den Strombedarf und die entsprechenden Ertragspotenziale zeigt sich, dass eine zu 100 % menschen- und naturverträgliche Stromversorgung aus erneuerbaren Energien bilanziell möglich ist. Das naturverträgliche Stromertragspotenzial in den Szenarien kann bei der Summierung aller erneuerbaren Energieträger 1.023 TWh/a bis 1.474 TWh/a erreichen (siehe Tab. 28). Demgegenüber steht ein Strombedarf von 818 TWh/a (ambitioniert) bzw. 1139 TWh/a (sehr ambitioniert).

Tab. 28: Übersicht über die Stromertragspotenziale der betrachteten Energieträger in den Szenarien I–III

Energieträger	Szenario I	Szenario II	Szenario III
Stromertragspotenzial Windenergie auf See	68 TWh/a	113 TWh/a	113 TWh/a
Windenergie an Land: mensch- und naturverträgliches Stromertragspotenzial	186 TWh/a	122 TWh/a	233 TWh/a
Windenergie an Land: bestehende Anlagen	142 TWh/a	142 TWh/a	142 TWh/a
Stromertragspotenzial Photovoltaik im Innenbereich	553 TWh/a	912 TWh/a	912 TWh/a
Wasserkraft	24 TWh/a	24 TWh/a	24 TWh/a
Geothermie	50 TWh/a	50 TWh/a	50 TWh/a
Gesamtstromertragspotenzial	1.023 TWh/a	1.363 TWh/a	1.474 TWh/a

Wird der notwendige Speicherbedarf mit eingerechnet, zeigt sich allerdings ein anderes Bild. Bei ambitionierter Strombedarfsentwicklung kann dann in keinem der gerechneten Szenarien der Strombedarf vollständig gedeckt werden (vgl. Abb. 68).

Nur bei Erreichen der sehr ambitionierten Strombedarfsentwicklung könnte in Szenario II und III der Strom- und Speicherbedarf gedeckt werden (vgl. Abb. 68). Der technologische Fortschritt (vgl. Szenario II und III) sowie die Maßnahmen zur Reduzierung des Energiebedarfs (vgl. Kap. 2) sind also essentiell zu erreichen.

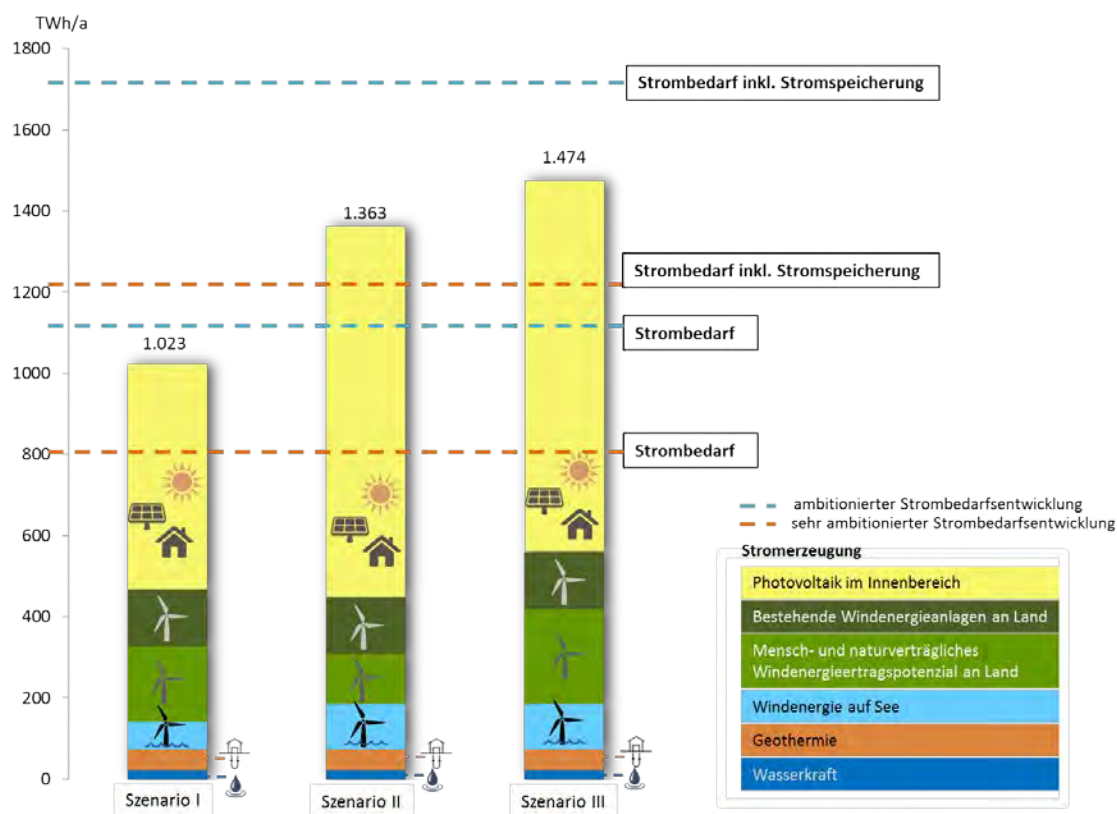


Abb. 68: Bilanzierung des naturverträglichen Stromerzeugungspotenzials und des Strombedarfs der Bundesrepublik Deutschland in den Szenarien I–III

Tab. 29: Bilanzierung des Gesamtstromerzeugungspotenzials und des Strombedarfs in den Szenarien I–III

Bilanzierung Stromerzeugungspotenzial – Strombedarf		Szenario I (1.023 TWh/a)	Szenario II (1.363 TWh/a)	Szenario III (1.474 TWh/a)
ambitionierte Strombedarfsentwicklung	ohne Stromspeicherung (1.138 TWh/a)	-115 TWh/a	+225 TWh/a	+336 TWh/a
	inkl. Stromspeicherung (1.707 TWh/a)	-684 TWh/a	-344 TWh/a	-233 TWh/a
sehr ambitionierte Strombedarfsentwicklung	ohne Stromspeicherung (818 TWh)	+205 TWh/a	+545 TWh/a	+656 TWh/a
	inkl. Stromspeicherung (1.227 TWh)	-204 TWh/a	+136 TWh/a	+247 TWh/a

Der bilanzielle Überschuss, der nach Abzug des Strombedarfs vom Stromerzeugungspotenzial noch zur Verfügung steht, soll die Erzeugungspotenziale der biogenen Reststoffe ergänzen und den nichtelektrischen Energiebedarf decken (vgl. Abb. 69). Erst dann ist das Ziel einer Versorgung mit 100 % erneuerbaren Energien erreicht. Die durch Strom erzeugbaren Brennstoffmengen würden (zusammen mit den verfügbaren Reststoffen) allerdings nicht ausrei-

chen, wenn die speicherbedingten Umwandlungsverluste nach heutigem Standard berücksichtigt werden. Das Defizit liegt dann bei mindestens 191,5 TWh/a nichtelektrischer Energie. Um dieses Defizit über Strom zu decken, müssten zusätzlich 383 TWh/a Strom produziert werden. Zur Deckung des nichtelektrischen Bedarfs muss daher auf die Reserven (vgl. Kap. 8.5) zurückgegriffen werden.

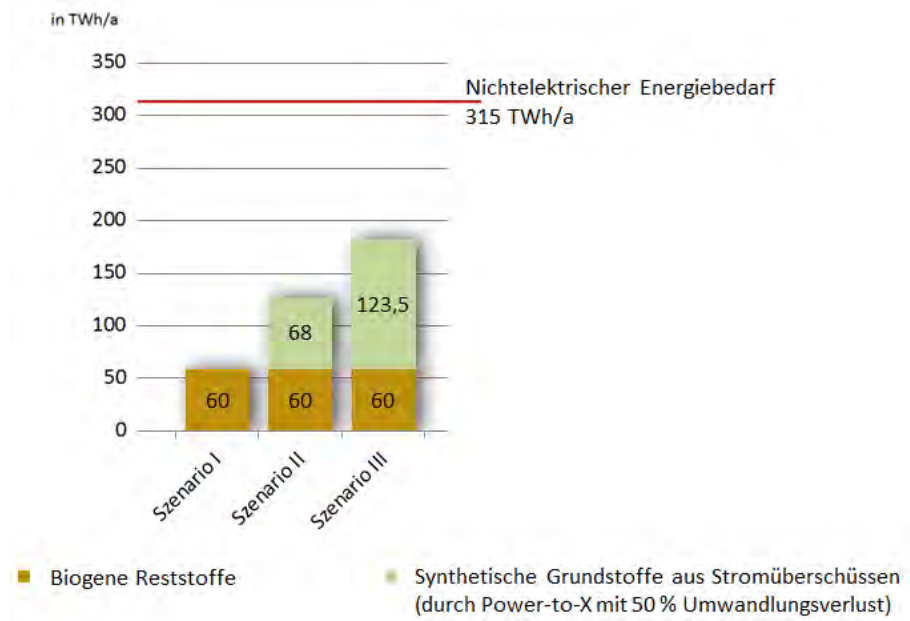


Abb. 69: Potenziale zur Deckung des nichtelektrischen Energiebedarfs in den Szenarien I-III (bei sehr ambitionierter Strombedarfsentwicklung und unter Berücksichtigung der Umwandlungsverluste)

Flächeninanspruchnahme durch Windenergieanlagen an Land und Photovoltaik im Innenbereich

Bei der Gegenüberstellung des Flächenbedarfs der Szenarien ist festzustellen, dass die Annahmen in Szenario II eine weitaus geringere Flächeninanspruchnahme bedeuten würden, als die der anderen Szenarien. Letztendlich wird im Außenbereich weniger als die Hälfte der Fläche im Vergleich zu den anderen Szenarien benötigt (vgl. Abb. 70). Auch die Zahl der Windenergieanlagen ändert sich stark. Müssten zum Erreichen der Stromerträge aus Windenergie in Szenario I 19.000 Anlagen gebaut werden, liegt die Zahl der Anlagen in Szenario II nur noch bei rund 7.000 Anlagen. Durch den enormen Einsatz an Kleinwindanlagen in Szenario III und der Kombination aus der Anlage 2016 und 2050 ergibt sich für Szenario III eine Anzahl von 34 Mio. Anlagen

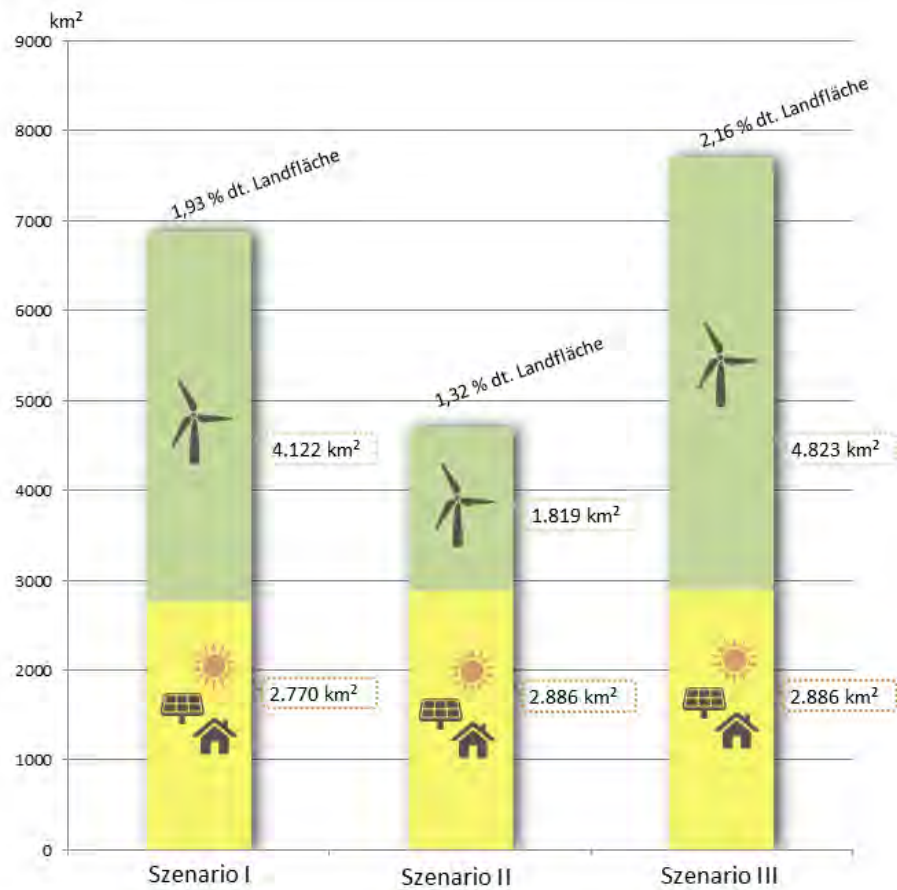


Abb. 70: Flächeninanspruchnahme der mensch- und naturverträglichen Stromerzeugung (geringer Raumwiderstand) durch Windenergie an Land und durch Photovoltaik im Innenbereich in den Szenarien I-III

8.5 Reserven

Die Szenarien sind als „No-regret-Strategien“ so ausgelegt, dass eine menschen- und naturgerechte Energiewende auch dann gelingen kann, wenn die anspruchsvollen Voraussetzungen der Szenarien nicht erfüllt werden. Dies wurde erreicht, indem zunächst nur die besonders risikoarmen Flächen berücksichtigt wurden. Aus Sicht einer Verträglichkeit für Natur, Mensch und Landschaft sind auch deutlich darüber hinausgehende Lösungen potenziell möglich. So wurden Flächen mittlerer Empfindlichkeit, auf denen eine energetische Nutzung im Prinzip denkbar wäre, zunächst nicht für eine energetische Nutzung vorgesehen. Ferner wurden besonders strenge Maßstäbe an den Schutz des Menschen vor Lärm und visuellen Beeinträchtigungen angelegt, die über die derzeitigen rechtlichen Vorgaben hinausgehen. Teilweise wurden Potenziale der Energieerzeugung nicht berücksichtigt, die unter veränderten Rahmenbedingungen keine negativen Auswirkungen haben werden. Diese unberücksichtigten Potenziale wurden in einer bisher nicht quantifizierten Reserve zusammengefasst (vgl. Abb. 71). Hierzu zählt die Erhöhte Nutzung von Offshorewindenergie, die Verwendung von Freiflächen-PV oder die Nutzung von Windenergie auf Flächen mit mittlerem Raumwiderstand sowie die Annahme geringerer Abstände zwischen Windenergieanlagen und Siedlungsbereichen.

Die Szenarien mit ihren teils extremen Annahmen (zur Gewährleistung eines möglichst geringen Risikos für die Ziele von Natur und Landschaft) können als Diskussionsgrundlage für die sich ergebenden Handlungsfelder dienen. Gleichzeitig verdeutlichen die identifizierten Reserven, dass für den Weg bis 2050 Handlungsspielräume für die tatsächliche Umsetzung einer naturverträglichen Energiewende bestehen. So kann angenommen werden, dass diese auch mit der notwendigen Teilhabe der Bürgerinnen und Bürger auf allen Ebenen realisiert werden kann.



Grafikgrundlage: Tanja Wehr

Abb. 71: Reserven der Energieproduktion in den Szenarien einer menschen- und naturverträglichen Energiewende

8.5.1 Zusätzliche Windenergie an Land

Eine Möglichkeit das Stromertragspotenzial zu erhöhen, ergibt sich durch die Annahme weniger strenger Vorgaben für den Schutz der Menschen vor Lärm und visuellen Beeinträchtigungen. Werden die derzeit gültigen Berechnungsvorgaben der TA-Lärm zu Grunde gelegt verringern sich die Abstände zu Wohngebieten, Flächen für Freizeit/Erholung sowie zu Industrie- und Gewerbeflächen in den berechneten Szenarien (vgl. Tab. 30).

Tab. 30: Annahmen zu Schutzabständen zu Siedlungsbereichen, Erholungsgebieten - bei weniger strengen Vorgaben zum Schutz der Menschen vor Lärm und visuellen Beeinträchtigungen

Abstände zu:	Windenergieanlage 2016	Windenergieanlage 2050
Wohngebiete	501 m	750 m
Freizeit/Erholung	891 m	1.334 m
Industrie/Gewerbe	50 m	75 m

Durch die geringeren Abstände ergibt sich in Szenario I eine zusätzlich nutzbare Fläche für Windenergie von 6.868 km² und damit ein zusätzlicher potenzieller Stromertrag von 297 TWh/a. In Szenario II ergäbe sich auf einer zusätzlichen Fläche von 6.481 km² ein zusätzlicher Stromertrag aus Windenergie von 408 TWh/a. In Szenario III erhöhen sich durch geringere Abstände zu Siedlungen ebenfalls die potenziell nutzbaren Flächen der Windenergieanlage 2050 und 2016. Insgesamt könnte das Stromertragspotenzial (aus Windenergie) in Szenario III um 449 TWh/a gesteigert werden (vgl. Tab. 31). Da die Kleinwindanlage ohnehin in unmittelbarer Nähe zu Siedlungen steht, ergeben sich hier keine Unterschiede zu den Szenarienvarianten mit großen Schutzabständen.

Tab. 31: Potenzielle Flächeninanspruchnahme und Stromerträge der Windenergie an Land bei weniger strengen Vorgaben zum Schutz der Menschen vor Lärm und visuellen Beeinträchtigungen

		Fläche			Stromertrag		
		hohe Abstände	geringe Abstände	Reserve	hohe Abstände	geringe Abstände	Reserve
Szenario I		4.122 km ²	10.990 km ²	+ 6.868 km²	186,25 TWh/a	483,30 TWh/a	+ 297,05 TWh/a
Szenario II		1.819 km ²	8.300 km ²	+ 6.481 km²	122,10 TWh/a	530,41 TWh/a	+ 408,31 TWh/a
Szenario III	Windenergieanlage 2050	1.819 km ²	8.300 km ²	+ 6.481 km ²	122,10 TWh/a	530,41 TWh/a	+ 408,31 TWh/a
	Windenergieanlage 2016:	2.445 km ²	3.458 km ²	+ 1.013 km ²	108,94 TWh/a	149,62 TWh/a	+ 40,68 TWh/a
	Kleinwindenergieanlage	559 km ²	559 km ²	0 km ²	2,31 TWh/a	2,31 TWh/a	0 TWh/a
	Gesamt	4.823 km ²	12.317 km ²	+7.494 km²	233,35 TWh/a	682,34 TWh/a	+ 448,99 TWh/a

Das Stromertragspotenzial bestehender Windenergieanlagen von 142 TWh/a, das in den ursprünglichen Szenarien berücksichtigt und gesondert aufgeführt wurde (vgl. Kap. 7.5.2), wird in diesem Fall bei der Neuberechnung des Gesamtstromertragspotenzials nicht mehr mit aufgenommen. Angesichts der nun geringen Siedlungsabstände ist die Wahrscheinlichkeit sehr hoch, dass die Standorte der bestehenden Anlagen ansonsten doppelt in die Berechnungen einbezogen würden. Daher setzt sich das zusätzliche Stromertragspotenzial aus den Reserven der Windenergie an Land abzüglich der 142 TWh/a der bestehenden Anlagen

zusammen. In Szenario I kommt es dadurch zu einem zusätzlichen Stromertragspotenzial von 155 TWh/a in Szenario II 266 TWh/a und in Szenario III 307 TWh/a (vgl. Abb. 72 und Tab. 32).

