

Naturverträgliche Wärmewende

Paula Möhring, Christian Maaß, Matthias Sandrock,
Volker Kromrey und Dimitri Vedel

BfN-Schriften

642

2022



Naturverträgliche Wärmewende
Ergebnisse des F+E-Projekts
„Naturschutzaspekte bei zukünftigen
Regelungen zur Wärme- und Kälteerzeugung“
(FKZ 3519 86 0400)

Paula Möhring
Christian Maaß
Matthias Sandrock
Volker Kromrey
Dimitri Vedel



Bundesamt für
Naturschutz

Titelbild: Zwei unterschiedliche Aspekte der naturverträglichen Wärmewende; oben: Solarthermiekollektoren inmitten einer Blumenwiese (Steinbeis Forschungsinstitut Solites); unten: offenes Holzfeuer im Kamin (Rainer Sturm/pixelio.de).

Adressen der Autorin und der Autoren:

Paula Möhring
Christian Maaß
Dr. Matthias Sandrock

Hamburg Institut Consulting GmbH
Paul-Neveermann-Platz 5, 22765 Hamburg
E-Mail: moehring@hamburg-institut.com
maass@hamburg-institut.com
sandrock@hamburg-institut.com

Volker Kromrey
Dimitri Vedel

Bodensee-Stiftung
Fritz-Reichle-Ring 4, 78315 Radolfzell
E-Mail: volker.kromrey@bodensee-stiftung.org
dimitri.vedel@bodenseestiftung.org

Fachbetreuung im BfN:

Dipl.-Ing. Kathrin Ammermann
Dr. Georgia Erdmann

Fachgebiet II 4.3 „Naturschutz und erneuerbare Energien“

Gefördert durch das Bundesamt für Naturschutz (BfN) mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (FKZ: 3519 86 0400).

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

BfN-Schriften sind nicht im Buchhandel erhältlich. Eine pdf-Version dieser Ausgabe kann unter www.bfn.de/publikationen heruntergeladen werden.

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.



Diese Schriftenreihe wird unter den Bedingungen der Creative Commons Lizenz Namensnennung – keine Bearbeitung 4.0 International (CC BY - ND 4.0) zur Verfügung gestellt (<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.de>).

Druck: Druckerei des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV).

Gedruckt auf 100% Altpapier

ISBN 978-3-89624-403-1

DOI 10.19217/skr642

Bonn 2022

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	11
Vorwort der Präsidentin des Bundesamtes für Naturschutz.....	15
1. Zusammenfassung.....	17
1.1. Hintergrund und Forschungsgegenstand.....	17
1.2. Projektbeschreibung und Methodik.....	17
1.3. Politische Zielstellungen und Instrumente im deutschen Wärmesektor.....	18
1.4. Meta-Analyse zur Entwicklung der Wärme- und Kältebereitstellung in Deutschland bis 2050	19
1.5. Wirkung der Technologien auf Natur, Landschaft und Fläche.....	20
1.6. Stellschrauben und Empfehlungen für eine naturschutzkompatible Wärmewende	22
2. Summary.....	29
2.1. Background information on the topic	29
2.2. Project content and methodic	29
2.3. Political framework: Targets and instrumentation in the heating sector.....	30
2.4. Meta-analysis of the future heating and cooling sector	31
2.5. Impact of technologies on nature, landscape and area.....	32
2.6. Principles for nature-compatible heat transition	34
3. Politische Zielstellungen und Instrumente im deutschen Wärmesektor.....	40
3.1. Emissionshandel	41
3.2. Politische Ziele und Strategien	42
3.2.1. Europäische Ebene	42
3.2.2. Nationale Ebene.....	43
3.2.3. Gebäudeenergiegesetz	45
3.2.4. Förderung.....	46
4. Meta-Analyse zur Entwicklung der Wärme- und Kältebereitstellung in Deutschland bis 2050.....	47
4.1. Ausgangssituation: erneuerbare Wärmeerzeugung in Deutschland.....	47
4.2. Annahmen und Rahmenbedingungen der Szenarien	49
4.2.1. Klimapfade für Deutschland (BDI, Gerbert et al. 2018).....	53
4.2.2. Fraunhofer ISE: Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem (Sterchele et al. 2020)	55
4.2.3. Fraunhofer IEE: Entwicklung der Gebäudewärme und Rückkopplung mit dem Energiesystem in -95 % THG-Klimazielszenarien (Gerhardt et al. 2019).....	56
4.2.4. Rescue: Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität (Purr et al. 2019).....	57

4.2.5.	BfN: Naturverträgliche Energieversorgung aus 100 % erneuerbaren Energien 2050 (Walter et al. 2018)	60
4.2.6.	DBFZ: Systemlösungen für Bioenergie im Wärmesektor im Kontext zukünftiger Entwicklungen (Jordan et al. 2019)	61
4.2.7.	Prognos: Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050 (Kemmler et al. 2020)	63
4.2.8.	Unsicherheitsfaktoren bei den Modellierungen	64
4.3.	Entwicklung des Wärme- und Kältemarktes	65
4.3.1.	Endenergieverbrauch Wärme	67
4.3.2.	Leitungsgebundene Wärme (Fernwärme).....	68
4.3.3.	Relevante Technologien im zukünftigen Wärmesektor	70
4.3.4.	Biogene Energieträger	71
4.3.5.	Solarthermie	76
4.3.6.	Wärmepumpen	78
4.3.7.	Tiefe Geothermie	79
4.3.8.	Strom (direktelektrische Wärmeerzeugung).....	80
4.3.9.	Synthetische Brennstoffe	81
4.3.10.	Abwärme und Abfallverbrennung.....	85
4.3.11.	Fossile Energieträger	86
4.4.	Bewertung und Vergleich der Szenarien.....	90
5.	Wirkung der Technologien, Effizienzmaßnahmen und Infrastrukturen im Wärmesektor auf Natur, Landschaft und Fläche.....	96
5.1.	Wirkung auf Natur und Landschaft	97
5.1.1.	Erneuerbarer Strom	97
5.1.2.	Power-to-Heat	98
5.1.3.	Power-to-Gas	99
5.1.4.	Wärmepumpe	99
5.1.5.	Biogene Brennstoffe	104
5.1.6.	Solarthermie	113
5.1.7.	Gebäudeeffizienz.....	117
5.1.8.	Wärmenetze	121
5.1.9.	Saisonale Wärmespeicher	122
5.2.	Flächenwirkung der Technologien im Vergleich.....	122
5.2.1.	Erneuerbarer Strom	124
5.2.2.	Erneuerbare Wärme: Power-to-Heat	133
5.2.3.	Erneuerbare Wärme: Wärmepumpe	133
5.2.4.	Erneuerbare Wärme: Power-to-Gas	134
5.2.5.	Erneuerbare Wärme: Biogene Brennstoffe	134
5.2.6.	Erneuerbare Wärme: Solarthermie	138
5.2.7.	Erneuerbare Wärme: Wärmenetze	138
5.2.8.	Erneuerbare Wärme: Saisonale Wärmespeicher	139
5.2.9.	Zusammenfassung	139

6.	Systematische Ableitung von Stellschrauben und Handlungsempfehlungen für eine naturschutzkompatible Wärmewende.....	144
6.1.	Synthese: Relevanz im Wärmesektor und Naturschutzwirkung der Technologien ...	145
6.2.	Gebäudeeffizienz steigern und naturverträglich ausgestalten.....	154
6.2.1.	Gebäudeseitige Effizienzmaßnahmen zur quantitativen Steuerung des Wärmeverbrauchs	154
6.2.2.	Naturverträgliche Ausgestaltung von Effizienzmaßnahmen bei der Auswahl von Dämmmaterialien und beim Einsatz von Grünfassaden.....	156
6.3.	Wärmenetze zur Integration von klima- und naturschutzfreundlichen Wärmetechnologien.....	158
6.4.	Quantitative Steuerung der Biomassenachfrage aus dem Wärmesektor	160
6.4.1.	Dezentraler Einsatz von Biomasse	164
6.4.2.	Zentraler Einsatz in Wärmenetzen und für Prozesswärme	165
6.5.	Qualitative Steuerung der Biomasse in Richtung naturverträglicher Ressourcen.....	166
6.5.1.	Holzige Biomasse zur Verbrennung.....	167
6.6.	Biomasse zur Vergärung	169
6.7.	Naturschutzkompatible und flächeneffiziente Technologien fördern	171
6.8.	Naturschutzorientierte räumliche Verteilung und Standortwahl.....	173
6.9.	Naturschutzorientierte Ausgestaltung von Wärmeerzeugungsanlagen	177
7.	Forschungsbedarf.....	181
	Quellenverzeichnis.....	182
	Anhang: Beschreibung der Technologien, Effizienzmaßnahmen und Infrastrukturen mit dem Fokus auf den technischen und wirtschaftlichen Aspekten	196

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Ausgewählte Strategien, Gesetze und Förderungen auf EU- und nationaler Ebene, die relevant für den Wärme- bzw. Kältemarkt in Deutschland sind (Quelle: Hamburg Institut).....	41
Abb. 2: Wärmeverbrauch aus erneuerbaren Energien im Jahr 2019. Quelle: Hamburg Institut basierend auf Umweltbundesamt (2020).	48
Abb. 3: BAFA Heizen mit erneuerbaren Energien. Anträge im ersten Halbjahr 2020 im Vergleich zu 2019. Quellen: Bröer (2020), Roider (2020).....	48
Abb. 4: Grafische Darstellung zur Erläuterung von Boxplot-Diagrammen.....	65
Abb. 5: Bandbreite der Szenarienergebnisse: Endenergie in den Jahren 2030 und 2050. .	67
Abb. 6: Entwicklung des Endenergiebedarfs im Bereich Gebäudewärme.	68
Abb. 7: Entwicklung des Endenergiebedarfs im Bereich Industrielle Prozesswärme.	68
Abb. 8: Bandbreite der Szenarienergebnisse: Fernwärmeerzeugung absolut und Fernwärmeanteil in den Jahren 2030 und 2050.	69
Abb. 9: Entwicklung der Fernwärmeerzeugung (absolut).	69
Abb. 10: Entwicklung des Fernwärmeanteils an der Gebäudewärme.....	69
Abb. 11: Gebäudewärme 2050 (inkl. Fernwärme), Durchschnitt aller Szenarien mit angegebenen Werten für das Jahr 2050.	70
Abb. 12: Prozesswärme 2050, Durchschnitt aller Szenarien mit angegebenen Werten für das Jahr 2050.	71
Abb. 13: Bandbreite der Szenarienergebnisse: Wärmeerzeugung aus Biomasse in den Jahren 2030 und 2050.	72
Abb. 14: Biogene Brennstoffe im Gebäudewärmesektor.	72
Abb. 15: Biogene Brennstoffe in der Prozesswärmeerzeugung.....	72
Abb. 16: Bandbreite Szenarienergebnisse: Wärmeerzeugung aus Solarthermie in den Jahren 2030 und 2050.	77
Abb. 17: Solarthermische Erzeugung in der Gebäudewärme.	77
Abb. 18: Solarthermische Erzeugung in der Prozesswärme.....	77
Abb. 19: Bandbreite Szenarienergebnisse: Wärmeerzeugung mittels Umweltwärme/Wärmepumpen.....	78
Abb. 20: Gebäudewärme aus Umweltwärme mittels Wärmepumpen.	78
Abb. 21: Prozesswärme aus Umweltwärme mittels Wärmepumpen.....	79
Abb. 22: Bandbreite der Szenarienergebnisse: Wärmeerzeugung aus Tiefengeothermie in den Jahren 2030 und 2050.	79
Abb. 23: Gebäudewärme aus Tiefengeothermie.	80
Abb. 24: Bandbreite der Szenarienergebnisse: Wärmeerzeugung aus Strom (Direktnutzung) in den Jahren 2030 und 2050.	80
Abb. 25: Gebäudewärme aus direkter Stromnutzung.....	81
Abb. 26: Prozesswärme aus direkter Stromnutzung.....	81