Tab. 32: Übersicht potenzieller Stromerträge der einzelnen Energieträger in den Szenarien I–III bei weniger strengen Vorgaben zum Schutz der Menschen vor Lärm und visuellen Beeinträchtigungen

Energieträger	Szenario I + Reserve	Szenario II + Reserve	Szenario III + Reserve
Stromertragspotenzial Windenergie auf See	68 TWh/a	113 TWh/a	113 TWh/a
Windenergie an Land: mensch- und naturverträgliches Stromertragspotenzial	483 TWh/a	530 TWh/a	682 TWh/a
Windenergie an Land: bestehende Anlagen	-	-	-
Stromertragspotenzial Photovoltaik im Innenbereich	553 TWh/a	912 TWh/a	912 TWh/a
Wasserkraft	24 TWh/a	24 TWh/a	24 TWh/a
Geothermie	50 TWh/a	50 TWh/a	50 TWh/a
Gesamtstromertragspotenzial	1.178 TWh/a	1.629 TWh/a	1.781 TWh/a

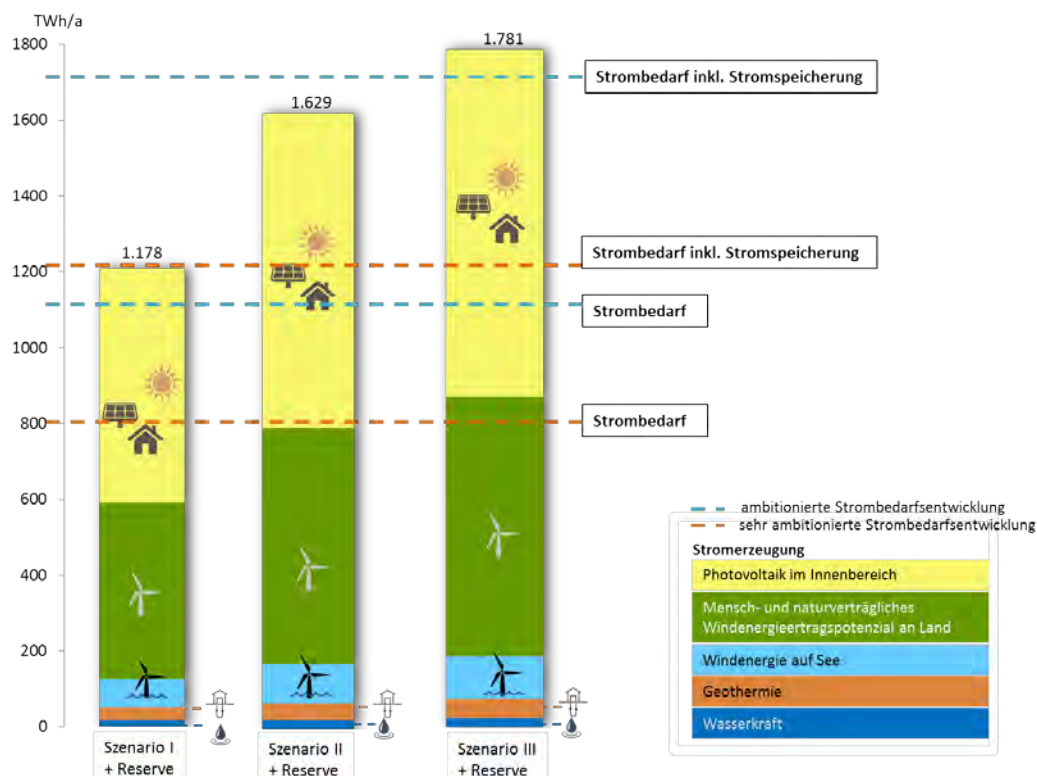


Abb. 72: Gesamtstromertragspotenzial im Vergleich mit dem potenziellen Strombedarf in den Szenarien I–III bei weniger strengen Vorgaben zum Schutz der Menschen vor Lärm und visuellen Beeinträchtigungen

In allen Szenarien erhöht sich durch diese veränderten Annahmen der potenzielle Stromertrag durch Windenergie an Land, so dass sich ein neuer Strommix ergeben würde. Bei dieser überschlägigen Berechnung konnten die zu erwartenden Auswirkungen auf die Speicher sowie den Netzausbau nicht berücksichtigt werden.

Szenario I + Reserve

Das Stromertragspotenzial in Szenario I würde um 155 TWh/a auf insgesamt 1.178 TWh/a steigen. Dabei erhöht sich der Anteil an Windenergie am Strommix auf 41 %. Photovoltaik würde nur noch 47 % ausmachen, während der Anteil an Offshorewindenergie, Wasserkraft und Geothermie nahezu gleich bleibt.

Der Ausbau der erneuerbaren Energien mit heutigem Stand der Technologie wäre also nicht ausreichend, um den Strombedarf inklusive der Stromspeicherung und der Speicherverluste zu decken.

Szenario II + Reserve

Das Stromertragspotenzial in Szenario II steigt bei einer Reduzierung der Abstände zu Siedlungen um 266 TWh/a auf insgesamt 1.629 TWh/a. Aufgrund der hohen angenommenen PV-Wirkungsgrade macht Photovoltaik im Innenbereich mit 56 % noch immer einen deutlich höheren Anteil aus, als die Windenergie mit 33 %. Die Anteile von Windenergie auf See, Geothermie und Wasserkraft bleiben nahezu gleich.

Wird die sehr ambitionierte Strombedarfsentwicklung bis zum Jahr 2050 erreicht, kann der Strombedarf inklusive der Verluste aus der Stromspeicherung gedeckt werden (vgl. Abb. 73). Der zusätzliche nichtelektrische Energiebedarf hingegen, kann nur bis zu 261 TWh/a gedeckt werden, so dass eine Deckungslücke von 54 TWh/a gefüllt werden muss (vgl. Abb. 73).

Szenario III + Reserve

In Szenario III steigt das Stromertragspotenzial um 307 TWh/a auf insgesamt 1.781 TWh/a. Dabei macht Photovoltaik aufgrund der hohen Wirkungsgrade immer noch den größten Anteil am potenziellen Strommix aus (51 %), aufgrund der standortangepassten Verteilung von Windenergieanlagen steigt der Anteil an Windenergie am Strommix aber auf 38 %. Auch in Szenario III variiert der Anteil der verbliebenen Energieträger nur um wenige Prozentpunkte gegenüber den Berechnungen ohne Reserve.

Mit dem höheren Stromertrag und bei Erreichen der sehr ambitionierten Strombedarfsentwicklung wäre es möglich, den Strombedarf inklusive des Speicherbedarfs und auch den nicht elektrischen Energiebedarf zu decken (vgl. Abb. 73). Eine vollständige Energieversorgung aus erneuerbaren Energien wäre somit rein bilanziell betrachtet möglich.

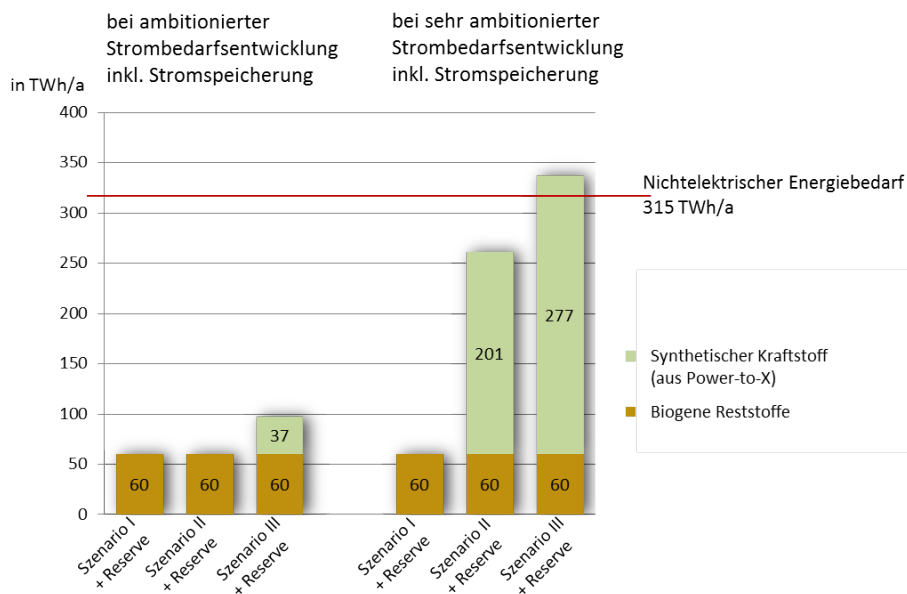


Abb. 73: Potenzial zur Deckung des nichtelektrischen Energiebedarfs in den Szenarien I-III unter Berücksichtigung der Windenergiereserven (bei ambitionierter und sehr ambitionierter Strombedarfsentwicklung und unter Berücksichtigung der Umwandlungsverluste)

8.5.2 Weitere Reserven

Als Reserve könnte zudem auch das Stromertragspotenzial von Windenergieanlagen auf Flächen mittleren Raumwiderstands, auf denen nach Einzelfallprüfung und mit einer sachgerechten Kompensation eine Ansiedlung von Windenergieanlagen denkbar ist, genutzt werden. Dabei kann z. B. eine Abwägung zwischen dem potenziellen Energieertrag und dem Raumwiderstand stattfinden. Dies könnte bedeuten, dass Gebiete mit einem mittleren Raumwiderstand genutzt würden, wenn die potenziellen Stromerträge dort sehr hoch sind. In Szenario I könnten bei der Belegung der Flächen mit mittlerem Raumwiderstand zusätzlich 220 TWh produziert werden, unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen von Szenario II wären es rund 137 TWh pro Jahr zusätzlich.

Auch die Offshorewindenergie birgt noch zusätzliche Reserven. So wurden in den Szenarien lediglich die Ausbauziele nach EEG 2017 und die daraus resultierenden Ertragspotenziale abgeschätzt. Das EEG berücksichtigt im Augenblick allerdings nicht die Nutzung des gesamten Offshorepotenzials. Angenommen werden in den Szenarien II und III 112,5 TWh/a Stromertragspotenzial. Laut einer Studie des FRAUNHOFER IWES (2013) liegt die Potenzialgrenze der Offshorewindenergie bei 258 TWh/a. Dies eröffnet eine Reserve von 145 TWh/a.

Außerdem ist ein bisher noch nicht quantifiziertes Potenzial an menschen- und naturverträglicher Freiflächen-Solarenergie vorhanden, das noch nicht berücksichtigt wurde, um zusätzlichen Druck auf die Fläche zu vermeiden. Selbst ohne dieses Ziel zu verletzen besteht bereits jetzt eine Reserve in der Nutzung von Solarenergie auf den Flächen, die derzeit bereits als Energiepflanzenanbaufläche für die Erzeugung erneuerbarer Energien genutzt, 2050 aber bei erwartungsgemäßer Entwicklung technischer Speicher nicht mehr für die Erzeugung von Regelenergie benötigt werden (vgl. Kap. 2.7). Die rund 2,4 Mio. ha Energiepflanzenfläche (FNR: 2017) können voraussichtlich ohne negative und auf Intensiv-Ackerflächen sogar mit positiven Umwelteffekten z. B. für das Grundwasser mit Photovoltaik-Freiflächenanlagen in Nutzung genommen werden. Um den derzeitigen energetischen Beitrag der Bioenergie

durch Photovoltaik zu kompensieren, wird aufgrund des höheren Energieertrags pro ha der PV-Anlagen sogar nur ein Bruchteil der durch Energiepflanzenanbau belegten Fläche benötigt (vgl. Kap. 3.2). So würde zusätzliche Fläche (gegenüber dem Status quo) für die Nahrungsmittelerzeugung oder die stoffliche Nutzung von nachwachsender Rohstoffe freigesetzt. Letztere würde in der Endstufe der Kaskade das Potenzial für die Befriedigung der nichtelektrischen Energiebedarfe erhöhen.

Im Bereich der Tiefengeothermie sollten bei fortgesetzter weiterer Entwicklung in 2050 zwischen 5 und 10 % des Strombedarfs und ca. 20 % des Wärmebedarfs bereitgestellt werden können. In den vorliegenden Szenarien wurden bislang nur die Stromertragspotenziale, nicht die gleichzeitig anfallende Wärme berücksichtigt, obwohl dies – dort, wo eine Kombination mit Wärmenetzen möglich ist, wesentliches Standbein einer erneuerbaren Wärmeversorgung sein kann (OPPELT 2017). Durch kompetente Planung, wozu auch eine möglichst weitgehende Vorabsimulation gehört, und Ausführung unter Beachtung des Standes der Technik ist dies ohne Umweltbeeinträchtigung möglich (OPPELT 2017, Anhang 6.7: 6).

Viele technische Innovationen, die bereits angedacht sind, deren Energiepotenzial bisher aber nicht quantifiziert werden konnte, sind ebenfalls noch nicht berücksichtigt und bilden eine weitere nutzbare Reserve. Im Bereich der Windenergie handelt es sich beispielsweise um drachenartige Anlagen, in denen durch das Auf- und Absteigen eines Drachens ein Generator betrieben wird oder Anlagen, die mit Hilfe eines Drachens einen auf Schienen befindlichen Generator bewegen, sowie reine Fluganlagen (STOEVE SANDT 2016, Anhang 6.8: 12).

Auch in den Bereichen der Photovoltaik sowie der Gezeitenkraftwerke und der Stromspeicher kommt es immer wieder zu neuen Konzepten und Innovationen (siehe Anhang 1). Ob und inwieweit es gelingen wird, solche Projekte mit der notwendigen Zuverlässigkeit umzusetzen, ist derzeit jedoch unklar (STOEVE SANDT 2016: 12, Anhang 6.8).

Ferner ist der Endenergiebedarf des Jahres 2050 projiziert worden, ohne z. B. eine weitere Reduktion des Energieverbrauchs infolge einer Veränderung des Lebensstils oder neuer Mobilitätskonzepte zu berücksichtigen. Hier besteht die Möglichkeit, weiterer Einsparungen, um weniger Energie bereitstellen zu müssen.

Zur Reserve gehört auch, dass die Szenarien zunächst für eine bilanzielle Selbstversorgung Deutschlands mit Energie gerechnet wurden, ohne mögliche Energieimporte aus anderen Ländern in die Bilanz einzubeziehen. Mit den skizzierten Szenarien würde die Importabhängigkeit gegenüber dem Status Quo drastisch reduziert – da heute über zwei Drittel der zur Deckung des Primärenergieverbrauchs erforderlichen Energieträger importiert werden. Von einer Selbstversorgung auszugehen entspricht in erster Annäherung zwar einer global nachhaltigen Rechnung, ist aber aufgrund der in Deutschland im Verhältnis zum hohen Energieverbrauch geringen Fläche eine große Herausforderung. Bilanzielle Netto-Importe sollten deshalb im Rahmen der Reserve prinzipiell möglich sein. Sie sollten jedoch erst dann erwogen werden, wenn sichergestellt ist, dass die Importe aus Gebieten und Staaten mit komparativen Vorteilen (besseren Produktionsbedingungen) kommen, die gleichermaßen ambitionierte Nachhaltigkeitsziele verfolgen.

9 Politische Handlungsoptionen zur Umsetzung einer mensch- und naturverträglichen Energiewende

9.1 Die ambitionierten Szenariovoraussetzungen weisen den Weg zu ambitionierten politischen Handlungsoptionen

Die dargestellten Szenarien zeigen, dass eine mensch- und naturverträgliche Energiewende mit 100 % erneuerbaren Energien bis 2050 prinzipiell machbar wäre. Alle drei Szenarien gehen davon aus, dass höchste Ansprüche verwirklicht werden - an den Schutz der Menschen vor Lärm und Beeinträchtigungen des Landschaftserlebens sowie an den Schutz der Natur. Dies beinhaltet 100 % erneuerbare Energien ohne Netto-Energie-Importe sowie geringste Lärmbelastungen und die Erhaltung der landschaftlichen Schönheit für den Menschen. Die Szenarien II und III greifen zusätzlich das Erreichen der Ziele der nationalen Biodiversitätsstrategie bezüglich Schutz und Entwicklung der Natur auf. Ferner soll die Fläche für die Nahrungsmittelerzeugung gegenüber dem Status quo nicht zu Gunsten der erneuerbaren Energien abnehmen. Die Wege zu einer mensch- und naturverträglichen Energiewende erfordern ein großes gesellschaftliches Engagement und eine planvolle zielgerichtete Umsetzung. Ob und auf welche Weise die Ziele in den Szenarien erreicht werden, hängt von vielen Voraussetzungen ab (vgl. Abb. 74), die zunächst ebenfalls sehr ehrgeizig definiert wurden. So wurde davon ausgegangen, dass die Speichertechnologie und die Integration der erneuerbaren Energieträger in das Energiesystem bis 2050 sehr weit entwickelt sein werden. Außerdem wurden ambitionierte Annahmen für die Reduzierung des Energiebedarfs bis 2050 zugrunde gelegt, die ganz wesentlich auch darauf beruhen, dass Industrie und Gewerbe, aber auch private Haushalte und vor allem Hausbesitzer durch eine deutlich höhere Energieeffizienz (andere bzw. effizientere Technologien, Sanierung) dazu beitragen, Energiebedarfe zu senken (vgl. Kap. 2.3).

Eine weitere wesentliche Voraussetzung besteht darin, dass es gelingt, die Installation der Anlagen auch tatsächlich auf die Flächen zu lenken, auf denen geringe Wirkungen auf Mensch und Natur und Landschaft zu erwarten sind. Und schließlich muss eine energieeffiziente und naturschutzfreundliche Technik implementiert und weiterentwickelt werden, die es im besten Fall ermöglicht, mit weniger Anlagen, die geringere Auswirkungen auf Mensch (z. B. Lärm), die Biodiversität und das Landschaftsbild haben, mehr Energie zu erzeugen.



Abb. 74: Voraussetzungen für die Szenarien, die gleichzeitig die Richtung politischer Handlungsoptionen verdeutlichen

Die Szenarien sind insofern im doppelten Sinne nicht im Detail „realistisch“ – weder im Hinblick auf die Wahrscheinlichkeit einer vollständigen Zielerfüllung noch auf die zu erfüllenden Voraussetzungen. Diese Voraussetzungen mögen zwar technischer Art sein, sie sind aber als Voraussetzung für eine effiziente Energiewende direkt auch für den Naturschutz relevant, wie anhand der Szenarien gezeigt wurde.

Mit ihren ambitionierten Voraussetzungen verdeutlichen die Szenarien sehr klar, wo strategischer Handlungsbedarf auch aus Naturschutzsicht besteht und wo Handlungsoptionen liegen, die bereits heute verfolgt werden sollten. Vor allem folgende Handlungsbereiche kristallisieren sich heraus:

1. Die zielgeleitete Senkung des Energiebedarfs entsprechend der Szenarioannahmen
2. Das Erreichen der technischen Innovationsziele und die Verbreitung erneuerbarer Energietechnologien und Infrastruktur; dazu gehört auch die Entwicklung von Stromnetzen und Stromspeichern entsprechend dem Zuwachs der erneuerbaren Energien sowie die Solarenergienutzung der geeigneten Dachflächen
3. Die Sicherstellung einer menschen- und naturverträglichen Allokation in der Fläche, so dass der Schutz der Bevölkerung und der empfindlichen Naturressourcen garantiert und so wenig Fläche wie möglich für den raumgreifenden Prozess der Energiewende in Anspruch genommen werden muss. Dabei ist ein verantwortungsvoller Umgang mit den Reserven für die Energiewende sowie eine angemessene Beteiligung der politischen Instanzen auf Landes-, Regions- und Gemeindeebene sowie der Bevölkerung von großer Bedeutung.

Da sich die Handlungsbereiche wie kommunizierende Röhren verhalten, müssen Abweichungen von den Anforderungen in dem einen Bereich umso stärker in den jeweils anderen oder in der Reserve aufgefangen werden, wenn das Ziel einer möglichst hohen Naturverträglichkeit erreicht werden soll.

Die flexible Umsetzung der Energiewende erfordert, dass die oben beschriebenen Reserven für eine naturverträgliche Energieversorgung aus 100 % erneuerbaren Energien möglichst zielgerichtet, effizient und naturverträglich mobilisiert werden. Dies sollte im Zusammenspiel mit den oben genannten Haupthandlungsfeldern geschehen. Zwar sollte zum Beispiel die Nutzung aller Dächer in Deutschland für Photovoltaik mit allen verfügbaren Mitteln angestrebt werden. Wenn dieses ambitionierte Ziel jedoch absehbar verfehlt wird, sollte klar sein, wo und wie auf die Reserven zurückgegriffen wird. Die Reserve sichert die Energiewende ab, sollte aber nicht von der Herausforderung entbinden, die Strategien in den drei Zielbereichen mit höchster Sorgfalt und größtem Engagement zu entwickeln und zu beobachten, ob deren Anwendung von Erfolg gekrönt ist. Hierzu ist es erforderlich, weiteres Wissen über ihre naturverträgliche Einbindung zu gewinnen.

Der gesamte Prozess der Energiewende muss in hohem Maße iterativ sein und immer wieder Maßnahmenanpassungen in Reaktion auf die Entwicklung und Re-Orientierung auf das Ziel im Jahr 2050 ermöglichen.

9.2 Handlungsbereich Reduzierung des Energiebedarfs

Die Berechnung der Szenarien zeigt, dass eine vollständige erneuerbare Energieversorgung in allen Sektoren nur dann erreicht werden kann, wenn der Energiebedarf deutlich reduziert und die sehr ambitionierte Strombedarfsentwicklung erreicht wird.

Um die Ziele der Energiewende umzusetzen, sollten Infrastruktur, Mobilität und Bebauung in großem Maßstab umgestellt werden (vgl. Kap. 2.2). Diese Ziele könnten in eine Transformation unserer Städte zu „Smart Cities“ eingebettet werden: Die Siedlungen sollen effizienter, technologisch fortschrittlicher, grüner und sozial inklusiver werden. Die Umstellung auf E-Mobilität sowie stadtplanerische Maßnahmen zu einer Stadt der kurzen Wege sind darin eingeschlossen. Gebäude für Wohnen, Gewerbe und Industrie werden umgestaltet (Dämmung, Ersatz von Klimaanlage durch andere Systeme des Temperatúrausgleichs) und Neubauten aus klimaschonenden Rohstoffen wie Holz und Karbonfasern gebaut. Im Jahr 2050 werden circa 70 % der Weltbevölkerung in Städten leben. Städte entscheiden damit über das Gelingen der Klima- und Energiewende. Auch in Deutschland gibt es einen Trend zur weiteren Urbanisierung in den Metropolregionen (EICKER 2016, Anhang 6.3).

Die Entwicklung hin zu Smart Cities ist noch nicht genau beschrieben und in ihrer zeitlichen Umsetzbarkeit noch nicht geplant. Hier ist eine breite Förderung transdisziplinärer Forschung und Entwicklung angezeigt, die Erprobungsvorhaben mit Best-Practice-Beispielen beinhaltet.

Bei allen Transformationsmaßnahmen sollten die Weichen so gestellt werden, dass keine „Lock-in-Effekte“ eintreten, die kurzfristig sinnvolle Maßnahmen für lange Zeit perpetuieren. So ist Erdgas klimaschonender als Kohle und bietet sich für eine kurzfristige Einsparung von Klimagasen an. Daher werden z. B. Gas-Brennwertthermen derzeit noch gefördert. Hinsichtlich des Ziels für 2050 ist es aber wenig sinnvoll, an der Förderung festzuhalten, da die Thermen z. T. eine längere Lebensdauer haben können als 25 Jahre und die Bindung an das System „Erdgas“ insbesondere im Bereich Gebäudewärme nicht zielführend wäre. In der Konsequenz muss bei jedem staatlichen Impuls also nicht nur ein zielorientierter Pfad ver-

folgt, sondern ebenfalls überlegt werden, ob absehbar ungeeignete Pfade vermieden werden können.

Staatliches Eingreifen in die Kauf- oder Mobilitätsentscheidungen der Menschen sollte also schon heute auf übermorgen ausgerichtet sein (z. B. Investitionen in Elektromobilität im motorisierten Individualverkehr anstelle von Filtern oder Biokraftstoffen). Um Gebäudebesitzer (Kleinimmobilienbesitzer wie Unternehmen) dazu zu bewegen, ihre Häuser und Anlagen energetisch zu optimieren, ist eine Kombination aus rechtlichen Vorschriften und starken Anreizen notwendig. In der Praxis werden beispielsweise Veränderungen von Heizungsanlagen und der Aufwand, das Haus zu dämmen, bisher häufig vermieden (vgl. BERTRAM 2017, Anhang 6.1). Der Erfolg der Sanierung des Altbestandes ist deshalb mit großen Unsicherheiten behaftet. In Neubaugebieten könnten entsprechend dem Energieeinsparungsgesetz, der Energieeinsparungsverordnung oder dem Gesetz zur Förderung erneuerbarer Energien im Wärmebereich Bauvorschriften erlassen werden.

Für alle Baumaterialien und Geräte könnten des Weiteren Produktnormen erlassen werden, die auch die Energiebilanz einbeziehen. Rebound-Effekte, also Nachfrageerhöhungen aufgrund von Effizienzsteigerungen, müssen vorausgesehen und vor allem durch ökonomische Instrumente verhindert werden. Geeignete Mittel dazu sind z. B. Steuern oder Abgaben, damit aufgrund von Effizienzverbesserungen (geringere Stromverbräuche, längere Laufzeiten etc.) nicht mehr Geräte oder diese häufiger verwendet werden und damit der Stromverbrauch steigt.

Sehr generell und ungezielt, aber unterstützend wirkende Hintergrundmaßnahmen könnten die Einführung einer CO₂-gebundenen Energiesteuer sein oder eine allgemein wirksame Abgabe auf Treibhausgasemissionen. Solche Maßnahmen würden CO₂-arme erneuerbare Energien gegenüber anderen Optionen attraktiver machen, Anreize für CO₂-sparende Techniken, Bauweisen etc. setzen und gleichzeitig Rebound-Probleme verhindern. Allerdings sind solche Lösungen nicht unstrittig und sehr in die Zukunft weisend, weil sie mit dem derzeitigen (auch europarechtlich vorgegebenen) Emissionshandelssystem abgestimmt werden müssten.

9.3 Handlungsbereich Erreichen der technischen Innovationsziele und Verbreitung der erneuerbaren Energie-Technologien

Im Bereich der Technologieentwicklung ist die Forschung derzeit dadurch gehemmt, dass prinzipiell erfolgversprechende Ideen unter Kostengesichtspunkten nicht wettbewerbsfähig erscheinen und daher nicht mit entsprechendem Nachdruck weiterentwickelt werden. Um die anspruchsvollen Ziele im Bereich der Technikentwicklung zu erreichen, ist es aber notwendig, alle Möglichkeiten auszuloten und die Kostenfrage nicht zum alleinigen Kriterium zu machen. Sehr wichtig erscheint in diesem Zusammenhang, dass der Übergang in die Praxis gefördert wird – trotz zunächst mangelnder Rentabilität. Die Vergangenheit hat gezeigt, dass hohe Kostensenkungspotenziale (z.B. im Bereich der Photovoltaik) durch eine gezielte Förderung erreicht werden können.

Grundsätzlich werden in vielen Technologiebereichen aufgrund der sukzessiven Entwicklung zunächst Übergangslösungen gewählt, die im Zieljahr 2050 nicht mehr zum Einsatz kommen. Ein Beispiel hierfür ist die Nutzung von Bioenergie aus Energiepflanzenanbau als Regelenergie, solange technische Speicher noch nicht ausreichend leistungsfähig sind (vgl. Kap. 2.7). In dieser Umstellungsphase kann es notwendig werden, zunächst mehr Flächen für die Nutzung erneuerbarer Energiequellen zu nutzen, als im Zielzustand notwendig. Dar-

aus resultiert, dass auch auf eine schnelle und problemlose Rückbaubarkeit der Anlagen geachtet werden sollte. Der sehr langsam verlaufende Ausstieg aus der fossilen Energieerzeugung und die hohe Auslastung insbesondere der unflexiblen Kohlekraftwerke im derzeitigen Energiesystem behindern nicht nur eine Reduktion der deutschen Treibhausgasemissionen und damit das 2-Grad-Ziel (SRU 2017), die großen Kapazitäten der fossilen Kraftwerke hemmen auch eine rentable Weiterentwicklung und Implementation der Speicher sowie Mittel- und Niederspannungsnetze. Dabei sind hier bereits technische erfolgversprechende und verlässlich arbeitende Lösungen verfügbar. Dadurch bleiben große Mengen erneuerbarer Energie in bilanziellen Überschusszeiten ungenutzt.

Eine gezielte Weiterentwicklung und Unterstützung der Forschung zur Steigerung der Naturverträglichkeit, Energieeffizienz und Speicherkapazität sowie zum Ausbau der Leitungstechnologie würde in besonderem Maße erfolgen, indem Verbundvorhaben zwischen technischen und ökologisch-planerischen Disziplinen gefördert würden. Die derzeit mehr oder weniger getrennt laufenden Ressort-Förderschienen sind in dieser Hinsicht kontraproduktiv. Vor allem in folgenden Bereichen erscheinen weitere Untersuchungen besonders notwendig:

Weiterentwicklung mensch- und naturverträglicher Anlagen

Die aktuell übliche Windenergieanlage aus drei Rotorblättern in bis zu 200 m Höhe wird derzeit als effizienteste Technologie bezeichnet (STOEVE SANDT 2016, Anhang 6.8), da hiermit die größtmögliche kinetische Energie genutzt werden kann. Ansätze zur Verringerung der Auswirkungen herkömmlicher Anlagen sind derzeit in der Diskussion, ihre Wirksamkeit aber teilweise noch nicht belegt. So wird zur Reduktion der Schlagopfer von Windenergieanlagen die Verringerung der Rotorgeschwindigkeit (THOMSEN mdl. 2017) ebenso diskutiert wie art-spezifische Abschaltungen, die regional festgelegt werden (z. B. während des Vogelzugs bzw. in bestimmten sensiblen Entwicklungsphasen) (BUND 2016). Eine sich derzeit in der Erprobung befindliche Innovation (DT-BIRD) setzt darauf, dass die Rotorblätter bei Anflug eines Vogels abdrehen, aber weiterlaufen und so die langen Reaktionszeiten der Anlagen umgangen werden (DT-Bat 2017). Eine intelligente Steuerung der Anlagen zur Vermeidung von Fledermausschlagschäden hat bereits Eingang in die Praxis gefunden (vgl. Kap. 8.2 und BRINKMANN et al. 2011). Auch eine Reduzierung des Schalleistungspegels kann realistisch erreicht werden, ebenso ist eine bedarfsgerechte Kennzeichnung der Anlagen möglich, mit der die Störung der Bevölkerung durch die Befeuerung der Anlagen reduziert werden kann.

Abweichende Technologien wie zum Beispiel Vertikalachsen-Windenergieanlagen mit geringeren Auswirkungen auf die Biodiversität und das Landschaftsbild sind nur im Bereich der Kleinwindanlagen zu finden und bringen aufgrund der geringen Höhe und Rotordurchmesser einen deutlich reduzierten Stromertrag. Da sie aber auch in bebautem Gelände errichtet werden können, wären die Eingriffe in die Natur minimal und sie könnten zu einer dezentralen Energieversorgung und einer Netzentlastung beitragen (STOEVE SANDT 2016: 10, Anhang 6.8).

Weiterer Forschungsbedarf besteht z. B. auch im Bereich der Höhen-Windenergieanlagen (Drachen), die in einer Höhe von mehr als 300 m Strom produzieren sollen. Hierzu gehören drachenartige Anlagen, in denen durch das Auf- und Absteigen eines Drachens ein Generator betrieben wird, oder Anlagen, die einen auf Schienen befindlichen Generator bewegen, sowie reine Fluganlagen (STOEVE SANDT 2016: 12, Anhang 6.8). Bisher hat kein Entwicklungskonzept eine Marktreife erreicht und auch rechtliche Fragen in Bezug auf die Flughöhe und anderen Flugbetrieb sind noch ungeklärt. Auch die Funktionsfähigkeit dieser Anlagen ist

noch nicht gesichert (STOEVE SANDT 2016: 12, Anhang 6.8). Bei der Weiterentwicklung der Technologie sollten die Anforderungen des Schutzes von Mensch und Natur einbezogen werden, um die Einsetzbarkeit der Technologie in der Landschaft zu gewährleisten.

Weiterentwicklung der Netztechnologie

Auch der notwendige massive Umbau der Stromnetze ist mit Auswirkungen auf die Biodiversität und das Landschaftsbild verbunden. Eine Weiterentwicklung der Netztechnologie sollte zum Ziel haben, diese Auswirkungen zu reduzieren. Möglich ist dies z. B. durch den Einsatz von supraleitenden Kabeln, die für die Mittel- und Hochspannung an der Schwelle zur Kommerzialisierung stehen (NOE 2016, Anhang 6.6). Für die Höchstspannung von 380 kV sind supraleitende Kabel bisher nicht kommerziell verfügbar. Grundsätzlich wird die Weiterentwicklung hin zu 380 kV aber als in wenigen Jahren möglich eingeschätzt (NOE 2016, Anhang 6.6). Wesentliche Vorteile von supraleitenden Kabeln 380 kV gegenüber konventionellen Kabeln in Bezug auf Umweltaspekte sind eine etwa 5–10-fach geringere Trassenbreite sowie die Reduzierung der elektromagnetischen Außenwirkung und der Bodenerwärmung.

Zu beachten ist allerdings die Kühlung der Kabel. Aktuell sind die Einzellängen ohne Zwischenkühlung auf einige wenige Kilometer begrenzt, so dass ein erster vielversprechender Einsatz supraleitender Kabel bei der Teilerdverkabelung von 380-kV-Freileitungen erfolgen könnte (NOE 2016, Anhang 6.6). Eine Voraussetzung für einen effizienten und zielgerichteten Netzausbau wäre allerdings, dass die Netzbetreiber ihre Daten bereitstellen.

Weiterentwicklung der Speichertechnologien und Implementierung intelligenter Netze

Die Frage der passenden Speichertechnologie ist sehr komplex und konnte nur im Ansatz in die Entwicklung der Szenarien aufgenommen werden. Über die Speichertechnologie ist der Ausgleich von Unterschieden zwischen Erzeugung und Bedarf im Tag/Nacht-Verlauf (z. B. bei Photovoltaiknutzung oder Bedarfsspitzen der Stromnutzung am Abend) sowie im Verlauf der Jahreszeiten (z. B. bei hohen Strombedarfen für Wärmepumpen im Winter) notwendig. Photovoltaikanlagen unterliegen den jahreszeitlich bedingten Schwankungen des solaren Dargebotes, die teilweise durch die jahreszeitlich bedingten Schwankungen im Winddargebot beim Einsatz von Windenergieanlagen ausgeglichen werden. Darüber hinaus müssen Dargebotsausfälle von mehreren Tagen überbrückt werden, wenn ungünstige Wetterlagen mit wenig Wind und starker Bewölkung vorherrschen (sog. Dunkelflaute). Ebenso unterliegen die Jahreserträge der Windenergieanlagen Schwankungen. Durch eine geeignete Laststeuerung (sog. Demand-Side-Management) und den ergänzenden Einsatz von Energiespeichern sollte die Installation von Überkapazitäten so weit wie möglich vermieden und damit einem höheren Flächenbedarf entgegengewirkt werden.

Großer Forschungsbedarf besteht daher weiterhin in der Integration und Dimensionierung der Speichertechnologien auf den verschiedenen Netzebenen: einerseits erzeugernahe und kleinskalige Redox-Flow-Systeme für die Photovoltaiknutzung, andererseits großskalige Pumpspeicher oder H₂-basierte Speichersysteme. Diese stellen bei sehr großen Speicherbedarfen im Terawattstundenbereich nach jetzigem Kenntnisstand die einzige Möglichkeit zur Energiespeicherung dar, da für die Pumpspeicher die verfügbaren Potenziale ausgeschöpft wären (HANKE-RAUSCHENBACH 2016, Anhang 6.5).

Demand-Side-Management (DSM) bzw. Demand-Response (DR) erfordern darüber hinaus intelligente Stromnetze, die die Steuerung von Erzeugern, Verbrauchern und Energieüber-

tragung miteinander vernetzen. Aufgrund der großen Bedeutung von Informations- und Kommunikationstechnologien für diese Transformation wird in diesem Zusammenhang auch von einem „Internet der Energie“ gesprochen (BDI 2008). Dies führt dazu, dass in Zukunft das klassische Feld der Energieversorgung zunehmend auf IT-Anwendungen sowie Informations- und Kommunikationstechnologien angewiesen sein wird. Energieversorgungsunternehmen und Stadtwerke werden also in Zukunft eine wachsende Anzahl von Diensten rund um das Objektmanagement wie den Betrieb eines Gesamtenergiesystems auf Gebäudeebene in Verbindung mit (flexiblen) Tarifvorteilen anbieten (BMWi 2014).

9.4 Handlungsbereich mensch- und naturverträgliche Allokation in der Fläche

Neben den Anstrengungen im Bereich Energieeinsparung und Energieerzeugung ist eine zielgebundene flexible Allokation der Anlagen in der Fläche der dritte Handlungsbereich, um die Energiewende mensch- und naturverträglich umzusetzen. Hierzu ist eine duale Strategie erforderlich.

Im Rahmen der ersten strategischen Komponente sollten einerseits rechtliche Vorgaben etabliert werden, die die Träger der räumlichen Planung bzw. der Zulassung von Anlagen an regionalisierte quantitative Ziele binden, um bundesweit die Ziele der Energiewende zu erreichen. Außerdem sind finanzielle Anreize für Vorhabenträger notwendig, soweit die naturverträglichen Technologien noch nicht rentabel betrieben werden können.