Abb. 27: Bandbreite der Szenarienergebnisse: Wärmeerzeugung aus synthetischen Brennstoffen in den Jahren 2030 und 2050.	82
Abb. 28: Gebäudewärmeerzeugung aus synthetischen Brennstoffen.	83
Abb. 29: Prozesswärmeerzeugung aus synthetischen Brennstoffen.	83
Abb. 30: Bandbreite Szenarienergebnisse: Wärmeerzeugung aus Abfall/Abwärme 2030 und 2050.....	85
Abb. 31: Gebäudewärmeerzeugung aus thermischer Abfallverwertung und industrieller Abwärme.	85
Abb. 32: Prozesswärmeerzeugung aus thermischer Abfallverwertung und industrieller Abwärme.	86
Abb. 33: Bandbreite der Szenarienergebnisse: Wärmeerzeugung aus Erdgas in den Jahren 2030 und 2050.	86
Abb. 34: Gebäudewärmeerzeugung aus Erdgas.....	87
Abb. 35: Prozesswärmeerzeugung aus Erdgas, Erdölgas und sonstigen fossilen Gasen. ...	87
Abb. 36: Bandbreite der Szenarienergebnisse: Wärmeerzeugung aus Kohle in den Jahren 2030 und 2050.....	87
Abb. 37: Gebäudewärmeerzeugung aus Kohle.....	88
Abb. 38: Prozesswärme aus Kohle.	88
Abb. 39: Bandbreite der Szenarienergebnisse: Wärmeerzeugung aus Erdöl in den Jahren 2030 und 2050.....	88
Abb. 40: Gebäudewärmeerzeugung aus Erdöl.....	89
Abb. 41: Prozesswärmeerzeugung aus Erdöl.	89
Abb. 42: Umwandlungseffizienzen von Strom in Wärme mittels Wärmepumpe, Elektrokessel (PtH) und synthetischen Brennstoffen (Wasserstoff und Methan). Quelle: Hamburg Institut auf Basis von BMWi (2021): Dialog Klimaneutrale Wärme.....	98
Abb. 43: Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Jahr 2019. (Quelle: Umweltbundesamt auf Basis AGEE-Stat)	125
Abb. 44: Flächenbedarf für die Erzeugung einer MWh Strom innerhalb eines Jahres in Deutschland.....	131
Abb. 45: Sensitivität des Flächenbedarfs zur Erzeugung von einer kWh Wärme und Strom in einer Biogas-KWK-Anlage gegenüber dem eingesetzten Substratmix (Anbau-/Reststoffe).	136
Abb. 46: Sensitivität des Flächenbedarfs zur Erzeugung von einer kWh Wärme und Strom in einer Biomethan-KWK-Anlage gegenüber dem eingesetzten Substratmix (Anbau-/Reststoffe).....	136
Abb. 47: Flächenbedarfe für die Erzeugung einer MWh Wärme innerhalb eines Jahres in Deutschland. Die mit * gekennzeichneten Technologien erzeugen als KWK-Anlagen kombiniert Wärme und Strom. Um einen Vergleich zu ermöglichen, wurde hier der Gesamtwirkungsgrad dieser Technologien verwendet.	141

Abb. 48: Darstellung der Grundprinzipien für die Biomassenutzung im Wärmesektor aus Naturschutzsicht sowie der anzupassenden regulatorischen Bedingungen übergreifend und in den Anwendungen dezentral (Gebäudewärme) und zentral (Wärmenetze)/Prozesswärme.....	163
Abb. 49: Kennzeichnung der benachteiligten Gebiete in Baden-Württemberg. Quelle: Energieatlas BW (https://www.energieatlas-bw.de/sonne/freiflachen/benachteiligte-gebiete-in-baden-wuerttemberg).....	175
Abb. 50: Thermische Nutzung von Bodenseewasser, Planungskarte. Quelle: IGKB (2018).....	176
Abb. 51: Vergleich des direkten Systems mit einem indirekten System. Quelle: Hamburg Institut.....	179
Abb. 52: 1-MW-Großwärmepumpe mit Umgebungsluft als Wärmequelle, die in das Fernwärmenetz des dänischen Ortes Slagslund einspeist. (Quelle: PlanEnergi) .	200