Während diese Strategiekomponente zunächst einen Top-down-Ansatz von der Bundesebene verlangt – denn sie ist für die Einhaltung der Klimaabkommen verantwortlich –, sollten andererseits in einer zweiten strategischen Komponente Bottom-up-Initiativen der regionalen bzw. lokalen Ebene ermöglicht werden, die einen breit interpretierten Entscheidungsspielraum über das Wo und Wie auf lokaler Ebene aufzeigen. Dieser Entscheidungsspielraum wird in dem hier vorgestellten extrem anspruchsvollen Szenarien-Konzept durch die Reserve ermöglicht (vgl. Kap. 8.5). So sind viele Gebiete, die jetzt ausgenommen wurden, im Prinzip durch Anlagen nutzbar, wenn dies vor Ort mensch- und naturverträglich sowie unter Teilhabe der lokalen Bevölkerung partizipativ ausgestaltet wird. Voraussetzung sind ausreichende Informationen über die Empfindlichkeiten und den Wert des Naturhaushaltes, der Biodiversität und des Landschaftsbildes sowie Nutzungsrestriktionen für Gebiete mit überlokaler/-regionaler Bedeutung.

Eine solche duale Strategie hätte einen hohen kommunikativen und demokratischen Wert für die Unterstützung und Teilhabe an der Energiewende. Sie lässt darauf hoffen, dass Regionen und Gemeinden sich ihrer Verantwortung im Rahmen des Gesamtzieles bewusst werden und gleichzeitig ihre Entscheidungshoheit in raumplanerischen bzw. Flächennutzungsfragen nicht aufgeben müssen. Die Alternative bestünde in einem stärkeren Zugriff der Bundesraumordnung. Dieses würde aber eine Verfassungsänderung erfordern, die derzeit nicht sehr chancenreich zu sein scheint (GERMELMANN 2017, Anhang 6.4).

Voraussetzung für eine solche duale Strategie wäre die Zuordnung von bundesweiten Zielvorgaben für die Erzeugung erneuerbarer Energien auf die politischen Entscheidungsebenen der Länder, Regionen und gegebenenfalls Gemeinden auf Grundlage naturverträglich nutzbarer Wind- und Solarpotenziale sowie der verfügbaren Fläche bzw. Bevölkerungszahl im jeweiligen Bezugsgebiet. In der Summe müssten die als lokale/regionale Zielvorgaben zu

erbringenden Energiemengen den bundesweiten Zielwert ergeben, so dass auf jeder Ebene dann deutlich würde, ob die bundesweiten Ziele erreicht bzw. wie stark sie verfehlt oder übererfüllt würden (vgl. Abb. 75).

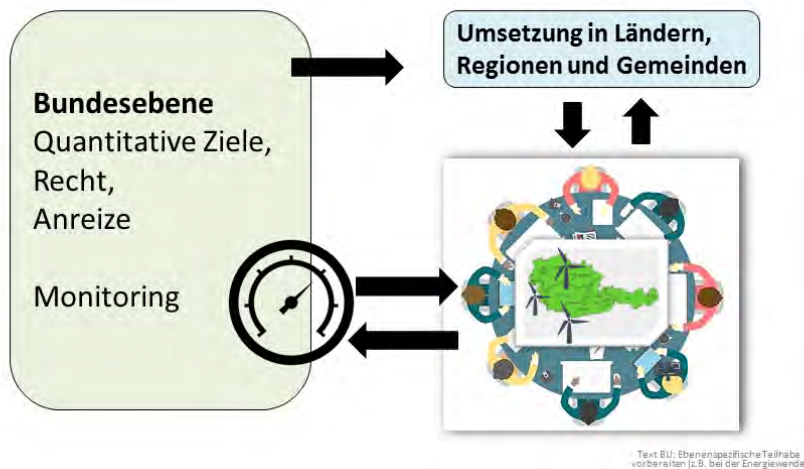


Abb. 75: Zusammenspiel der politischen Entscheidungsebenen bei der Umsetzung bundesweiter Ziele und Monitoring

Zu der den unteren Planungsebenen gewährten Entscheidungsfreiheit sollte auch gehören, dass Regionen, die mehr erneuerbare Energien produzieren wollen als vorgesehen, den zusätzlichen Strom ggf. denjenigen Regionen virtuell zur Verfügung stellen können, die aus bestimmten Gründen ihre Ziele nicht erfüllen können oder wollen. Auf Bundesebene ließe sich kontinuierlich ein Nachsteuerungsbedarf ableiten, indem die erreichten (Zwischen-) Ergebnisse mit den gesetzten Rahmenbedingungen und den (Etappen-)Zielen der Energiewende verglichen werden.

Umsetzung der nationalen Biodiversitätsstrategie

Grundlage für die „Naturverträglichkeit“ der Energiewende ist, dass die Biodiversitätsstrategie durch Ausweisung von Schutzgebieten im Jahr 2050 umgesetzt ist. Für den Naturschutz auf allen staatlichen und der kommunalen Ebene ist in dieser Hinsicht noch einiges zu tun. Flächen, die eine Relevanz für die Erhaltung und Entwicklung von Natur und Landschaft haben, die aber nicht ausreichend geschützt sind (viele der in dieser Studie als Flächen mit hohem Raumwiderstand beschriebene Flächen), müssten durch die Ausweitung des Flächenschutzes wirksam geschützt werden, bevor die Windenergieanlagen installiert sind. Ansonsten sind die Ziele z. B. bzgl. eines wirksamen Schutzes von Vögeln und Fledermäusen hinfällig. Die Instrumente für einen entsprechenden Flächenschutz sind vorhanden und müssten lediglich vor allem von den Ländern und Kreisen angewendet werden. Eine diesbezügliche Flächenkulisse kann von der Bundesebene vorgeschlagen werden. Sollte das EEG längerfristig bestehen bleiben, kann eine solche Flächenkulisse ebenfalls zur Grundlage einer Förderung nach dem EEG gemacht werden.

Bundesrechtliche Voraussetzungen und Anreize für eine duale Strategie (Raumordnungsgesetz (ROG), Baugesetzbuch (BauGB))

Rechtlich ist die Sicherung einer zielgebundenen flexiblen Allokation in der Fläche möglicherweise am einfachsten durch die Etablierung einer bundeseinheitlichen **Fachplanung Energieerzeugung** zu erreichen, analog zur Netzentwicklungsplanung. Die Fachplanung, die typischerweise über Sachnähe und Finanzmittel verfügt, könnte sich allein auf die jeweiligen Fachkompetenzen stützen (z. B. Recht der Wirtschaft einschließlich der Energieversorgung nach Art. 74 Abs. 1 Nr. 11 GG). Sie würde Ziele und Rahmen für die Entwicklung erneuerbarer Energien in den Ländern und Regionen vorgeben. Die Einrichtung einer solchen Fachplanung bedarf allerdings einer vertiefenden Untersuchung bzgl. der rechtlichen und politischen Umsetzbarkeit (vgl. Abb. 76).

Notwendig ist in diesem Zusammenhang die gemeinsame Betrachtung der Nutzung von erneuerbaren Energien und des Netzausbaus, damit dieser nicht völlig hinter der Entwicklung der Erzeugung von erneuerbaren Energien herhinkt und um Planungssicherheit zu schaffen. Eine einfache Ergänzung des **Netzausbaubeschleunigungsgesetzes** (NABEG) durch einen Teil zu Energiequellen bzw. die Anlageplanung ist nicht möglich, da die Anlagen im Vergleich zu den Netzen einen weniger großräumigen, Ländergrenzen-überschreitenden Charakter haben und nicht zwingend abschließend durch den Bund geregelt werden müssen. Durch verbindliche quantitative Vorgaben für die Länder und eine Verpflichtung zur Umsetzung könnte aber ggf. eine Kompensation für mangelnde Bewegungsfreiheit im Rahmen der Bundesraumordnung geschaffen werden.

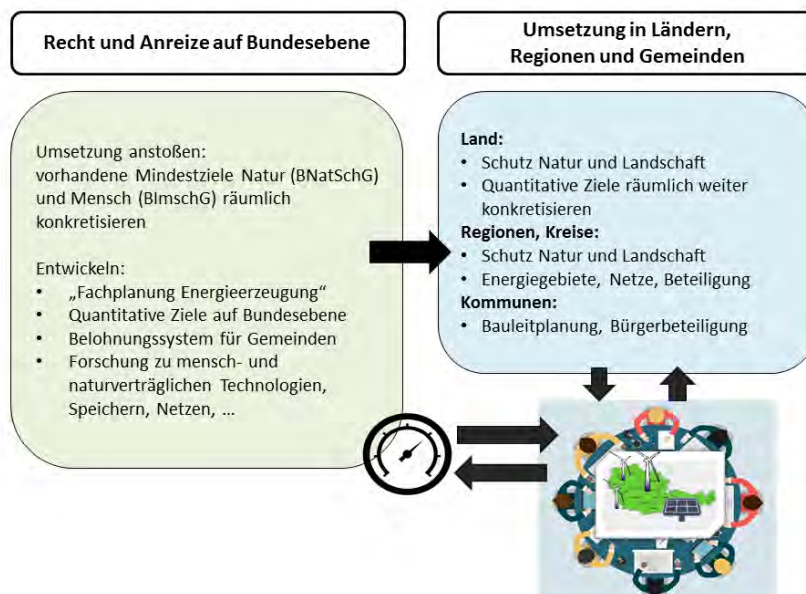


Abb. 76: Regelungsoptionen Bund und Umsetzung in Ländern, Regionen und Kommunen

Wenig aussichtsreich ist es derzeit, flächenkonkrete Ziele über die Raumordnung zu erreichen und sich dabei auf die Raumordnungskompetenzen des Bundes zu stützen. Allerdings könnten die Steuerungsmöglichkeiten des **Raumordnungsrechts** zukünftig für eine menschen- und naturverträgliche Integration der erneuerbaren Energien in den Raum gestärkt werden. Insbesondere wäre es dem Bund auf Grundlage des Art. 74 Abs. 1 Nr. 31 GG möglich, eine stärkere Konkretisierung der Belange der Raumordnung nach § 2 ROG einschließ-

lich einer bislang fehlenden Hierarchisierung und wechselseitigen Gewichtung dieser Belange vorzugeben. Hierin besteht auch eine Möglichkeit, den Ländern quantitative, nicht raumkonkrete Ziele und die Pflicht zur Integration der Belange von Natur und Mensch vorzugeben. Denkbar wäre in diesem Zusammenhang auch die Etablierung von auf Flächennutzung durch erneuerbare Energien bezogenen *Planungspflichten der Länder* nach § 8 Abs. 5 ROG (vgl. GERMELMANN 2017, Anhang 6.4).

Ferner könnte der Bund auf der Kompetenzgrundlage des Art. 74 Abs. 1 Nr. 31 GG Teile der Landes-Raumordnungsplanung übernehmen, ohne an das strikte Erfordernis der gesamtstaatlichen Bedeutung gebunden zu sein, denn die Verfassungsnorm erlaubt auch inhaltliche Vollregelungen. Hiernach wäre es dem Bund möglich, über die derzeit nach wie vor rahmenartigen Vorgaben hinaus eigene landesbezogene Planungen vorzunehmen. Verfassungsrechtlich kann der Bund aufgrund seiner ausschließlichen Kompetenz für die gesamtstaatliche Planung inhaltlich weitergehende Regelungen schaffen, als er dies im derzeitigen ROG tut. Dies bedeutet, dass er ähnlich den Raumordnungsplänen für die Ausschließliche Wirtschaftszone in der Nord- und Ostsee nach § 17 Abs. 3 ROG auch an Land *Bundes-Raumordnungspläne* erlassen könnte. In diesen wären gesamtstaatlich relevante Festsetzungen möglich, die jedoch stets überörtlich, überfachlich und gesamtstaatsbezogen sein müssten. Auf diese Weise könnten quantitative Ziele für die erneuerbaren Energien etabliert werden, ohne dass diese flächenkonkret vorgegeben würden. Solche Ziele könnten auch die einzelnen Länder stärker binden, jedoch dürfte damit nicht die Landesplanung ersetzt werden. Dies folgt aus der zwingenden Kompetenzgrenze des Gesamtstaatsbezugs. Es besteht ein absoluter Kern von Landesplanungskompetenzen, die aus der bundesstaatlich durch Art. 20 Abs. 1 GG geschützten Eigenstaatlichkeit der Länder folgen und die durch den Bund nicht entzogen werden dürfen. Zudem gestattet die Abweichungsbefugnis nach Art. 72 Abs. 3 Satz 1 Nr. 4 GG den Ländern im Fall des Art. 74 Abs. 1 Nr. 31 GG weitgehende Durchbrechungsmöglichkeiten einer bundesrechtlichen Regelung. Insofern ist das Zusammenspiel von Bund und Ländern auf Kompromisslösungen angelegt (vgl. GERMELMANN 2017, Anhang 6.4).

Verfassungsrechtlich unkritisch dürfte die Regelung eines Details im **Baurecht** sein: Wünschenswert wäre für den Bereich der Windenergie, dass die vorhandene Öffnungsklausel für Abweichungen der Länder im BauGB zurückgenommen würde. Diese Klausel wird derzeit einzig von Bayern genutzt, um höhere Abstände von Windenergieanlagen zu anderen Nutzungen vorzugeben. Dies wirkt sie sich erheblich auf die Produktion erneuerbarer Energien aus: Trotz größerer mensch- und naturverträglich nutzbarer Potenziale sind aktuell nur 0,03 % der bayerischen Landesfläche mit Windenergieanlagen belegt.

Vor allem sollte das BauGB um eine Planungspflicht für Gemeinden (Konzentrationszonen, Eignungsgebiete) ergänzt werden (zu entsprechenden Möglichkeiten im Raumordnungsrecht s.o.). Damit ließe sich ggf. auch der derzeit kontraproduktive §35 BauGB aushebeln, der eine unkontrollierte Errichtung von Windenergie-Einzelanlagen auch in ungeeigneten Gebieten ermöglicht, solange damit überwiegend der Energiebedarf der landwirtschaftlichen Betriebe gedeckt wird.

Um im Gebäudebestand die Implementierung von Solarnutzung oder der Effizienzmaßnahmen (Dämmung) voranzutreiben, könnten außerdem spezialgesetzliche Regelungen für eine ausgleichspflichtige Inhalts- und Schrankenbestimmung des Eigentums geprüft werden (nach dem Modell des Brandschutzes). Es ist allerdings unsicher, ob dies verfassungsrechtlich machbar wäre. Näher zu beleuchten wären auch die Möglichkeiten des Bauordnungs-

rechts. Aussichtsreicher sind in diesem Fall Anreize, die eine schnelle Amortisation der Anlagen in Aussicht stellen.

Verbindung von Ordnungsrecht und Anreizen

Auf der Bundesebene bestehen weitere Ansatzpunkte für die Unterstützung einer Flächenoptimierung durch einen ausgewogenen Mix aus ordnungsrechtlichen und fiskalischen Instrumenten.

Mit dem EEG 2017 existiert bereits ein Instrument der staatlichen Kapazitätsplanung und wettbewerblich basierten Förderung. Das nun eingeführte Ausschreibungssystem muss sich in den nächsten Jahren bewähren, insbesondere auch bezogen auf Probleme der Planungssicherheit für das Erreichen der Etappenziele. Im Falle eines zu niedrigen Ausbaus erneuerbarer Energien wäre das System der Ausschreibungen im EEG allerdings nur schwer umkehrbar. Das EU-Beihilferecht hat eine Ablösung des vorherigen, wettbewerbsverzerrenden Modells verlangt, dessen Folge ein ungesteuertes Wachstum war. Es ist nicht zu erwarten, dass es möglich ist, dahin zurückzukehren (GERMELMANN 2017: 18, Anhang 6.4).

In anderen Bereichen sind jedoch Änderungen des EEG möglich und wünschenswert. Um die Freiflächensolarreserve in der Praxis zu aktivieren, ist es notwendig, die PV-Flächenanforderungen des § 37 Abs. 1 EEG 2017 im Detail zu überprüfen und neu auf eine Verknüpfung von Produktionszielen und naturschutzrechtlichen Anforderungen auszurichten. Anlagenstandorte auf Acker- und Grünland sind in „benachteiligten Gebieten“ entsprechend dem EEG 2017 (§ 37, Abs. 1, Nr. 3. i) wieder möglich. Dies sind Gebiete, auf denen landwirtschaftliche Produktion durch naturbedingte Nachteile behindert ist (BUNDESNETZAGENTUR 2017). Darüber hinaus ist die Errichtung von PV-Freiflächenanlagen weiterhin auf Ackerflächen innerhalb eines 110-m-Randstreifens entlang von Autobahnen und Schienenwegen zulässig (EEG § 37, Abs. 1, Nr. 3. C). Die Beschränkung des Ausbaus auf benachteiligte Gebiete ist in dieser Pauschalität weder unter Flächeneffizienz- noch unter Umweltgesichtspunkten zielführend, und auch nicht bezogen auf das Ziel, auch die Freiflächenphotovoltaik auf Standorte mit dem höchsten Energieertragspotenzial zu lenken. Die Photovoltaik hat die zweithöchste Flächeneffizienz nach der Windenergie und je nach Standort und Vornutzung i.d.R. geringe bis positive bzw. entlastende Umweltwirkungen (vgl. Kap. 3.2). Gerade landwirtschaftlich benachteiligte Gebiete beinhalten jedoch häufig wertvolle Biotope (z.B. Magerasen, mesophiles Grünland, Ackerwildkrautfluren) deren Wert erheblich durch Freiflächen-PV gemindert wird.

Die Bundesländer können individuell durch Rechtsverordnung festlegen, ob und wie viel Ackerland und/oder Grünlandflächen in benachteiligten Gebieten für die Ausschreibungen genutzt werden dürfen (Länderöffnungsklausel nach § 37c EEG 2017). Im Land Baden-Württemberg wurde mit der Öffnungsverordnung (FFÖ-VO vom 17.3.2017) eine pauschale Regelung getroffen, indem pro Kalenderjahr Gebote bis zu einem Umfang von 100 Megawatt auf Acker- und Grünlandflächen bezuschlagt werden können. In der bayerischen Öffnungsverordnung (Verordnung über Gebote für Freiflächenanlagen vom 7.3.2017) sind hingegen Flächenrestriktionen formuliert, indem die pro Kalenderjahr zulässigen 30 Gebote für Acker- und Grünlandflächen nicht abgegeben werden dürfen, wenn sich die Flächen in NATURA 2000-Gebieten oder in gesetzlich geschützten Biotopen befinden. Eine solche Mindeststeuerung ist über das EEG also möglich und sollte unter Berücksichtigung weiterer Restriktionen (z. B. bezüglich des Landschaftsbildes, regional gefährdeter und schutzwürdiger Biotope) in allen Länderöffnungsklauseln umgesetzt werden.

Bereits in der zweiten Ausschreibungsrunde im Juni 2017 hat sich aufgrund der Sonderregelung der Anteil der Auktionsgewinner aus Bayern gegenüber der letzten Auktionsrunde von 16 Prozent auf 56 Prozent mehr als verdreifacht (ROLINK 2017). Der Großteil der Zuschläge der zweiten Ausschreibungsrunde (16 von 32 Gebote) wurde für Ackerland in benachteiligten Gebieten erteilt (BUNDESNETZAGENTUR 2017).

Jegliche Form von finanzieller Förderung durch den Bund sollte zudem daran gebunden werden, dass keine aus Sicht des Naturschutzes wertvollen und empfindlichen Gebiete beeinträchtigt werden. Dieses müsste auch – kurzfristig – im EEG verankert werden.