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Auszug aus den technologiespezifischen Anteilen für erneuerbare Energien unter Angabe des voraussichtlichen gesamten Bruttoendenergieverbrauchs je Technologie und Sektor in TWh (NCEP). Quelle: BMWi 2020 (angepasst).....	45
Tab. 2:	Erwartete Zielpfade für die Biomassenachfrage im NCEP. Quelle: BMWi 2020.	45
Tab. 3:	Überblick der untersuchten Szenarien	50
Tab. 4:	Überblick zu den Szenarien der Rescue-Studie. Darstellung übernommen von Purr et al. (2019).....	58
Tab. 5:	Für die Metaanalyse abgeleitete Annahmen bzgl. des Biomasseeinsatzes im BfN-Szenario, basierend auf dem projizierten Endenergiebedarf im Jahr 2050: Variante 2: Elektrifizierung 50 % und Gebäudesanierung 2,64 % pro Jahr.	61
Tab. 6:	Menge, Herkunft und Art der Biomasse in den untersuchten Szenarien. Zur Verfügung stehende Potenziale: Primärenergie, tatsächlich genutzte Biomasse im Wärmesektor: Endenergie.....	73
Tab. 7:	Nutzung der Biomasse zur Wärmeerzeugung nach Sektoren und Anwendungen..	75
Tab. 8:	Steckbrief Natur- und Landschaftswirkung von Wärmepumpen.	100
Tab. 9:	Steckbrief Natur- und Landschaftswirkung bei Vergärung von Anbaubiomasse...	107
Tab. 10:	Steckbrief Natur- und Landschaftswirkung bei Vergärung von Rest- und Abfallstoffen.....	109
Tab. 11:	Steckbrief Natur- und Landschaftswirkung bei Verbrennung von holziger Anbaubiomasse	110
Tab. 12:	Steckbrief Natur- und Landschaftswirkung Verbrennung von holziger Biomasse: Wald, Landschaftspflege.....	111
Tab. 13:	Steckbrief Natur- und Landschaftswirkung von Solarthermie-Freiflächenanlagen.	114
Tab. 14:	Steckbrief Natur- und Landschaftswirkung von Gründächer und Fassadenbegrünung.	118
Tab. 15:	Steckbrief Natur- und Landschaftswirkung von energetischer Sanierung.....	119
Tab. 16:	Ermittlung des flächenspezifischen Stromertrags für Offshore-WEA anhand von BSH (2020).....	127
Tab. 17:	Substrateinsatz in Biogasanlagen (2017). (Kern et al. 2010), FNR Faustzahlen ..	128
Tab. 18:	Substrateinsatz in Biogasanlagen mit Gasaufbereitung zur Herstellung von Biomethan (2016). (Kern et al. 2010), FNR Faustzahlen.....	128
Tab. 19:	Anteile der Stromerzeugungstechnologien am EE-Strommix, spezifische Energieerträge und Flächenbedarfe. Auf Basis von Abbildung 48. Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Jahr 2019. (Umweltbundesamt auf Basis AGEE-Stat)	130
Tab. 20:	Spezifische Wärmeerträge und Flächenbedarfe für die Erzeugung einer MWh Wärme von EE-Technologien.	140
Tab. 21:	Synthese der Ergebnisse aus AP 2 und AP 3 und Entwicklung der Gesamtrelevanz der Technologien.	146

Tab. 22: Natürliche Dämmmaterialien mit Wärmeleitfähigkeit und spezifischer Wärmekapazität	157
--------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
BAU	Business-as-usual
BCG	Boston Consulting Group
BDI G95	Szenario „Globaler Klimaschutz“ 95 %-THG-Reduktion der BDI-Studie
BDI N80	Szenario „Nationale Alleingänge“ 80 %-THG-Reduktion der BDI-Studie
BDI	Bundesverband der Deutschen Industrie
BEG	Bundesförderung für effiziente Gebäude
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
BfN 2	Szenario II der BfN-Studie (2018)
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
BuReg	Bundesregierung
CCS	Carbon-Capture-and-Storage
CCU	Carbon-Capture-and-Utilization
CO _{2e}	CO ₂ -Äquivalente (Maß für das Treibhausgaspotenzial)
DBFZ Maj	Szenario „Major biomass preallocation in the heating sector“ (DBFZ)
DBFZ Min	Szenario „Minor biomass preallocation in the heating sector“ (DBFZ)
DBFZ	Deutsches Biomasseforschungszentrum
DEHSt	Deutsche Emissionshandelsstelle
DH	District heat
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EffSTRA	Energieeffizienzstrategie 2050
EFH	Einfamilienhaus
EnEV	Energieeinsparverordnung
(EU-)ETS	European Union Emissions Trading System
FK	Flachkollektoren (Solarthermie)
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GHD	Gewerbe, Handel und Dienstleistungen
GHG	greenhouse gas
GWS	Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung
HH	Haushalte
IEE Mod Bio	Szenario moderate Sanierung, dezentrale Biomassenutzung (IEE)
IEE Mod ExitBio	Szenario moderate Sanierung, Ausstieg dezentrale Biomasse (IEE)

IEE San Bio	Szenario hohe Sanierung, dezentrale Biomassenutzung (IEE)
IEE San ExitBio	Szenario hohe Sanierung, Ausstieg dezentrale Biomasse (IEE)
IEE	Fraunhofer Institut für Energiewirtschaft und Energiesystem-technik
IINAS	International Institute for Sustainability Analysis and Strategy
iKWK	innovative Kraft-Wärme-Kopplung
Ind	Industrie
ISE Beh	Szenario „Beharrung“ der ISE-Studie
ISE Inak	Szenario „Inakzeptanz“ der ISE-Studie
ISE Ref	Szenario „Referenz“ der ISE-Studie
ISE Suf	Szenario „Suffizienz“ der ISE-Studie
ISE	Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme
k. A.	keine Angabe
KSP	Klimaschutzplan
KSPr	Klimaschutzprogramm 2030
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz
MFH	Mehrfamilienhaus
NawaRo	Nachwachsende Rohstoffe
NCEP	Integrierter Nationaler Energie- und Klimaplan
nEHS	Nationales Emissionshandelssystem
PRO 30	Szenario Klimaschutzprogramm 2030 der Prognos-Studie
PRO	Prognos-Studie (2020)
ProgRess	Deutsches Ressourceneffizienzprogramm
PtH	Power-to-Heat
PtG	Power-to-Gas
PtL	Power-to-Liquid
PtX	Power-to-X (Oberbegriff für PtG und PtL)
PV	Photovoltaik
PW	Prozesswärme
RES	Renewable energy sources
RES 1	Szenario GreenEe1 der Rescue-Studie
RES 2	Szenario GreenEe2 der Rescue-Studie
RES-E	Renewable electricity
RES Late	Szenario GreenLate der Rescue-Studie
RES Life	Szenario GreenLife der Rescue-Studie
RES Me	Szenario GreenMe/Material Efficiency der Rescue-Studie

RES Sup	Szenario GreenSupreme der Rescue-Studie
RES	Rescue-Studie (2019)
RMC	Primärrohstoffkonsums
SRP	Short rotation plantation
RW	Raumwärme
ST	Solarthermie
THG	Treibhausgase
UBA	Umweltbundesamt
VR	Vakuurröhrenkollektoren (Solarthermie)
WN	Wärmenetz
WP	Wärmepumpe
WW	Warmwasser

Vorwort der Präsidentin des Bundesamtes für Naturschutz

Die Wärmewende ist ein wesentlicher Baustein der Energiewende. Mit dem Koalitionsvertrag, Gesetzen wie dem Klimaschutzgesetz, dem Gebäudeenergiegesetz und dem Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz sowie den Bundesförderungen für effiziente Wärmenetze und effiziente Gebäude hat die Bundesregierung die Weichen gestellt, um die Wärmewende voranzubringen.

Bislang steht die Reduktion der Emissionen von Treibhausgasen im Fokus. Die Komponente der Biodiversitätskrise ist nicht minder relevant, wird allerdings bislang nicht in gleichem Maße in Angriff genommen.

Daher war es Ziel dieses Vorhabens, die Pfade aufzuzeigen, auf die die Energiewende im Wärmebereich auf Natur und Landschaft wirkt. Darüber hinaus sollten Faktoren und Rahmenbedingungen, welche die Entwicklung im Wärmemarkt steuern identifiziert und Handlungsempfehlungen die die Wärmewende in eine naturverträgliche Richtung lenken, erarbeitet werden.

Dazu wurden Annahmen der regulatorischen Rahmenbedingungen von Szenarien verglichen und Zusammenhänge mit möglichen Entwicklungen hergestellt. Die einzelnen Technologien zu Wärmebereitstellung, -transport und -speicherung wurden in ihrer spezifischen Wirkung auf Natur und Landschaft beschrieben sowie ihr Flächenbedarf pro Wärmeeinheit ermittelt.

Die Grundforderungen, die sich für eine naturschutzfachlich positive Entwicklung der Wärmewende ergeben sind folgende: 1. Eine höhere Gebäudeeffizienz und deren naturschutzfachliche Ausgestaltung sollten forciert werden, da jede Einsparung beim Endenergiebedarf die Notwendigkeit von Eingriffen in die Fläche verringert und durch adäquate Sanierungsmaßnahmen Lebensräume geschützt oder geschaffen werden können. 2. Naturschutzkompatible und flächeneffiziente Technologien - vor allem Abwärmequellen und Wärmepumpen und deren Integration in Wärmenetze, ebenso wie die Nutzung von Wärmespeichern, wie zum Beispiel Erdbeckenspeicher oder Aquifere sollten gefördert werden, wobei naturschutzfachlich wertvolle Flächen auszuschließen sind. 3. Wenn alternative Wärmebereitstellungsmöglichkeiten fehlen, dann kann Biomasse genutzt werden. Dies sollte naturverträglich, im Wesentlichen durch die Nutzung von Abfall- und Reststoffen, geschehen. Als Beispiel ist hier die Nutzung von Gülle zur Biogaserzeugung oder von Waldrestholz aus nachhaltiger Forstwirtschaft zu nennen. Die Wärmewende betrifft viele Regelungsbereiche, die den Naturschutz direkt berühren, wenn zum Beispiel Gebäudedämmungen zum Verlust von Habitaten führen, oder indirekt, indem zum Beispiel die Förderung effizienter Wärmetechnologien dazu führt, dass der Flächenbedarf für die Erzeugung erneuerbarer Energien reduziert wird. Deshalb ist es hilfreich, die verschiedenen Anknüpfungspunkte für Regelungsmöglichkeiten zu nennen. Konkrete Handlungsempfehlungen beziehen sich unter anderem auf Vorschläge zu Verbesserungen im Gebäudeenergiegesetz, in der Bundesförderung effiziente Gebäude, im Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz, sowie Landesbauordnungen und Bauleitplanungen für Gebäude auf Länderebene und kommunaler Ebene und werden im folgenden Bericht näher ausgeführt.

Der Fokus der Wärmewende sollte insgesamt auf einer Reduktion des Wärmebedarfs liegen. Denn jede eingesparte Kilowattstunde, ob durch Sanierungsmaßnahmen oder effiziente Strom- und Wärmeerzeugungstechnologien, spart Fläche und bietet eine Chance für Natur und Landschaft.

Dipl. biol. Sabine Riewenherm

Präsidentin des Bundesamtes für Naturschutz

1. Zusammenfassung

1.1. Hintergrund und Forschungsgegenstand

Während die Bewältigung der Klimakrise eine der dringlichsten Herausforderungen ist, stellt die Biodiversitätskrise ein nicht minder relevantes Problem dar. Heute sind mehr Arten vom Aussterben bedroht als jemals zuvor in der Menschheitsgeschichte. Eine erstmalige gemeinsame Analyse des Weltklimarates (IPCC) und des Weltbiodiversitätsrates (IPBES) wurde im Juni 2021 vorgelegt. Das wissenschaftliche Ergebnisprotokoll eines gemeinsamen Workshops der beiden Räte verdeutlicht, dass beide Prozesse (Klimawandel und Biodiversitätsverlust) sich gegenseitig verstärken (Pörtner et al. 2021). Durch politische Strategien werden sie bislang weitgehend unabhängig voneinander in Angriff genommen.