Wie bereits dargelegt ist es außerdem dringend notwendig, die Förderung erneuerbarer Energien und den Netzausbau besser miteinander zu verzahnen. Die lokale Beispielstudie zum notwendigen Netzausbau in diesem Bericht lässt die Dimension dieser Aufgabe erahnen. Ein Ausbau erneuerbarer Energien ohne sofortiges Nachziehen der Mittel- und Niederspannungsnetze wäre wirkungslos. Es muss deshalb eine frühzeitige Planungssicherheit für die Netzbetreiber hergestellt werden.

Umsetzung in den Ländern, Regionen und Gemeinden

Die quantitativen Vorgaben aus einer neu zu installierenden bundeseinheitlichen **Fachplanung Energieerzeugung** und einem ggf. ergänzten NABEG könnten auf *Landesebene* in die Eignungsgebiete im Landes-Raumordnungsprogramm (LROP) einfließen. In Zukunft sollte dazu noch einmal grundsätzlich das Verhältnis von Bundesfachplanung (NABEG) und der Landesraumordnungsplanung geklärt werden, um die optimale Form der Abstimmung auszuloten. Die Planfeststellung der Energiegebiete und Netze kann unter Auflagen auf die Regionen übertragen werden, denen ein Entscheidungsspielraum eingeräumt werden muss. Diesen könnten sie wiederum an die Gemeinden weitergeben, die sich auf ihr jeweiliges Energieziel verpflichteten. Gleichzeitig müssten die Regionen die aus Naturschutzsicht wertvollen und empfindlichen Gebiete ausreichend schützen (Vorranggebiete, gesch. Landschaftsbestandteile). Die Ausweisung von geschützten Landschaftsbestandteilen kann auch durch die *Gemeinden* über die Nutzung des § 5(2)10 BauGB erfolgen, bevor sie in einem lokalen partizipativen Prozess über den Energiemix und die Wege zur Erfüllung ihres jeweiligen Energieziels entscheiden.

Die Einbeziehung der Bevölkerung in die Frage, welche Energieträger vor Ort für die Energiewende eingesetzt werden sollen und wo diese angesiedelt werden, ist neben der materiellen Teilhabe der Bürger an der Energiewende eine zentrale Voraussetzung einer breit getragenen und akzeptierten Entwicklung. Damit ein solcher Bottom-up-Prozess gelingen kann, ist die Vorgabe von nachvollziehbaren Zielen für die einzelnen Gemeinden ebenso wie die transparente Kommunikation der Rahmenbedingungen und die Kontrolle und Rückspiegelung der kommunalen Entscheidungen in ihrer Wirkung auf die gesamtstaatliche Zielerreichung notwendig (Was wäre, wenn alle so handelten wie wir?). Außerdem könnten Wettbewerbselemente eingeführt werden, z. B. Benchmarks, die den Entscheidungsträgern in Kommunen und Regionen vermitteln, wie sie im Vergleich zu anderen dastehen (siehe zur Wirksamkeit solcher sanften Anstöße oder „Nudging“-Strategien: THALER, SUNSTEIN 2009; KAHNEMAN 2011; V. HAAREN et al.: submitted). Auf diese Weise könnte dem Sankt-Florians-Prinzip (vgl. Abb. 77) entgegengewirkt und die Energiewende zu einer gesamtgesellschaftlichen Bewegung gemacht werden.

Anreize für die Gemeinden, um deren Umsetzungsbereitschaft zu erhöhen, sind ebenfalls wünschenswert. Zu erwägen wäre ein Belohnungssystem für die Gemeinden/Kreise, die die

Ziele erfüllen. Dies ist im Rahmen eines ökologischen kommunalen Finanzausgleichs oder eines eigenen Finanzierungsinstruments denkbar, wie bereits im Kontext der Reduzierung der Flächeninanspruchnahme diskutiert (SRU 2004). Diese Vorschläge müssten am Maßstab des Finanzverfassungsrechts sowie an der Garantie der kommunalen Selbstverwaltung nach Art. 28 Abs. 2 GG geprüft werden. Je nach der konkreten Ausgestaltung könnten auch unionsrechtliche Probleme des Beihilfen- und des Binnenmarktrechts hinzutreten.



Abb. 77: Die Ansiedlung von Windenergieanlagen verstärkt vielerorts soziale Konflikte und trifft auf den Widerstand von Teilen der lokalen Bevölkerung

Unabhängig von einer solchen geforderten Energie-Fachplanung können die Gemeinden bereits heute nach BauGB zwingende Vorgaben für die Installation von Photovoltaik und Energieeinsparmaßnahmen (z. B. Einhaltung von Passivhausstandards) bei der Neuausweisung von Baugebieten erlassen. Dabei sollten lokal die verschiedenen Ansprüche an die Dachflächen wie Stadtbegrünung oder Energieerzeugung auf den Dächern abgewogen werden.

Schließlich könnten auf regionaler und kommunaler Ebene auch die Voraussetzungen dafür geschaffen werden, dass Anlieger von Energieanlagen für etwaige Beeinträchtigungen entschädigt würden bzw. dass Bürgerenergiegesellschaften unterstützt würden.

9.5 Ausblick

Abschließend bleibt festzuhalten, dass eine menschen- und naturverträgliche Energiewende prinzipiell möglich ist und in einem hochentwickelten Land wie Deutschland bei entsprechenden politischen Weichenstellungen auch machbar erscheint. Die Vielzahl der dargestellten Einzelmaßnahmen, Steuerungsmöglichkeiten und –notwendigkeiten für den Umbau des Energiesystems erfordern jedoch eine übergeordnete Steuerung. Als Basis hierfür wird empfohlen, ein wissensbasiertes Messsystem zu installieren, das den Bedarf zur Nachsteuerung anzeigt. Das vorliegende GIS-Modell kann, um die entsprechenden Daten zu Anlagentechnik und Standorten erweitert, hierfür eine erste Keimzelle bilden. Für das Erreichen der Energieeinsparziele ist eine Rückrechnung des Zielzustands auf zeitlich davor liegende Meilensteine notwendig. Die so erzeugten Etappenziele können als Kenngröße herangezogen werden, um die Entwicklung zu überprüfen. Es sollte genau beobachtet werden, ob sich system-

relevante Komponenten wie Energiespeicher oder Netze so entwickeln wie angenommen. So werden Zielverfehlungen frühzeitig sichtbar, um Anpassungsmaßnahmen rechtzeitig möglich zu machen.

Die Nutzung und Rezeption lokaler und regionaler Entscheidungsspielräume hinsichtlich Energiemix, Lokalisierung der Energieanlagen etc. kann mit der Methode des Planspiels auf regionaler und kommunaler Ebene simuliert werden. In einem solchen Rahmen besteht auch die Möglichkeit, die unterschiedlichen vorgeschlagenen Maßnahmen auf ihre Kompatibilität untereinander und mit bestehenden Förderinstrumenten zu untersuchen. Als Grundlage für weitergehende Entwicklungen der Umsetzung sollte das Potenzial der „Reserve“ weiter untersucht und fundiert quantifiziert werden. Besonders wichtig ist zudem, dass ergänzend zu den hier vorgelegten naturschutzfachlichen Betrachtungen die Kosten und Nutzen verschiedener Lösungen untersucht werden. Die Handlungsoptionen und -prioritäten werden damit in weiteren Facetten für die politische Entscheidung aufbereitbar. Schließlich sollten die in den Modellen und Annahmen vorhandenen Unsicherheiten besser beschrieben werden, um adaptive Lösungen zu entwickeln und um die mit den Reserven bereits angelegte Strategie der Definition von Entwicklungskorridoren, statt enger Pfade, weiterzuführen.

Die Transformation des Energiesystems wird sich sicherlich nicht so vollziehen wie in den hier vorgelegten Szenarien beschrieben. Diese stellen das Vorsorgeprinzip konsequent in den Vordergrund und repräsentieren einen auf Risikovermeidung abzielenden sehr strengen Schutz des Menschen und der Natur. Diese Betrachtung aus der spezifischen Sicht des Naturschutzes sollte nicht darauf abzielen, abschließende Lösungskonzepte zu erarbeiten. Sie ist vielmehr als erster explorativer Schritt zu verstehen, der eine Grundlage für eine Diskussion zur Vereinbarkeit anspruchsvoller gesellschaftlicher Ziele und Entwicklungsperspektiven aus Sicht des Naturschutzes liefern soll. In diesem Sinne ermöglichen die Szenarien aber in einer Zusammenschau mit den Reserven und mit anderen Szenarien, die „realistischere“ Varianten darstellen, die transparente Diskussion von Vor- und Nachteilen unterschiedlicher Entwicklungspfade und Lösungsalternativen. Damit dienen die Modellierungsergebnisse und Empfehlungen der Unterstützung von politischen Entscheidungen, sie ersetzen diese aber keinesfalls. Die Szenarien sind in bestimmter Hinsicht ein „Ideal“. Die Wirklichkeit politischer Entscheidungen wird jedoch durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst, die in den Szenarien und Handlungsoptionen nicht berücksichtigt wurden.

Literaturverzeichnis

- 3M DEUTSCHLAND GMBH (Hrsg.) (2011): ACCR-Seile fassen die doppelte Strommenge ohne Austausch der alten Strommasten / Energiewende und Ausbau Erneuerbarer Energien schneller möglich. Stand: 29.11.2011, http://presse.3mdeutschland.de/unternehmen-allgemein/RWTH_Studie_ACCR.html
- 50HERTZ TRANSMISSION GMBH; Amprion GmbH; TenneT TSO GmbH & TransnetBW GmbH (Hrsg.) (2013): Netzentwicklungsplan Strom 2013. Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber. Stand: 02.03.2013, Berlin.
- 50HERTZ TRANSMISSION GMBH; Amprion GmbH; TenneT TSO GmbH & TransnetBW GmbH (Hrsg.) (2014): Szenariorahmen für die Netzentwicklungspläne Strom 2015. Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber, Stand: 30.04.2014, aufgerufen am 27.10.2016, http://www.netzausbau.de/SharedDocs/Downloads/DE/Delta/Szenariorahmen/Szenariorahmen2025_Entwurf.pdf?__blob=publicationFile
- ABB (Hrsg.) (2013): Funktionsweise und Anwendungsgebiete des hybriden DC-Leistungsschalters. Stand: 16.01.2013, aufgerufen am 27.10.2016, [https://www02.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/ad6283a25b3336c6c1257aef00340d6f/\\$file/03_DC-Leistungsschalter_final.pdf](https://www02.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/ad6283a25b3336c6c1257aef00340d6f/$file/03_DC-Leistungsschalter_final.pdf)
- ABB (Hrsg.) (2014a): DoWin1 - Setting a new record with VSC at +/-320 kV and minimizing environmental impact. aufgerufen am 27.10.2016, <http://new.abb.com/systems/hvdc/references/dolwin1>
- ABB (Hrsg.) (2014b): ABB stellt weltweit leistungsstärkstes HGÜ-Kabelsystem vor – Pressemitteilung. Stand 21.08.2014, aufgerufen am 27.10.2016, <http://www.abb.de/cawp/seitp202/4cc53d624c0f1b0cc1257d3b0031505b.aspx>
- ABRAHAM, A., ABEL, T., BOLLINGER-SALZMANN, H., SOMMER-HALDER, K. (2007): Landschaft und Gesundheit. Das Potential einer Verbindung zweier Konzepte. Literaturrecherche zum Thema Landschaft und Gesundheit. - Universität Bern, Institut für Sozial- und Präventivmedizin, Abteilung Gesundheitsforschung
- AEE (2016): Agentur für Erneuerbare Energien. Energiewendeatlas Deutschland 2030. 97 S.
- AGEE STAT (2017): Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2016. http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Entwicklung_der_erneuerbaren_Energien_in_Deutschland/Entwicklung_der_erneuerbaren_energien_in_deutschland_im_jahr_2016.html;jsessionid=ADF563CC6366B0C3C90A891770A47021, aufgerufen am: 15.11.2017
- AGO (2014): Agora Energiewende, Forschungsstelle für Energienetze und Energiespeicher (FENES), Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft RWTH Aachen (IAEW), Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe RWTH Aachen (ISEA), (September 2014) "Stromspeicher in der Energiewende". https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2013/speicher-in-der-energiewende/Agora_Speicherstudie_Web.pdf. Aufgerufen am: 30.08.2017
- ALBRECHT, L. & MÜLLER, J. (2008): Ökologische Leistungen aktiver Mittelwälder - Schatztruhen für seltene Tier- und Pflanzenarten, aber auch Anschauungsobjekt für Waldbaukonzepte. In: LWF aktuell 62/2008, S. 36-38.
- ALEXRK2 (OpenStreetMap Data): Forschungs-Stromnetz.info: Struktur des Stromnetzes – Übertragungsnetz. <http://forschung-stromnetze.info/basisinformationen/struktur-des-stromnetzes/uebertragungsnetz/>. Aufgerufen am: 11.04.2018

- AMPRION GMBH (Hrsg.) (2014): Ultramet. Gleichstromverbindung von Osterath nach Philippsburg, Dortmund. Aufgerufen am 27.10.2016, http://www.amprion.net/sites/default/files/LR_Web_Broschuere_Ultramet_A06_JZO.pdf
- ARGE (2007): Leitfaden zur Berücksichtigung von Umweltbelangen bei der Planung von PV-Freiflächenanlagen. Stand: 28.11.2007, aufgerufen am 16. 03.2016, [http://www.naturschutzstandards-erneuerbarer-energien.de/images/literatur/pv_leitfaden\[1\].pdf](http://www.naturschutzstandards-erneuerbarer-energien.de/images/literatur/pv_leitfaden[1].pdf)
- ATLAS DEUTSCHER BRUTVOGELARTEN (2014): Atlas deutscher Brutvogelarten (ADEBAR). Atlas of German Breeding Birds. Stiftung Vogelmonitoring Deutschland unter dem Dachverband Deutscher Avifaunisten Münster. 800 S.
- AXMANN, G. (2013): Beauty of Power. Grid Expo/Thema1 GmbH. Vortrag auf dem Umweltdialog 2013 der BNetzA in Hannover. Aufgerufen am 27.10.2016, <http://www.netzausbau.de/SharedDocs/Downloads/DE/Veranstaltungen/2013/Umweltdialog/VortragAx-mann.pdf>
- BAUGB: Baugesetzbuch. Ausfertigungsdatum 23.06.1960. Neugefasst durch Bek. V. 3.11.2017 I 3634
- BBPlG: Gesetz über den Bundesbedarfsplan (Bundesbedarfsplangesetz). Ausfertigungsdatum 23.07.2013. Zuletzt geändert durch Art. 12 G v. 26.07.2016 I 1789
- BDEW – BUNDESVERBAND DER ENERGIE- UND WASSERWIRTSCHAFT E.V. (2011): Technische Anschlussbedingungen für den Anschluss an das Niederspannungsnetz (TAB 2007), Technische Richtlinie 2011
- BDEW – BUNDESVERBAND DER ENERGIE- UND WASSERWIRTSCHAFT E.V. (Hrsg.) (2013): Länge der Stromnetze nach Spannungsebenen 2013. Aufgerufen am 27.10.2016, [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/8FE409A16ED16AC2C1257D2B0027B169/\\$file/140805%20BDEW%20neue%20Zahlen%20zum%20deutschen%20Stromnetz%20Anhang.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/8FE409A16ED16AC2C1257D2B0027B169/$file/140805%20BDEW%20neue%20Zahlen%20zum%20deutschen%20Stromnetz%20Anhang.pdf)
- BDI (2008): BDI Internet der Energie. <http://www.bdi-ide.de/>.
- BECKER, A.; LÜHN, T.; MOHRMANN, M.; SCHLÖMER, G.; SCHMIDTMANN, G.; SCHNEIDER, D. & SCHNIEDER, R. (2014): Netzausbauvarianten in Niederspannungsverteilnetzen - Regelbare Ortsnetztransformatoren in Konkurrenz zu konventionellen Netzausbaumaßnahmen. 1. Auflage, Göttingen: Cuvillier Verlag.
- BfN (2008): Nature Data 2008
- BfN (2010) Länderübergreifender Biotopverbund. Naturschutz und Biologische Vielfalt Heft 96. ISBN: 978-3-7843-3996-2. 192S.
- BfN (2011): Windkraft über Wald. Positionspapier des Bundesamtes für Naturschutz. Stand: Juli 2011, aufgerufen am 26.10.16, https://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/themen/erneuerbareenergien/bfn_position_wea_ueber_wald.pdf
- BfN (2013): Studie Vögel in Deutschland 2012 erschienen. Stand: 25.10.2013, aufgerufen am 15.07.2017: www.bfn.de/0401_pm.html?&no_cache=1&tx_ttnews%5Btt_news%5D=4742&cHash=5259dcf37a6e3af7a1ea5d22a46547c8.
- BfN (2015a): Nationalparke. Aufgerufen am 26.10.2016, https://www.bfn.de/0308_nlp.html
- BfN (2015b): Umsetzung des 2 %-Ziels für Wildnisgebiete aus der Nationalen Biodiversitätsstrategie. BfN –Skripten 422

- BImSchG: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umweltwirkungen durch Luftverunreinigung, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz). Ausfertigungsdatum 15.03.1974. Neugefasst durch Bek. v. 17.5.2013 I 1274. Zuletzt geändert durch Art. 3 G v. 18.7.2017 I 2771
- BINDER, T. LEUKEFELD, T., PAUSCHINGER, T., MIEDANER, O. (2014): Solarthermie im Denkmalschutz. Handlungsmöglichkeiten für Hauseigner und Architekten. UrbanSol⁺
- BLUME, H.-P., BRÜMMER, G. W., HORN, R., KANDELER, E., KÖGEL-KNABNER, I., KRETZSCHMAR, R., STAHR, K., THIELE-BRUHN, S., WELP, G. & WILKE, B.-M. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg: 569 S.
- BLWE (2012): Handreichung zu Windenergieanlagen an Infrastrukturtrassen. Berlin.
- BMEL 2014: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Der Wald in Deutschland - Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur", https://bundeswaldinventur.de/fileadmin/SITE_MASTER/content/Dokumente/Downloads/BMEL_Wald_Broschuere.pdf. Aufgerufen am: 19.05.2017
- BMU (2004) (Hrsg.): J. Nitsch, W. Krewitt, M. Nast, M. Pehnt, G. Reinhardt, M. Fishedick et al: „Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland“. Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), DLR Stuttgart, IFEU Heidelberg, WI Wuppertal, März 2004
- BMU (2012): DLR, Fraunhofer IWES, IfnE: "Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energie in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global" (Leitstudie 2011 - Schlussbericht an das BMU).
- BMUB (Hrsg.) (2007): Nationale Strategie zur Biologischen Vielfalt. Stand: 07. 11. 2007, aufgerufen am 27.10.2016, http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/nationale_strategie_biologische_vielfalt_2015_bf.pdf
- BMU (2008) (Hrsg.): Nitsch, J.: „Leitstudie 2008 - Weiterentwicklung der Ausbaustrategie Erneuerbare Energien.“ Untersuchung im Auftrag des BMU, in Zusammenarbeit mit DLR Stuttgart, Abt. Systemanalyse und Technikbewertung, Stuttgart, Oktober 2008
- BMU (2016): DLR, Öko-Institut e.V., Infras AG, Ifeu: "Endbericht Renewbility III: Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors " (Leitstudie 2016 - Schlussbericht an das BMU). <http://www.renewbility.de/wp-content/uploads/Renewbility_III_Endbericht.pdf. Aufgerufen am: 07.07.2017
- BMUB (2017): Klärschlamm. Stand 06.07.2017, aufgerufen am 20.07.2017. www.bmub.bund.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/abfallarten-abfallstroeme/klaerschlamm/
- BMUB & BfN (2009): Auenzustandsbericht. Flussauen in Deutschland. 35S.
- BMWi (2014): Dossier – Energiewende: Die nächste Phase der Energiewende kann beginnen. <http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/energiewende.html>
- BMWi (2016): Energiedaten: Gesamtausgabe. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html>. Aufgerufen am: 04.06.2017
- BMWi (2017): Offshore-Projekte. Aufgerufen am: 27.04.2017. <http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Technologien/Windenergie-auf-See/Offshore-Projekte/offshore-projekte.html;jsessionid=B84D266830B9B639E6BAA4FC4FC8393D>