Die vorliegende Arbeit setzt an ebendieser Stelle an: Politische Instrumente sollen so ausgestaltet werden, dass sich Synergieeffekte für Klima- und Naturschutz ergeben. Auf diese Weise ist maximaler Nutzen erzielbar, häufig nur mit überschaubarem Mehraufwand. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Berücksichtigung von Naturschutzaspekten auch für eine verbesserte Akzeptanz der erneuerbaren Energien in der (Lokal-)Bevölkerung sorgen kann.

Während der Konflikt zwischen Naturschutz und Erneuerbaren Energien forschungsseitig in zahlreichen Vorhaben mit dem Fokus auf Stromerzeugung aus Wind, Freiflächen-PV sowie Biomasse umfassend untersucht wurde, stehen für die Wärmeversorgung nicht im selben Umfang spezifische Vorarbeiten zur Verfügung. Die vorliegende Arbeit besteht in der Schaffung eines Orientierungsrahmens und einer Wissensbasis zur Integration von Naturschutzbelangen in die Entwicklung der zukünftigen Wärme- und Kälteversorgung. Darüber hinaus werden konkrete Handlungsempfehlungen für die Anpassung bestehender oder die Schaffung neuer politischer Instrumente diskutiert.

1.2. Projektbeschreibung und Methodik

Die Analyse der aktuellen politischen Ziele sowie der Gesetze und Instrumente im Wärmebereich erfolgt in Kapitel 3. Der Schwerpunkt liegt auf der Analyse nationaler Gesetzgebung. Es werden auch EU-Ziele und beispielhaft Instrumente auf Landesebene thematisiert. (AP 1)

In der Metaanalyse in Kapitel 4 wird die zukünftige Entwicklung des Wärme- und Kältesektors in Deutschland untersucht. 22 Szenarien aus sieben Studien werden hinsichtlich der Entwicklung bis 2050 verglichen. Es werden Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Szenarien verdeutlicht und Zusammenhänge zwischen den getroffenen Annahmen bzgl. regulatorischer Rahmenbedingungen und der Entwicklung der Wärmeerzeugung hergestellt. (AP 2)

Im dritten AP werden Technologien, Effizienzmaßnahmen und Infrastrukturen (TEI) zur erneuerbaren Wärme- und Kälteerzeugung vorgestellt und ihre jeweilige spezifische Wirkung auf Natur, Landschaft und Fläche ermittelt (vgl. Kapitel 5).

Im nächsten Schritt werden die Ergebnisse zusammengeführt (Kapitel 6) und darauf basierend im vierten Arbeitspaket Grundprinzipien für eine naturschutzkompatible Wärmewende abgeleitet. Die konkreten Handlungsempfehlungen für die Anpassung der instrumentellen Ausgestaltung (AP 5) resultieren direkt aus den allgemeingültigen Grundprinzipien (AP 4) und dem Abgleich mit der aktuellen Ausgestaltung der Regulatorik. Daher werden die Ergebnisse gemeinsam in Kapitel 6 dargestellt.

1.3. Politische Zielstellungen und Instrumente im deutschen Wärmesektor

Folgende nationale Klimaziele gelten für den Wärmesektor (Stand Juli 2020):

- Klimaneutrale Wärmeversorgung im Jahr 2050 (Klimaschutzgesetz (KSG) 2019) bzw. Update durch am 31.8.2021 novelliertes KSG: Klimaneutralität bis 2045; mit Zwischenzielen 2030: -65 % (bislang: -55 %) und 2040: -88 %;
- Zwischenschritt im Jahr 2030: Energiewirtschaft -62 % bis -61 %, Gebäude -67 % bis -66 %, Industrie -51 % bis -49 % (Klimaschutzplan 2050 (2016)) bzw. Update KSG 2021: Energiewirtschaft -77 %, Gebäude -68 %, Industrie -58 %;
- Angestrebter EE-Anteil am Endenergieverbrauch Wärme und Kälte im Jahr 2030: 27 % (Energieeffizienzstrategie 2050 (2019));
- Anteil erneuerbarer Energien im Wärmesektor soll von 2021 bis 2030 um 1,1 % jährlich erhöht werden – bei Berücksichtigung von Abwärme um 1,3 %. (RED II 2018 Art. 23 – wird mit der Novellierung der RED II 07/2021 verbindlich);
- Fernwärme: EE-Anteil soll jährlich um 2,1 % wachsen (indikatives Ziel, Fit for 55 Novellierung RED II 07/2021).

Relevante Instrumente im Wärmesektor (Auswahl der nationalen Instrumente):

BEHG – nationaler CO₂-Preis für Wärme und Verkehr (nEHS): Die Teilnehmenden (Inverkehrbringer der Brennstoffe) erwerben jährlich Zertifikate im Umfang ihrer Emissionen. Die Festpreise steigen von 25 €/t CO₂ (2021) auf 55 €/t CO₂ (2025) an, danach werden die Preise vsl. über Versteigerungen festgelegt (2026 Preiskorridor von 55 bis 65 €/t). Alle Brennstoffe, bei deren Verbrennung CO₂ entsteht, werden in das nEHS einbezogen. Dazu gehören Benzin, Diesel, Heizöl, Erdgas, Flüssiggas und Kohle. Biogene Brennstoffe zählen ab 2023 dazu, erfüllen diese jedoch Nachhaltigkeitskriterien, sind sie von der Zertifikatpflicht ausgenommen.