- BNETZA – BUNDESNETZAGENTUR (2014): Monitoringbericht 2014. Aufgerufen am 06.08.2016, http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2014/Monitoringbericht_2014_BF.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- BNETZA – BUNDESNETZAGENTUR (Hrsg.) (2015): Bestätigung des Netzentwicklungsplans Strom für das Zieljahr 2024. Stand: 04. September 2015, aufgerufen am 27.10.2016, http://data.netzausbau.de/2024/NEP/NEP2024_Bestaetigung.pdf
- BOLL, T., HAAREN, C.v., RODE, M. (2015): The effects of short rotation coppice on the visual landscape, in Bemann, A., Butler-Manning, D., Bredemeier, M., Lamersdorf, N., Ammer, C. (Ed.): Bioenergy from dendromass for the sustainable development of rural areas. Wiley-VCH, Weinheim, 105-119
- BOVET, J., BIZER, K., HENGER, R., OSTERTAG, K., SIEDENTOP, S. (2013): Handelbare Flächenzertifikate – vom akademischen Diskurs über einen Modellversuch in die Planungspraxis? Raumforschung und Raumordnung. December 2013, Volume 71, Issue 6, pp 497–507
- BRAKELMANN, H. (2004): Netzverstärkungs-Trassen zur Übertragung von Windenergie: Freileitung oder Kabel? Stand: Oktober 2004, aufgerufen am 27.10.2016, http://www.ets.uni-duisburg-essen.de/download/public/Freileitung_Kabel.pdf
- BRAKELMANN, H., FRÖHLICH, K. & PÜTTGEN, H. (2011): Infrastructures de transport d'énergie électrique à haute tension dans le Canton du Valais; Ligne à haute tension Chamoson – Chippis, Rapport. Stand: 14.04.2011, aufgerufen am 27.10.2016, https://www.swissgrid.ch/dam/swissgrid/grid/grid_expansion/chamoson_chippis/Bericht_Staatsrat_Wallis.pdf
- BRAKELMANN, H. (2012): Teilverkabelung im voralpinen und alpinen Raum. Stand: September 2012, aufgerufen am 27.10.2016, http://www.salzburg.gv.at/20006bek/380kVLeitung/UE-C/01_UE-FB%20Techn%20Alternative/beilage_prof_brakelmann_studie_tvk%20_sept_2012.pdf
- BRINKMANN (2017 mdl): Expertenworkshop. BfN-Projekt „Naturverträgliche Energieversorgung aus 100 % erneuerbaren Energien 2050
- BRINKMANN, R.; BEHR, O.; NIERMANN, I. & REICH, M (2011): Entwicklung von Methoden zur Untersuchung und Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen. Umwelt und Raum, Band 4, Cuvillier Verlag, Göttingen.
- BRUNS, E. & KRAETZSCHMER, D. (2014): Auswirkungen zukünftiger Netzinfrastrukturen und Energiespeicher in Deutschland und Europa – Teilbericht 2. FKZ 512 83 0100 im Auftrag des Bundesamts für Naturschutz. Manuskript, unveröffentlicht.
- BRUNS, E. & ROTH, M (2016): Landschaftsbildbewertung in Deutschland – Stand von Wissenschaft und Praxis, BfN-Skripten 439
- BULLING, L., SUDHAUS, D., SCHNITTKER, D., SCHUSTER, E., BIEHL, J., TUCCI, F., DAHMEN, M. (2015): Vermeidungsmaßnahmen bei der Planung und Genehmigung von Windenergieanlagen. Fachagentur Windenergie an Land
- BUND (2016): Erneuerbare Energien und Naturschutz. Aufgerufen am: 28.04.2017. <http://www.bund-bawue.de/themen-projekte/klima-und-energie/dialogforum-erneuerbare-energien-und-naturschutz/material-dialogforum/>
- BUND & NABU (2015): Praxisbeispiele Windenergie & Artenschutz, Erfolgreiche, Erfolg versprechende & innovative Ansätze, 1. Auflage Mai 2015, 22 S.

- BNATSCHG: Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz). Ausfertigungsdatum 29.07.2009. Zuletzt geändert durch Art. 1 G v. 15.09.2017 I 3434
- BUNDESNETZAGENTUR (2017): Pressemitteilung. Bundesnetzagentur startet nächste Runde der PV-Ausschreibungen. Erweiterung auf Acker- und Grünlandflächen eröffnet neue Möglichkeiten. Bonn, 6. April 2017
- BUNK, M. (2010): Entwicklung von Gleichzeitigkeitsfaktoren für Elektrofahrzeuge. Diplomarbeit am Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen, Technische Universität Braunschweig.
- BUREAU BOTERSLOOT (Hrsg.) (2013): Stroom door de tijd. 380 kV - publieke ruimte & landschap. Aufgerufen am 27.10.2016, <http://www.bureaubotersloot.nl/project/project-categorie/publieke-ruimte-landschap/>
- BWE BUNDESVERBAND WINDENERGIE (2016): Anzahl der Windenergieanlagen in Deutschland. Aufgerufen am 27.04.2017, <https://www.windenergie.de/infocenter/statistiken/deutschland/windenergieanlagen-deutschland>
- BWE BUNDESVERBAND WINDENERGIE (2016a): Installierte Windenergieleistung in Deutschland. Stand: 31.12.2016, aufgerufen am: 30.08.2017, <https://www.windenergie.de/infocenter/statistiken/deutschland/installierte-windenergieleistung-deutschland>,
- BWE BUNDESVERBAND WINDENERGIE (2016b): Anzahl der Windenergieanlagen in Deutschland. Stand: 31.12.2016, aufgerufen am: 30.08.2017, <https://www.windenergie.de/infocenter/statistiken/deutschland/windenergieanlagen-deutschland>
- BMWi (2015): Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Gesamtausgabe der Grafiken zu Energiedaten. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/energiedaten-gesamt-pdf-grafiken.html>. Aufgerufen am: 12.04.2018
- CHOROWSKI, M. (2012): Performance Analysis of Joule-Thomson Cryocooler Supplied with Gas Mixture. Vortrag bei der International Cryocooler Conference, 09.-12.07.2012, Los Angeles.
- CLAßEN & KNETSCHKE 2014: Leitlinien Schutzgut Menschliche Gesundheit – Für eine wirksame Gesundheitsfolgeabschätzung in Planungsprozessen und Zulassungsverfahren. Arbeitsgemeinschaft Menschliche Gesundheit der UVP-Gesellschaft e.V., 6.S.
- CUTEC (2016): Faulstich, M.; Beck, H.-P.; Haaren, C. von; Kuck, M.; u.a.: Szenarien zur Energieversorgung in Niedersachsen im Jahr 2050. Hannover: 2016, http://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/energie/runder_tisch_energie_wende/gutachten_energieszenarien_2050/runder-tisch-142928.html (zuletzt geprüft am 27.09.2016).
- CUTEC (2016a): Faulstich, M.; Beck, H.-P.; Brendel, R.; Hanke-Rauschenbach, R.; u.a.: Szenarien zur Energieversorgung in Niedersachsen im Jahr 2050. Zusatzgutachten zeitlich höher aufgelöste Szenarien. Hannover: 2016, http://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/energie/runder_tisch_energie_wende/gutachten_energieszenarien_2050/runder-tisch-142928.html (zuletzt geprüft am 28.11.2016).
- DBFZ (2015): Stromerzeugung aus Biomasse (Vorhaben Ila Biomasse). Zwischenbericht Mai 2015. Deutsches Biomasseforschungszentrum, Fraunhofer IWES, INL, Bosch & Partner, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung UFZ. 154 S.
- DEITERMANN, K. (2014): Eingriffe beim Bau von Freileitungen. Minderungsmöglichkeiten. Vortrag beim Technikertag der BNetzA, 21.10.2014.

- DENA - DEUTSCHE ENERGIE AGENTUR GMBH (HRSG.) (2012): Dena Verteilnetzstudie. Stand: 11.12.2012, aufgerufen am 27.10.2016, http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/Energiesysteme/Dokument_e/dena-VNS_Abschlussbericht.pdf
- DEUTSCHE NACHHALTIGKEITSSTRATEGIE (2016): https://www.bundesregierung.de/Content/DE/_Anlagen/Nachhaltigkeit-wiederhergestellt/2017-01-11-nachhaltigkeitsstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=19. Neuauflage 2016. aufgerufen am: 21.07.2017
- DEUTSCHER RAT FÜR LANDESPFLEGE (Hrsg.) (2006): Die Auswirkungen erneuerbarer Energien auf Natur und Landschaft (Nr. 79).
- DEUTSCHER RAT FÜR LANDESPFLEGE (Hrsg.) (2013): Anforderungen an den Um- und Ausbau des Höchstspannungsnetzes - aus Sicht von Naturschutz und Kulturlandschaft (Nr. 84).
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT, INSTITUT FÜR TECHNISCHE THERMODYNAMIK (2004): Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland. Stand: März 2004, aufgerufen am 04.05.2016, http://www.dlr.de/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/publications/Oekoologisch_optimierter_Ausbau_Langfassung.pdf
- DLR, FRAUNHOFER IWES, IFNE (2012): "Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global", http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/publications/leitstudie2011_bf.pdf. Aufgerufen am: 28.08.2017
- DEUTSCHE WINDGUARD (2016): Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland. Im Auftrag von: BWE, VDMA. Deutsche WindGuard GmbH. 9 S.
- DIN EN 12831: Energetische Bewertung von Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast – Teil 1: Raumheizlast,
- DIN EN 50 341-2-4 (VDE 0210-4): Freileitung über AC 1kV – Teil 2-4: Nationale Normative Festlegungen (NNA) Deutschland
- DIN (2011): DIN EN 50160: Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen.
- DIN (2012): DIN EN 62196: Stecker, Steckdosen, Fahrzeugkupplungen und Fahrzeugstecker - Konduktives Laden von Elektrofahrzeugen, Teil 1-2.
- DESTATIS (2015): Umweltökonomische Gesamtrechnung. 2015
- DESTATIS (2017): Deutschland deckt Großteil seines Energiebedarfs durch Importe. aufgerufen am: 2017-11-15, [https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/UmweltEnergie/Energie Importe.html](https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/UmweltEnergie/Energie%20Importe.html)
- DESTATIS (2017): Auf 54 % der Getreideanbaufläche steht 2017 Winterweizen, Pressemitteilung Nr. 163 vom 17.05.2017, https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2017/05/PD17_163_412.html. Aufgerufen am 19.05.2017
- DLR (2004) Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Energie- und Umweltforschung & Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie: Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland. Forschungsvorhaben im Auftrag des Bundesumweltministeriums; Stuttgart, Heidelberg, Wuppertal, 285 S.

- DLR, FRAUNHOFER IWES, IFNE (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei der Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Schlussbericht BMU-FKZ 03MAP146. 331S.
- DICKERT, J.; PANITZ, F. & SCHEGNER, P. (2014): Lastverschiebungspotenzial von Haushaltsgeräten unter Berücksichtigung von Effizienzsteigerungen und Komfortansprüchen, Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern. Vortrag bei der NEIS Konferenz, 18.-19.09.2014, Hamburg.
- DNR - Deutscher Naturschutzring (2012): Grundlagenarbeit für deine Informationskampagne. "Umwelt- und naturverträgliche Windenergienutzung in Deutschland (onshore)". Analyseteil. Stand: 30. 03. 2012, aufgerufen am 26.10.2016, <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/documents/10184/611110/Windkraft-Grundlagenanalyse-2012.pdf/656de075-a3d2-4387-aa30-7ec481c46c5c>
- DT-Bat (2017): Results of the latest evaluation of DTBirdV4D4. <http://www.dtbat.com/index.php/news-12/item/52-results-of-the-latest-evaluation-of-dtbirdv4d4>
- EEA (2016): Conservation status and trends of species assessed as unfavourable at Member State Level. Aufgerufen am: 27.04.2017, <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/conservation-status-and-trends-of-1>
- EEG 2014: Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz-EEG 2014). Ausfertigungsdatum: 21.07.2014. Zuletzt geändert durch Art. 4 G v. 22.07.2014 I 1218
- EEG 2017: Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz-EEG 2017). Ausfertigungsdatum: 21.07.2014. Zuletzt geändert durch Art. 1 G v. 17.07.2017 I 2532
- E-HOME 2020 (2011-2016): e-home Energieprojekt 2020. Kurzfassung der wissenschaftlichen Projektergebnisse. Schriftenreihe Efzn - Energie-Forschungszentrum Niedersachsen. Band 43. Cuvillier Verlag Göttingen
- EHRHARDT-UNGLAUB, T. (2013): Umweltauswirkungen des Netzausbaus in Nord- und Ostsee. Vortrag auf einer Informationsveranstaltung der BNetzA, 18.06.2013, Bremen. Online unter http://www.netzausbau.de/SharedDocs/Downloads/DE/Veranstaltungen/2013/OffshoreBremen/VortragErhardt-Unglaub.pdf?__blob=publicationFile
- ENERCON GMBH (2016 a): E-126, EP4. Aufgerufen am 26.10.2016, <http://www.enercon.de/produkte/ep-4/e-126-ep4/>
- ENERCON GMBH (2016 b): E-101, EP3. Aufgerufen am 26.10.2016, <https://www.enercon.de/produkte/ep-3/e-101/>
- ENERGIEEINSPARUNGSGESETZ: Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden (Energieeinsparungsgesetz – EnEG) Ausfertigungsdatum 22.07.1976. Neugefasst durch Bek. V. 1.9.2005 I 2684. Zuletzt geändert durch Art. 1 Gv. 4.7.2013 I 2197
- ENERGIEEINSPARUNGSVERORDNUNG: Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden 2007
- ENGELN, J. & WENZEL, P. (2014) Schalltechnischer Bericht der erweiterten Hauptuntersuchung. 64 S.
- ENTSO-E (2012): European Network of Transmission System Operators for Electricity [Hrsg.] 10-Year Network Development Plan 2012. 219 S.

- ENTSO-E (2016): 10-Year Network Development Plan (TYNDP), Brussels.
<https://www.entsoe.eu/Documents/TYNDP%20documents/TYNDP%202016/rgips/Consultation%20review%20RgIPs%20and%20project%20list.pdf>
- EUROPÄISCHE UMWELTAGENTUR [Hrsg.] (1999): Smeets, E., Weterings, R.: Environmental indicators: Topology and overview. European Environmental Agency 19 S.
- EUROPEAN COMMISSION (2012 & 2013): Extending bioenergy towards smart biomass use Issues of social acceptance at Park Cuijk, The Netherlands.
<https://energysustainsoc.springeropen.com/articles/10.1186/s13705-015-0053-9>.
Aufgerufen am: 05.03.2018
- EWALD, J., ROTHE, A., HANSBAUER, M., SCHUMANN, C., WILNHAMMER, M., SCHÖNFELD, F., WITTKOPF, S., ZAHNER, V. (2017): Energiewende und Waldbiodiversität. BfN-Skripten 445, Bonn, 128 S.
- FFH-RL: Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen
- FFH-VP-INFO (2016): Fachinformationssysteme des Bundesamtes für Naturschutz zur FFH-Verträglichkeitsprüfung. Aufgerufen am 16. 03. 2016, <http://ffh-vp-info.de/FFHVP/Page.jsp>
- FIEDELDEY, M.; ALBRECHT, C. & MEYER, E.-P. (2011): Anwendung statistischer und dynamischer Strompreis-Anreizmodelle in Virtual Power System Allgäu. Vortrag beim Internationalen VDE ETG-Kongress 2011, 08.-09.11.2011, Würzburg.
- FNR (2016): Anbaufläche für nachwachsende Rohstoffe. Aufgerufen am: 28.04.2017.
<https://mediathek.fnr.de/anbaufläche-für-nachwachsende-rohstoffe.html>
- FRAUNHOFER (2011): Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) Kassel, FuE-Bereich Energiewirtschaft und Netzbetrieb.: Energiewirtschaftliche und ökologische Bewertung eines Windgas-Angebotes 2011, https://www.greenpeace-energy.de/fileadmin/docs/sonstiges/Greenpeace_Energy_Gutachten_Windgas_Fraunhofer_Sterner.pdf (zuletzt geprüft am 03.04.2017).
- FRAUNHOFER IWES (2013): Energiewirtschaftliche Bedeutung der Offshore-Windenergie für die Energiewende, Kurzfassung. 36 S.
- FRAUNHOFER IWES (O.J.): Weltweite Nutzung Offshore-Windleistung. Aufgerufen am: 27.24.2017.
http://windmonitor.iwes.fraunhofer.de/windmonitor_de/4_Offshore/1_zubau/1_weltweite_nutzung/
- FRAUNHOFER-ISE (2016): APV-RESOLA – Die Machbarkeit von Agrophotovoltaik wird demonstriert. Aufgerufen am 19.09.2016,
<http://www.agrophotovoltaik.de/machbarkeit/agrarwirtschaftliche-perspektive/>
- FRAUNHOFER ISE (2017): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Fassung vom 26.03.2017, 86 S.
www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf
- FÜRST, D. & SCHOLLES, F. (2008): Handbuch Theorien und Methoden der Raum- und Umweltplanung. 3., vollst. überarb. Aufl. Dortmund: Rohn.
- GÄRTNER, S., HIENZ, G., KELLER, H. & MÜLLER-LINDENLAUF, M. (2013): Gesamtökologische Bewertung der Kaskadennutzung von Holz – Umweltauswirkungen stofflicher und energetischer Holznutzungssysteme im Vergleich. IFEU Heidelberg, 99 S.

- GEOPLEX (o.J.): Photovoltaik: Projektierung, 3D Planung, Verschattungsanalyse, Montage
- GESETZ ZUR FÖRDERUNG ERNEUERBARER ENERGIEN IM WÄRMEBEREICH: (Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz – EEWärmeG) Ausfertigungsdatum: 07.08.2008. Zuletzt geändert durch Art 9 G v. 20.10.2015 I 1722
- GFN & Z. S.W. (2011): Auswirkungen der Ausbauziele zu den Erneuerbaren Energien auf Naturschutz und Landschaft. FuE-Vorhaben FKZ 3509 83 0600, Endbericht. Stand: 26.01.2011, aufgerufen am 26.10.2016, https://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/themen/erneuerbareenergien/Publikationen_FuE/endbericht_regionale_auswirk_ee.pdf
- GFN (2006): Naturschutzfachliche Bewertungsmethoden von PV-Freiflächenanlagen. Stand: Januar 2006, aufgerufen am 16.03.2016, <https://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/service/skript247.pdf>
- GG: Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland. Ausfertigungsdatum 23.05.1949. Zuletzt geändert durch Art. 1 G v. 13.07.2017 I 2347
- GOLLETZ, J. (2012): Die Zukunft von Freileitungen in Europa - Tendenzen und Herausforderungen. Vortrag beim Industrie Partner Symposium 2012 TU Dresden, 27.09.2012. Online verfügbar unter http://www.et.tu-dresden.de/etit/fileadmin/user_upload/dokumente/IPS/IPS2012-Golletz.pdf
- GLASER, F. & HAUKE, U. (2004), Historische alte Waldstandorte und Hudewälder in Deutschland, Angewandte Landschaftsökologie, Heft 61, BfN
- GROIS, C.: Analyse der Gleichzeitigkeitsfaktoren von Prosumerhaushalten mit Elektrofahrzeugen. Vortrag beim 14. Symposium Energieinnovation, 10.-12.02.2016, Graz.
- NITSCH, J. (2014): "GROKO II Szenarien der deutschen Energieversorgung auf der Basis des EEG-Gesetzentwurfs – insbesondere Auswirkungen auf den Wärmesektor:" www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Politische_Papiere_anderer/14.07.Nitsch-GrokoII/14.07.21_GROKO-II-Szenarien.pdf. Aufgerufen am: 28.08.2017
- GUSTAFSSON, A.; SALTZER, M.; FARKAS, A.; GHORBANI, H.; QUIST, T. & JEROENSE, M. (2014): The new 525 kV extruded HVDC cable system. ABB Grid Systems, Technical Paper Aug 2014. Aufgerufen am 27.10.2016, <http://new.abb.com/docs/librariesprovider138/default-document-library/hannover-messe-2015/whitepaper-525kv.pdf?sfvrsn=4>
- GUTACHTEN ENERGIESZENARIEN 2050 (2016): Szenarien zur Energieversorgung in Niedersachsen im Jahr 2050 -Gutachten-. Niedersachsen. Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz. 67 S.
- HAAREN, C. v. & BITTNER, C. (Hrsg.) (2004): Landschaftsplanung. 1. Aufl. Stuttgart: Ulmer (UTB Landschaftsplanung, Ökologie, Biologie, Geographie, 8253). Online verfügbar unter <http://www.utb-studi-e-book.de/9783838582535>.
- HAAREN, C.V. & OTHENGRAFEN, F. 2017 (submitted to Landscape and Urban Planning): The Babel Fish strategy: Understanding decision-making mechanisms in policy to enhance the use of environmental information in landscape planning.
- HANDLUNGSLEITFADEN HEIDELBERG (n.d.): „Heidelberger Dach(g)arten“. Handlungsleitfaden zur extensiven Dachbegrünung in Heidelberg. Stadt Heidelberg. Bundeshauptstadt im Naturschutz 2017. https://www.heidelberg.de/site/Heidelberg_ROOT/get/params_E1415041129/721899/61_pdf_5_Nahversorgungsmarkt_Kranichweg_Handlungsleitfaden_Dachbegr%C3%BCnung_15.09.2012.pdf. Aufgerufen am: 25.10.2017

- HELGOLÄNDER PAPIER (2015): Abstandsempfehlungen für Windenergieanlagen zu bedeutsamen Vogellebensräumen sowie Brutplätzen ausgewählter Vogelarten. In Überarbeitung vom 15. April 2015. Länderarbeitsgemeinschaften der Vogelschutzwarten. Fachbehörden der Länder. Vogelschutzwarte Neschwitz
- HERDEN, C., RASSMUS, J., GHARADJEDAGHI, B. 2009: Naturschutzfachliche Bewertungsmethoden von Freilandphotovoltaikanlagen. 168 S., Bonn: Bundesamt für Naturschutz (BfN Skripten 337).
- HERMES, J., ALBERT, C., VON HAAREN, C. (submitted): F+E Projekt, Bewertung kultureller Ökosystemleistungen in Deutschland
- HERRHOLZ, T., (2015): Bedarfsgerechte Befeuerung, Mehr Akzeptanz für Windparks, Whitepaper 02/2015, WID, BWE, 8 S.
- HOEFT, C, MESSINGER-ZIMMER J., ZILLES, J., (Hrsg.) (2017): Bürgerproteste in Zeiten der Energiewende, Lokale Konflikte um Windkraft, Stromtrassen und Fracking. Transskript Verlag. 276S.
- HOFMANN L.; RATHKE C. & MOHRMANN M. (2012a): Ökologische Auswirkungen von 380-kV-Erdleitungen und HGÜ-Erdleitungen. Band 3: Bericht der Arbeitsgruppe Technik/Ökonomie, Göttingen.
- HOFMANN L.; RATHKE C.; STEPHAN, A.; ALBRECHT, A.; WEYER, H. & LIXMANN, C. (Bearb.) (2012b): Machbarkeitsstudie zur Verknüpfung von Bahn- und Energieleitungsinfrastrukturen. Stand: 05.06.2012, aufgerufen am 27.10.2016, <http://www.energie-wende-gemeindetag-bw.de/sites/default/files/BNetzA%20-%20Machbarkeitsstudie%20z.%20Verkn%C3%BCpfung%20von%20Bahn-%20und%20Energieleitungsinfrastrukturen%20%282012%29.pdf>
- HOFMANN, L. (2012c): Technische und wirtschaftliche Aspekte des Stromleitungsausbaus. Vortrag beim Forum Netzintegration, 17.04.2012. Online verfügbar unter http://www.forum-netzintegration.de/uploads/media/Aspekte_Stromleitungsbau__Hofmann_.pdf
- HOFMANN, L. (2012d): Supergrid und HGÜ – was ist denkbar und was wird gedacht. Vortrag bei den 5. Niedersächsischen Energietagen, 18.10.2012, Goslar.
- HOISL, R., NOHL, W., ENGELHARDT, P. (2000): Naturbezogene Erholung und Landschaftsbild. Handbuch der KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft). Darmstadt
- HUPFER, P. & KUTTLER, W. (Hrsg.) (2005): Witterung und Klima: Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie. Stuttgart, Leipzig.
- IFEU (2008): "Nachhaltig nutzbares Getreidestroh in Deutschland". Stand: Juli 2008, aufgerufen am 27.09.2016, <http://www.ifeu.de/landwirtschaft/pdf/IFEU%20-%20Positionspapier%20Stroh.pdf>
- IFEU (2009): IFEU, FRAUNHOFER ISI, GWS, PROGROS". Potenziale und volkswirtschaftliche Effekte einer ambitionierten Energieeffizienzstrategie für Deutschland". Gefördert durch BMU. http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAs-sets/docs/e/de/publikationen/Klimaschutz_Energieeffizienz_undBeschaeftigung.pdf. Aufgerufen am: 12.04.2018
- IMGART, P. (2015): Überlagerungsmöglichkeiten von Gleichzeitigkeitsfaktoren zur Berücksichtigung neuartiger Technologien in der NS-Netzplanung. Bachelorarbeit am Institut für Elektrische Energiesysteme, Leibniz Universität Hannover.

- ISE (2012) – HANS-MARTIN HENNING, ANDREAS PALZER, FRAUNHOFER INSTITUT FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS ISE: "100% Renewables for Electricity and Heat – a Holistic Model for a Future German Energy System" 7th International Renewable Energy Storage Conference (IHRES 2012) November 12-14, 2012
- JARASS, L. & OBERMAIR, G.M. (2012): Welchen Netzbau erfordert die Energiewende? Wiesbaden.
- KALTSCHMITT, M. & WIESE, A. (1993): Erneuerbare Energieträger in Deutschland. Potentiale und Kosten. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-93541-1>.
- KAHNEMAN, D (2011): Thinking, fast and slow. Farrar Straus and Giroux, New York
- KAUFMANN, W. (1995): Planung öffentlicher Elektrizitätsverteilungs-Systeme, 1. Auflage, Frankfurt am Main: VWEV-Verlag.
- KLIMASCHUTZPLAN (2050): Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Aufgerufen am: 28.04.2017. http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/klima-klimaschutz-download/artikel/klimaschutzplan-2050/?tx_ttnews%5BbackPid%5D=3915
- KOTTONAU, D. & NOE, M. (2016): Untersuchung der Trassenbreite und der Verluste für eine supraleitende Zwischenverkabelung von 380 kV Übertragungssystemen. Karlsruhe, unveröffentlicht.
- KROCKOW, C. Graf v. (1992): Die Deutschen in ihrem Jahrhundert. Reinbek: Rowohlt (dankenswerterweise bereit gestellt durch C. Schrenk, Bremen)
- ÖKO-INSTITUT, FRAUNHOFER ISI (2015): "Klimaschutzszenario 2050 2. Endbericht", <https://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf>. Aufgerufen am: 28.08.2017
- OVG MÜNSTER (2010): Rechtssprechung OVG Münster Nordrhein-Westfalen, 24.06.2010 – 8A2764/09. <https://dejure.org/dienste/vernetzung/rechtsprechung?Gericht=OVG%20Nordrhein-Westfalen&Datum=2010-06-24&Aktenzeichen=8%20A%202764%2F09>. Aufgerufen am: 11.04.2018
- KÜHNE, O., WEBER, F. (2016): Landschaft im Wandel ARL 3-4/2016:16-20. <https://shop.arl-net.de/nachrichten-der-arl-34-2016.html>, aufgerufen am 16.11.2017
- LAHR, S. (2013): Der Mastenwald wächst. Stand: 05.12.2013, aufgerufen am 27.10.2016, http://www.nw-news.de/owl/bielefeld/senne/senne/9817724_Der_Mastenwald_waechst.html
- LANDESHAUPTSTADT HANNOVER (2015): Information des Fachbereichs Umwelt und Stadtgrün. Dachbegrünung und Photovoltaik
- LEE, J. (2015): Investigation on Cryogenic Refrigerator and Cooling Schemes for Long Distance HTS Cable. IEEE Transactions on Applied Superconductivity 25 (3): 1-4. DOI: 10.1109/TASC.2014.2373492
- LEHDE, B. & ZDRALLEK, M. (2013): New load and infeed approaches for cost-efficient low-voltage grid design. Vortrag bei der 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, - CIRED 2013, 10.-13.06.2013, Stockholm.
- LFU BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2012): Trinkwasserschutz bei Planung und Errichtung von Windkraftanlagen (Merkblatt Nr. 1.2/8). Augsburg: 17 S.

- LFU BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2013): Planung und Errichtung von Freiflächen-Photovoltaikanlagen in Trinkwasserschutzgebieten (Merkblatt Nr. 1.2/9). Augsburg: 12 S.
- LFU BAYRISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2016): Windenergieanlagen – beeinträchtigt Infraschall die Gesundheit?, UmweltWissen – Klima und Energie, https://www.lfu.bayern.de/buerger/doc/uw_117_windkraftanlagen_infraschall_gesundheit.pdf
- LIEDER, K. & LUMPE, J. (2012): Vögel im Solarpark - eine Chance für den Artenschutz?: Auswertung einer Untersuchung im Solarpark Ronneburg "Süd I". In: Thüringer ornithologische Mitteilungen 56, S. 13.
- LIPS, A., JABERG, C., FREI, G. & DUBOIS, D. (1999): Besiedlung nachwachsender Rohstoffe durch Flora und Fauna. In: Agrarforschung 6(8), S. 305-308.
- LÖDL, M.; KERBER, G.; WITZMANN, R.; HOFFMANN, C. & METZGER, M. (2010): Abschätzung des Photovoltaik- Potentials auf Dachflächen in Deutschland. Aufgerufen am 26.10.2016, <https://mediatum.ub.tum.de/doc/969497/969497.pdf>
- LUNDTANG PETERSEN, E., TOREN, I. (1990): Europäischer Windatlas. Roskilde.
- LÜNSDORF, O. (2012): Selbstorganisation virtueller Geräte für das Lastmanagement von Kleinverbrauchern. Dissertation an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg.
- MALLAST, J., D'HOSE, T., RASCHKE, I., SPIEGEL, H. & STEINMANN, H.-H. (2015): Steckbriefe zu Verfahren der Bodenbewirtschaftung - basierend auf Literaturlauswertungen von 291 europäischen Langzeitfeldversuchen. 16 S. www.uni-goettingen.de/de/ergebnisse-aus-dem-catch-c-projekt/528373.html
- MEUSEL, F. (2014): Naturpark Thüringer Wald. Aufgerufen am 27.10.2016, <http://www.lpv.de/themen/biotopverbund/oekologisches-trassenmanagement/>
- MINISTERIUM FÜR INFRASTRUKTUR UND LANDWIRTSCHAFT THÜRINGEN (2016): Erlass zur Planung von Vorranggebieten „Windenergie“ die zugleich die Wirkung von Eignungsgebieten haben (Windenergieerlass). Erlass des Thüringer Ministeriums für Infrastruktur und Landwirtschaft vom 21. Juni 2016
- MINISTRIE VAN INFRACTUUR EN MILIEU (2014): Ontwerp Rijksinpassingsplan 380 kV Doetinchem – Voorst grens. Stand: 12.09.2014, aufgerufen am 27.10.2016, <http://api.commissiener.nl/docs/mer/p23/p2323/2323-045ontwerp-rijksinpassingsplan.pdf>
- MOHRMANN, M.; LEHDE, B.; VIELHAUER, A.; BUNK, M.; HOFMANN, L. & ENGEL, B. (2012): E-Home Energy Projekt 2020. Vortrag beim CIRED Workshop 2012, 29.-30.05.2012, Lissabon.
- MÖLLER K., SCHULZ R., MÜLLER T., DEUPMANN H., VOGEL A. (2009): Mit Gärresten richtig düngen - Aktuelle Informationen für Berater. Hrsg.: Universität Hohenheim in Zusammenarbeit mit E.ON Ruhrgas AG, 56 S.
- MUSIOL, F.; SCHMIDT, M. & STAIß, F (2007): Vorbereitung und Begleitung der Erstellung des Erfahrungsberichtes 2007 gemäß § 20 EEG. Aufgerufen am 16.03.2016, [http://www.naturschutzstandards-erneuerbarer-energien.de/images/literatur/eeg_forschungsbericht_Kap.8\[1\].pdf](http://www.naturschutzstandards-erneuerbarer-energien.de/images/literatur/eeg_forschungsbericht_Kap.8[1].pdf)
- NABEG: Netzausbaubeschleunigungsgesetz Übertragungsnetz. Ausfertigungsdatum 28.07.2011. Zuletzt geändert durch Art. 2 Abs. 13 G v. 20.7.2017 I 2808
- NABU 2017: Der naturverträgliche Ausbau von Photovoltaik – Forschungs- und Analysebedarf bei der Bewertung von Umweltauswirkungen, aufgerufen am 18.08.2017

- <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/energie/erneuerbare-energien-energiewende/solarenergie/04300.html>
- NABU, BOSCH & PARTNER GMBH (2015): Naturverträgliche Anlage und Bewirtschaftung von Kurzumtriebsplantagen (KUP). 63 S.
- NATURSCHUTZSTANDARDS EE2010 (2010): Geothermie. Stand: 31.08.2016, aufgerufen am 04.05.2016, http://www.naturschutzstandards-erneuerbarer-energien.de/images/stories/file/intern/100903_Geothermie.pdf
- NEDDERMANN, B. (2011): Schallimmissionen von Windenergieanlagen. Hintergrundpapier. Stand: August 2011, aufgerufen am 21.10.2016, http://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Schall/2011-08-30_RIB_Hintergrundpapier-Schallimmissionen_FA-Wind.pdf
- NETZENTWICKLUNGSPLAN 2030 (2016): Projekte NEP 2030 Strom. <https://www.netzentwicklungsplan.de/de/projekte/projekte-nep-2030>. Aufgerufen am: 08.06.2017
- NEUSEL-LANGE, N.; OERTER, C & ZDRALLEK, M. (2012): First Practical Experience with Smart Low Voltage Grids, Proceedings 2012 IEEE Smart Grid Technology, Economics and Policies, Nürnberg, 03-04.12.2012.
- NIEDERSACHSEN; CLAUSTHALER UMWELTECHNIK-INSTITUT; Energie-Forschungszentrum Niedersachsen; Ostfalia Hochschule für Angewandte Wissenschaften; Institut für Umweltplanung (2016): Szenarien zur Energieversorgung in Niedersachsen im Jahr 2050. Erarbeitet im Auftrag des Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt Energie und Klimaschutz, Hannover.
- NIEPELT (2017, mdl.): Nutbarer Dachflächenanteil. BfN-Projekt „Naturverträgliche Energieversorgung aus 100% erneuerbaren Energien 2050“.
- NKT CABLES: HTS Triax™ Energy Cable Systems. Aufgerufen am 27.10.2016, http://www.nktcables.com/~media/Files/NktCables/download%20files/com/HTS-Triax_engl_061108.pdf
- OKUBA, H. (2010): Status of Development and Field Test Experience with High-Temperature Superconducting Power Equipment. CIGRE Brochure 418. Paris.
- ÖSTERREICH'S ENERGIE (2012): Technische Anschlussbedingungen für den Anschluss an öffentliche Versorgungsnetze mit Betriebsspannungen bis 1000 Volt (TAEV 2012).
- OSWALD, B.R. (2005): Vergleichende Studie zu Stromübertragungstechniken im Höchstspannungsnetz. Stand: 20.09.2005, aufgerufen am 27.10.2016, http://www.forwind.de/forwind/files/forwind-oswald-studie-langfassung_05-09-23_1.pdf
- OSWALD, B.R. (2007): 380-kV-Salzburgleitung, Auswirkungen der möglichen (Teil)Verkabelung des Abschnittes Tauern-Salzach neu. Gutachten im Auftrag von Energie-Control GmbH Wien, Hannover. Aufgerufen am 27.10.2016, http://www.e-cotrol.at/portal/page/portal/medienbibliothek/presse/dokumente/pdfs/PK%20SalzburgLeitung_Endfassung_4KS_20080118_0_0.pdf
- OSWALD, B.R. (2009): Optionen im Stromnetz für Hoch- und Höchstspannung. Vortrag, 14.05.2009, Berlin. Online verfügbar unter http://www.forum-netzintegration.de/uploads/media/DUH_Oswald_20090514_klein_03.pdf
- PARDATSCHER, R.; WITZMANN, R.; WIRTH, G.; BECKER, G. & BRANTL, J.: Untersuchung zu den Auswirkungen von Photovoltaikeinspeisung auf das Nieder- und Mittelspannungs-