Ordnungsrecht: Das Gebäudeenergiegesetz (GEG) führt EnEG, EEWärmeG und EnEV zusammen und enthält Anforderungen an die energetische Qualität von Gebäuden (keine Verschärfung, lediglich Umsetzung europäischer Vorgaben), die Erstellung und die Verwendung von Energieausweisen sowie an den Einsatz erneuerbarer Energien in Gebäuden. Zudem werden neue monovalente Ölheizungen ab 2026 verboten.

Ordnungsrecht: Die Wärmelieferverordnung (WärmeLV und § 556c BGB): regelt u. a. die Umstellung einer vom Vermieter betriebenen Heizung auf die Wärmeversorgung durch Dritte (Anschluss an ein Wärmenetz). Diese Umstellung darf für den Mieter keine höheren Kosten verursachen als in den drei vorhergehenden Jahren. Die Regelung blockiert in vielen Fällen den Umstieg auf eine Fernwärmeversorgung in gasversorgten Bestandsobjekten.

Förderprogramme für Gebäude und Wärmenetze:

- Bundesförderung effiziente Gebäude (BEG): fördert investiv den Einbau erneuerbarer Heizsysteme (u. a. Biomasse) bzw. den Anschluss an ein Wärmenetz, sofern dieses einen EE-Anteil von > 25 % aufweist (Einzelmaßnahmen). Fördert die Errichtung oder Sanierung von Gebäuden auf Effizienzhausniveau 40/55, sofern erneuerbare Energien für die Wärme-/Kälteerzeugung eingesetzt werden (auch Biomasse). Zudem sind Dach- und Fassadendämmungen als Einzelmaßnahmen förderfähig.
- MAP/KfW-Förderung: Investitionen in erneuerbare Wärmetechnologien
- Bundesförderung effiziente Wärmenetze (BEW, vsl. ab 2021) ersetzt dann Wärmenetzsysteme 4.0: Machbarkeits- und Transformationsstudien für Wärmenetze; Errichtung/ Transformation von WN; betriebliche Förderung für Solarthermie und Wärmepumpen.
- KWKG: Förderung für KWK-Anlagen sowie Wärmenetze und -speicher.
- KWKG/iKWK: Förderung von innovativen KWK-Systemen, bestehend aus KWK-Anlage, PtH-Modul und erneuerbarem Wärmeerzeuger. Der iKWK-Zuschlag wird für 1-10 MW in

gesonderten Ausschreibungsverfahren ermittelt, ab 10 MW wird ein fester EE-Bonus gezahlt (Förderquote steigend in Abhängigkeit des EE-Anteils des iKWK-Systems).

Biomasse soll nach aktuellen politischen Zielsetzungen weiterhin zur Erzeugung von Wärme eingesetzt werden. Es wird allerdings anerkannt, dass das verfügbare inländische Potenzial durch Flächenrestriktionen begrenzt ist. Einige der Instrumente, wie z. B. der nationale Emissionshandel, das GEG sowie Förderprogramme schaffen attraktive Rahmenbedingungen für die biomassebasierte Wärmeerzeugung. Ein zukünftiger Anstieg der Biomassenutzung im Gebäudewärmesektor ist unter aktuellen regulatorischen Bedingungen wahrscheinlich.

1.4. Meta-Analyse zur Entwicklung der Wärme- und Kältebereitstellung in Deutschland bis 2050

Die untersuchten Szenarien unterscheiden sich u. a. hinsichtlich Biomasserestriktionen, Effizienz-niveaus im Gebäudesektor und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen sowie gesellschaftlichen Einstellungen und Verhaltensweisen.

Klimapfade für Deutschland (Gerbert et al. 2018): Szenarien N80 und G95 mit Schwerpunkten u. a. auf unterschiedlichen THG-Reduktionszielen.

Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem (Sterchele et al. 2020): Schwerpunkte auf den gesellschaftlichen Verhaltensweisen; ausgewertet wurden vier unterschiedliche Szenarien.

Entwicklung der Gebäudewärme und Rückkopplung mit dem Energiesystem in -95 % THG-Klimaszenarien (Gerhardt et al. 2019): In vier Szenarien werden die Sensitivitäten des Wärme- und Kältemarktes für den Ausstieg aus der dezentralen Biomassenutzung sowie für die Gebäudesanierung untersucht.

RESCUE – Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität (Purr et al. 2019): Die Schonung natürlicher Ressourcen ist hier das maßgebliche Ziel, der Leitindikator zur Messung des Fortschritts sind die Gesamtrohstoffproduktivität und Aspekte der Flächennutzung. Insgesamt sechs Szenarien unterscheiden sich hinsichtlich Lebensstiländerungen, Wirtschaftswachstum und im zeitlichen Ambitions- und Handlungsverlauf.

Naturverträgliche Energieversorgung aus 100 % erneuerbaren Energien 2050 (Walter et al. 2018) berücksichtigt u. a. Ziele des Naturschutzes (z. B. Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt).

Systemlösungen für Bioenergie im Wärmesektor im Kontext zukünftiger Entwicklungen (Jordan et al. 2019): Zwei Szenarien mit unterschiedlicher Biomasseverfügbarkeit im Wärmesektor.

Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050 (Kemmler et al. 2020): untersucht die Wirkung des Klimaschutzprogramms 2030. Der Zielhorizont ist das Jahr 2030, ein Vergleich mit den anderen Szenarien ist daher nur eingeschränkt möglich.

Die Modellierungen des Wärmemarktes bis 2050 resultieren in großen Bandbreiten der Wärmeerzeugung auf Basis unterschiedlicher Technologien. Dieses Ergebnis überrascht wenig vor dem Hintergrund der stark variierenden Rahmenbedingungen der 22 Szenarien. Auch wenn sich die Ergebnisse quantitativ voneinander unterscheiden, lässt deren Interpretation Rückschlüsse zu, die innerhalb der Szenarien konsistent sind.