- netz. Vortrag beim Internationalen VDE ETG-Kongress 2011, 08.-09.11.2011, Würzburg.
- PAUL, H.-U. (2007): EMV-Fragen im Übertragungsnetz. Vortrag VDE-Bezirksverein Südbayern e.V., 24.10.2007, München. Online verfügbar unter http://www.vde.com/de/Regionalorganisation/Bezirksvereine/Suedbayern/Facharbeit%20regional/AKEnergietechnik/Documents/Vortrag_VDE_071024.pdf
- PASCHOTTA, R. (2017): Sektorkopplung; RP-Energie-Lexikon. <https://www.energielexikon.info/sektorkopplung.html>, aufgerufen am: 10.09.2017.
- PHOTOVOLTAIK: kWp – Kilowatt Peak. <http://www.photovoltaik.org/wissen/kwp>, aufgerufen am: 17.07.2017
- PK GEOTHERMIE - PERSONENKREIS GEOTHERMIE DER AD-HOC-ARBEITSGRUPPE GEOLOGIE (2011): Fachbericht zu bisher bekannten Auswirkungen geothermischer Vorhaben in den Bundesländern. Stand: Februar 2011, aufgerufen am 04.05.2016, http://www.infogeo.de/dokumente/download_pool/FS2011_Top_6.2_Anlage_PK_Geothermie_Bericht.pdf
- POHLMANN, H. (2012): Innovative Freileitungskonzepte – Erhöhung der Übertragungskapazität. Vortrag beim Technik-Dialog der BNetzA, 17.-18.04.2012, Hannover. Online verfügbar unter http://www.netzausbau.de/SharedDocs/Downloads/DE/Veranstaltungen/2012/TechnikdialogErdkabel/VortragPohlmann.pdf?__blob=publicationFile
- PREISVERGLEICH.DE AG (2016): 120-Städte-Studie zum Stromverbrauch. Aufgerufen am 27.10.2016, <http://strom.preisvergleich.de/info/18600/studie-stromverbrauch-deutschland2015>
- PROGNOS-ZIEL (2014): “Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose“, <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/entwicklung-der-energiemaerkte-energiereferenzprognose-endbericht.pdf>. Aufgerufen am: 28.08.2017
- QUASCHNING, V. (2000): Systemtechnik einer klimaverträglichen Elektrizitätsversorgung in Deutschland für das 21. Jahrhundert. Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Habil-Schr. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 6, Energietechnik, 437).
- QUINKENSTEIN, A., SCHULTZE, B., GRÜNEWALD, H., WÖLLECKE, J., SCHNEIDER, B. U., JOCHHEIM, H. & HÜTTL, R. F. (2008): Landschaftsökologische Aspekte der Dendromasseproduktion – Analyse und Bewertung von Risiken und Vorteilswirkungen. In: MURACH, D., KNUR, L. & SCHULTZE, M. (Hrsg.) (2008): DENDRONOM – Zukunftsrohstoff Dendromasse. Verlag Kessler, Remagen-Oberwinter: S. 317-345.
- RAAB, B. (2015): Erneuerbare Energien und Naturschutz: Solarparks können einen Beitrag zur Stabilisierung der biologischen Vielfalt leisten. In: ANLIEGEN Natur 37 (1), S. 67–76.
- RASSMUS, J.; GEIGER, S.; HERDEN, C.; BRAKELMANN, H.; STAMMEN, J.; ZHANG, R.D.; CARSTENSEN, H.; GROLLÜSCHEN, H.; MAGNUSSON, A. & JENSEN, M. (Bearb.) (2009): Naturschutzfachliche Analyse von küstennahen Stromleitungen. Endbericht FKZ 806 82 070 des Bundesamts für Naturschutz. Stand: 21.10.2009, aufgerufen am 27.10.2016, https://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/themen/erneuerbareenergien/endbericht_ausbau_stromleitung_kueste.pdf
- RENEWABLE ENERGY CONCEPTS (o. J.): PV Ausrichtung - Stromertrag. Aufgerufen am 21.10.2016, <http://www.renewable-energy->

- concepts.com/german/sonnenenergie/basiswissen-solarenergie/ausrichtung-azimuth-stromertrag.html
- RL 2001/42/EG: des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Juni 2001 über die Prüfung der Umweltauswirkungen bestimmter Pläne und Programme
- ROCKSTRÖM J., STEFFEN W., NOONE K., PERSSON Å., CHAPIN F., III, S., LAMBIN E., LENTON T. M., SCHEFFER M., FOLKE C., SCHELLNHUBER H. J., NYKVIST B., WIT C. A. DE, HUGHES T., LEEUW S. VAN DER, RODHE H., SÖRLIN S., SNYDER P. K., COSTANZA R., SVEDIN U., FALKENMARK M., (2009): Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society* 14: article 32
- RODE, M. & KANNING, H. (Hrsg.) (2010): Natur- und raumverträglicher Ausbau energetischer Biomassepfade. Stuttgart, ibidem-Verlag: 296 S.
- RÖNNQVIST, M.; TRAGANTALERNGSAK, S. & HOLT, J. (1999): A repeated matching heuristic for the single-source capacitated facility location problem. *European Journal of Operational Research* 116 (1999): 51–68. DOI:10.1016/S0377-2217(98)00045-9
- ROG: Raumordnungsgesetz. Ausfertigungsdatum 22.12.2008. Zuletzt geändert durch Art. 2 Abs. 15 G v. 20.7.2017 I 2808
- ROLINK, D. (2017): Solarpark-Ausschreibungen: Preise drastisch gesunken. Aufgerufen am 30.08.2017. <https://www.topagrar.com/news/Energie-Energienews-Preisrutsch-bei-Solarstrom-aus-Solarparks-8320467.html>
- RÜHMKORF, H. (2011): Auswirkungen des Energiepflanzenausbaus zur Biogaserzeugung auf Landschaftsstruktur und Avifauna. 54 S., Dissertation am Institut für Umweltplanung, Leibniz Universität Hannover.
- RUNGE, K.; WACHTER, T.; MEISTER, P. & ROTTGARDT, E. (2011): BMU-Studie "Ökologische Auswirkungen von 380-kV-Erdleitungen und HGÜ-Erdleitungen", Band 2: Bericht der Arbeitsgruppe Umwelt. Göttingen.
- SAßNICK, Y. (2009): Technische und ökonomische Parameter von Höchstspannungsleitungen am Beispiel der Südwestkuppelleitung. Aufgerufen am 27.10.2016, http://www.duh.de/fileadmin/_migrated/content_uploads/Sassnick_VET_170309_DUH_04.pdf
- SCHAUFENSTER-PROGRAMM ELEKTROMOBILITÄT (2017): Abschlussbericht der Begleit- und Wirkungsforschung 2017. Ergebnispapier der Begleit- und Wirkungsforschung 322 S.
- SCHEURLIN, K. THIELE, M. & WETTSTEIN, C. (2004): Wirkfaktoren der energetischen Nutzung von Biomasse. In: Scheurlin, K. & Reinhardt, G.: F+E Vorhaben: Naturschutzaspekte bei der Nutzung erneuerbarer Energien. FKZ 801 02 160, S. 11-54.
- SCHLESWIG-HOLSTEINISCHER LANDTAG (2014): Drucksache 18/1985 Energiewende und Klimaschutz in Schleswig-Holstein - Ziele, Maßnahmen und Monitoring 2014, Schwerin. Aufgerufen am 27.10.2016, http://www.europoles.de/fileadmin/user_upload/media/energie/Natur_und_Landschaft_Maststudie_21-06-2012.pdf
- SCHLÖMER, G. & HOFMANN, L. (2015): Technische Herausforderungen und Möglichkeiten zur Steuerung des Ladeverhaltens von Elektrofahrzeugen durch intelligente Ladestationen auf Basis der DIN IEC-61851. Vortrag bei der NEIS Konferenz 2015, 10.-11.09.2015, Hamburg.
- SCHLÖMER, G. & HOFMANN, L. (2016a): Eine Heuristik zur Umbauplanung von NS-Netzen ganzer Ortschaften. Vortrag beim 14. Symposium Energieinnovation, 10.-12.02.2016, Graz.

- SCHLÖMER, G.; HOFMANN, L. (2016b): Formulating Grid Expansion Measures in Low Voltage Grids as an Integer Linear Optimization Problem. Vortrag auf der IEEE Powercon 2016, 28.09.-01.10.2016, Wollongong, Australien.
- SCHMID, A. (2014): Wirtschaftsausschuss: Experten-Anhörung zu Abständen von Windrädern. 03. Juli 2014. Aufgerufen am: 24.10.2017: <https://www.bayern.landtag.de/aktuelles/sitzungen/aus-den-ausschuessen/wirtschaftsausschuss-experten-anhoerung-zu-abstaenden-von-windraedern/>
- SCHMIDT, F.; BRATT, S.; WELSH, T.E.; YUAN, J.; ALLAIS, A. & HAMBER, F. (2007): Development and Demonstration of a HTS Power Cable to Operate in the Long Island Power Authority Transmission Grid. IEEE Transactions on Applied Superconductivity: Seite 2034-2037.
- SCHMIESING, J. (2016): Regelbare Ortsnetztransformatoren zur Integration regenerativer Erzeugungsanlagen in ländlichen Mittelspannungsnetzen, Dissertation. Göttingen.
- SCHOLLES, F.; PUTSCHKY, M.; HOFMANN, L.; GARSKE, S.; GÜNEWIG, D.; BÄUMER, C. & GANS, F. (2015): Ökologische Risikoeinschätzung zur strategischen Planung der Stromübertragungsnetze. Endbericht zum F+E-Vorhaben Konzepte und Inhalte der Ökologischen Risikoeinschätzung für den naturschutzverträglichen Ausbau der Energie-Netzinfrastruktur auf Generalplan- und Bundesebene (Hoch- und Höchstspannungsebene). Hannover.
- SEGBERS, B. & FISCHER, W. (2009): Ökologie Freileitung. Maßnahmen zur ökologischen Freileitungsschneise. Vortrag Deutsche Umwelthilfe, 23.11.2009, Berlin.
- SEIFERT, M. (2002): Windenergieanlagen mit großen Nabenhöhen. Aufgerufen am 21.10.2016, http://www.efiwind.de/fileadmin/user_upload/downloads/nh_und_ertraege_deu.pdf
- SIEGMANN, J. (2011): Ausbau des Höchstspannungsnetzes – Stromautobahnen für Windstrom. Vortrag 29.03.2011. <http://www.vde.com/de/Regionalorganisation/Bezirksvereine/Kassel/Berichte/2011/Seiten/ausbauhoechstspannung.aspx>
- SIEGMANN, J. (2013): 380kV Leitung Wahle-Mecklar. Vortrag bei der Einwohnerversammlung der Stadt Göttingen, 13.03.2013, Göttingen, http://www.tennetso.de/site/binaries/content/assets/netzausbau/projekte/wahle-mecklar/verfahrensstand/130315_prasentationeinwohnerversammlunggöttingen.pdf
- SRU (2004): Umweltpolitische Handlungsfähigkeit sichern. Baden Baden: Nomos Verlag. Stand: 10.12.2009, http://www.umweltrat.de/cln_137/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2004_Umweltgutachten_Hausdruck.html
- SRU (2017): Kohleausstieg jetzt einleiten. Stellungnahme Oktober 2017. Sachverständigenrat für Umweltfragen. ISBN: 978-3-947370-10-8. Berlin
- STAIB, F. (1996): Photovoltaik; Technik, Potentiale und Perspektiven der solaren Stromerzeugung. Vieweg. Wiesbaden
- STATISTA - STATISTISCHES BUNDESAMT (2015): "12. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung" Aufgerufen am 27.09.2016, <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/Bevoelkerung/Bevoelkerungsvorausberechnung/Tabellen/AltersgruppenBis2060.html>
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2011-2015): Bautätigkeit und Wohnungen. Bautätigkeit Fachserie 5 Reihe . Wiesbaden.
- STATNETT (Hrsg.) (2013): New converter technology to be utilised at Skagerrak 4. Stand: 08.03.2013, aufgerufen am 27.10.2016,

- <http://www.statnett.no/en/Projects/Skagerrak-4/News/New-converter-technology-to-be-utilised-at-Skagerrak-4/>
- STEFFEN W., RICHARDSON K., ROCKSTRÖM J., CORNELL S. E., FETZER I., BENNETT E. M., BIGGS R., CARPENTER S. R., DE VRIES W., DE WIT C. A., FOLKE C., GERTEN D., HEINKE J., MACE G. M., PERSSON L. M., RAMANATHAN V., REYERS B. & SÖRLIN S. (2015): Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science* 347: 1259855
- STROHM, K., SCHWEINLE, J., LIESBACH, M., OSTERBURG, B., RÖDL, A., BAUM, S., NIEBERG, H., BOLTE, A. & WALTER, K. (2012): Kurzumtriebsplantagen aus ökologischer und ökonomischer Sicht. In: Arbeitsberichte aus der VTI-Agrarökonomie 2012, 6. Braunschweig: 55 S.
- STUTTGART (2017): Programm für mehr Grün in der Stadt, Stuttgart. aufgerufen am 05.09.2017, <https://www.stuttgart.de/gruenprogramm>
- TAB BÜRO FÜR TECHNIKFOLGEN-ABSCHÄTZUNG BEIM DEUTSCHEN BUNDESTAG (2010): Chancen und Herausforderungen neuer Energiepflanzen: Endbericht zum TA-Projekt, 284 S.
- TEEB DE (2016/2017) [Hrsg]: Ökosystemleistungen in ländlichen Räumen. Grundlage für menschliches Wohlergehen und nachhaltige wirtschaftliche Entwicklung. von Haaren, C. & Albert, C. 367 S.
- TANENTZAP, A.J., LAMB, A., WALKER, S., FARMER, A. (2015): Resolving Conflicts between Agriculture and the Natural Environment. *PLoS Biol* 13(9): e1002242.
- TENNET TSO GMBH & AMPRION GMBH (Hrsg.) (2011): Unterlagen zum Raumordnungsverfahren. Erläuterungsbericht und allgemein verständliche Zusammenfassung. 380-kV-Leitung Dörpen West – Niederrhein. Stand: März 2011, aufgerufen am 27.10.2016, http://www.amprion.net/sites/default/files/pdf/MEP-WES/Bd_A_01_Erlaeuterungsbericht_und_allg_verstaendliche_Zusammenfassung.pdf
- TENNET TSO GMBH (Hrsg.) (2010): Erläuterungsbericht 380-kV-Leitung Ganderkesee – St. Hülfe Nr. 309. Planfeststellungsunterlage, Bayreuth, aufgerufen am 27.10.2016, http://www.strassenbau.niedersachsen.de/download/73515/Alternativplanung_Erlaeuterungsbericht.pdf
- TENNET TSO GMBH (Hrsg.) (2014): Presse-Information: Norwegen gibt grünes Licht für Seekabel nach Deutschland. Stand: 13.10.2014. Aufgerufen am: 27.10.2016, http://www.tennet.eu/de/fileadmin/downloads/news/Fischer/2014-10-13_PI_Norwegen_erteilt_Lizenz_fuer_NordLink.pdf
- TENNET TSO GMBH (HRSG.) (2016): Drehstrom-Erdkabel - Chancen und Herausforderungen bei 380-kV-Erdkabeln im Drehstromnetz. Stand: März 2016, aufgerufen am 27.10.2016, http://www.tennet.eu/fileadmin/user_upload/Our_Grid/Onshore_Germany/Allgemein/160308_AC_Erdkabelbroschuere.pdf
- TER HAAR, J. & SCHENNING-REULINK, U. (2014): Pilotprojekt zur Erdverkabelung eines 380-kV-Netzes in den Niederlanden. bbr Fachmagazin für Leitungsbau, Brunnenbau und Geothermie (5): Seite 21-23.
- THALER RH, SUNSTEIN C. (2009) NUDGE: Improving decisions about health, wealth, and loss aversion. Penguin, London
- THOMSEN (2017, mdl.): Schlagopfer an Windenergieanlagen. BfN-PROJEKT „NATURVERTRÄGLICHE ENERGIEVERSORGUNG AUS 100% ERNEUERBAREN ENERGIEN 2050“.

- THÜRINGER LANDTAG (2017): Gesetzentwurf der Landesregierung. Thüringer Gesetz über das Nationale Naturmonument „Grünes Band Thüringen“ (Thüringer Grünes-Band-Gesetz – ThürGBG-). Drucksache 6/4464 vom 13.09.2017. <http://www.parldok.thueringen.de/>
- TRINKS, J. (2010): Einfluss des Wasser- und Wärmehaushaltes von Böden auf den Betrieb erdverlegter Energiekabel. Dissertation an der Fakultät VI, TU Berlin. Online verfügbar unter http://www.boden.tu-berlin.de/fileadmin/fg77/_pdf/_diss/trinks_steffen.pdf
- TRÖLTZSCH, P. & NEULING, E. (2013): Die Brutvögel großflächiger Photovoltaikanlagen in Brandenburg. In: Vogelwelt (134), S. 155–179.
- UBA (2010): Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen. Umweltbundesamt. 193 S.
- UBA (2011): Aufkommen, Verbleib und Ressourcenrelevanz von Gewerbeabfällen (Kurzfassung). Dessau-Roßlau, 17 S.
- UBA (2013): Potenzial der Windenergie an Land. Studie zur Ermittlung des bundesweiten Flächen- und Leistungspotenzials der Windenergienutzung an Land. Stand: Juni 2013, aufgerufen am 27.10.2016, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/potenzial_der_windenergie.pdf
- UBA (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Stand: April 2014, aufgerufen am 27.09.2016, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/treibhausgasneutrales-deutschland-im-jahr-2050-0>
- UBA (2016): Wohnfläche. <http://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/siedlungsflaechenbelegung-fuer-wohnen#textpart-1>. Aufgerufen am: 13.07.2017
- UBA (2017): Status quo der erneuerbaren Energien. Stand: 24.03.2017, aufgerufen am 06.07.2017, <http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen>
- USOSKIN, A. (2003): Large area YBCO-coated stainless steel tapes with high critical currents. IEEE Transactions on Applied Superconductivity 13 (2): 2452 – 2457. DOI: 10.1109/TASC.2003.811819
- UVPG: Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung. Ausfertigungsdatum 12.02.1990. Neugefasst durch Bek. v. 24.2.2010 I 94. Zuletzt geändert durch Art. 2. G v. 8.9.2017 I 3370
- WANG, Y. (2014): Fundamental Elements of Applied Superconductivity in Electrical Engineering, John Wiley and Sons Inc.
- WBA (2017): Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik beim Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz: Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung – Empfehlungen an die Politik –. 242 S.
- WEBER, T. (2016): Psst! Streit um Windrad-Lärm. Erneuerbare Energien online. <https://www.erneuerbareenergien.de/psst-streit-um-windrad-laerm/150/3882/96229/>
- WGBU (2014). Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen WGBU, Klimaschutz als Weltbürgerbewegung. Sondergutachten 2014 Berlin
- WIEHE, J., RODE, M. & KANNING, H. (2010): Raumanalyse I – Auswirkungen auf Natur und Landschaft. In: Rode, M.; Kanning, H. (Hrsg.): Natur- und raumverträglicher Ausbau energetischer Biomassepfade, Stuttgart, 21-90.

- WRRL: Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik
- WULF, E. (2014): Wetterdatenbasierte Photovoltaikanlagenmodellierung und Abschätzung zukünftig relevanter Anlagenleistungen, Institut für Elektrische Energiesysteme, Leibniz Universität Hannover.
- WWF DEUTSCHLAND (Hrsg.); ÖKO-INSTITUT & PROGNOSE (2009): Modell Deutschland - Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken. Aufgerufen am 27.09.2016, http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Modell_Deutschland_Endbericht.pdf
- YUMURA, H. (2009): In-Grid Demonstration of Long-length "3-in-One" HTS Cable (Albany Project)