Bei der Erzeugung von Gebäudewärme dominiert die Wärmepumpentechnologie zukünftig deutlich: Durchschnittlich 71 % der Gebäudewärme 2050 werden mittels Wärmepumpen bereitgestellt. Bei der Prozesswärmeerzeugung sind die Stromdirektnutzung, synthetische Gase

(PtG; synthetisches Methan und Wasserstoff) sowie Biomasse die relevantesten Technologien, zusammen machen sie 78 % der Prozesswärmeerzeugung 2050 aus.

Die Interpretation der Szenarien inklusive der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zeigt, dass große Mengen an Strom- oder strombasierten Brennstoff-Importen (PtX-Importe) ineffizient sind und zu hohen Mehrkosten führen. Gerade wenn die dezentralen Gasheizungen bestehen bleiben (Szenario ISE Beh), oder aber bei verstärkter Biomassenutzung im dezentralen Gebäudesektor, durch die Biomassepotenziale bei der Spitzenlast- und Prozesswärmeerzeugung in der Industrie fehlen (IEE Bio), müssen PtX-Importe die Erreichung der Emissionsziele gewährleisten. Der effizienteste (unter volkswirtschaftlichen Aspekten kostengünstigste) klimaneutrale Wärmemarkt besteht, wenn der rechtzeitige Ausstieg aus der dezentralen Biomassenutzung gelingt. Das belegen die Ergebnisse der ISE-Studie, BDI-, IEE- und der DBFZ-Studien, die diese Sensitivitäten untersuchen. Der notwendige Markthochlauf von alternativen Erzeugungsmöglichkeiten für erneuerbare Wärme im dezentralen Bereich (v.a. Wärmepumpen) sowie der Ausbau des Fernwärmenetzes sollten bereits in den kommenden Jahren geschehen, um Lock-in-Effekte und falsche Weichenstellungen zu vermeiden.

Effizienzmaßnahmen, die den Energieverbrauch verringern und auch die Einbindung erneuerbarer Wärmetechnologien vereinfachen, spielen in allen Szenarien eine relevante Rolle. Je nach Schwerpunkt der Studie werden unterschiedliche Annahmen getroffen: Während in der IEE-Studie beispielsweise ein geringer Kostenunterschied zwischen den ambitionierten und moderaten Sanierungsszenarien festgestellt wurde (EE-Wärme kann den höheren Wärmebedarf kostengünstig bereitstellen) und der rechtzeitige Ausstieg aus der dezentralen Biomassenutzung viel entscheidender für eine kostengünstige Erreichung der Klimaziele ist, so wird in der RESCUE-Studie ein anderer Standpunkt vertreten. Die Sanierungsrate sei von 1 % auf mind. das 2,5-fache anzuheben, um beim Klimaschutz Ressourcen zu schonen.

Biomasse sollte langfristig in der dezentralen Gebäudewärme eine untergeordnete Rolle spielen. Vor allem aus gesamtökonomischer Sicht sollte Biomasse eher zur Fern- und Prozesswärmeerzeugung eingesetzt werden. In den Jahren bis ca. 2040 hängt der Einsatz der Biomasse stark von den Rahmenbedingungen ab. Biomasse in dezentralen Anwendungen sorgt für eine günstige Erreichung des Sektorziels für Gebäude im Jahr 2030 (IEE). Vor allem in Hybridsystemen in dezentralen Anwendungen ist Biomasse vsl. bis etwa 2040 wettbewerbsfähig. In den darauffolgenden Jahren bis 2050 sorgt die höhere Zahlungsbereitschaft im Industriesektor jedoch für die zunehmende Verlagerung der Biomasse in die Prozesswärmeerzeugung (DBFZ, BDI). Ein Ergebnis der Studie Klimaneutrales Deutschland ist, dass für eine kostenoptimale Senkung der industriellen Energieemissionen eine aktive Lenkung der Biomasse aus den weniger effizienten Einsatzfeldern (z. B. Strom und Gebäudewärme) in die Industrie erforderlich sei. Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von Biomasse in Hybridsystemen im dezentralen Gebäudebereich (DBFZ).

1.5. Wirkung der Technologien auf Natur, Landschaft und Fläche

Wie sich Wärmeerzeugungstechnologien, Effizienzmaßnahmen und Wärmeverteilung sowie -speicherung auf Natur, Landschaft und Fläche auswirken, wird in Kapitel 5 analysiert. Es werden Flächenverbräuche der einzelnen Technologien ermittelt und verglichen, ohne die naturschutzfachliche Qualität der Flächen zu berücksichtigen.

Bei der direkten Umwandlung von EE-Strom in Wärme mittels Power-to-Heat-Anlagen werden 36 m²/MWh verbraucht. PtG weist einen Flächenbedarf von etwa 80 bis 90 m²/MWh Wärme auf. EE-Strom durchläuft für PtG-Wärme mindestens zwei Umwandlungsschritte (Elektrolyse plus ggf. Methanisierung und Wärmeerzeugung in Brennstoffzelle bzw. Gas-KWK/-Kessel), daher ist PtG weniger effizient als PtH.

Wärmepumpen, die oberflächennahe Geothermie nutzen, wandeln Strom sehr flächeneffizient in Wärme um: mit dieser Technologie werden nur 9 m²/MWh benötigt. Durch die etwas niedrigere JAZ von Luftwärmepumpen benötigen diese rund 12 m²/MWh. Bei den Umweltauswirkungen von Wärmepumpen kann die Erschließung der Wärmequelle potenziell nachteilige Auswirkungen haben. Diese sind jedoch größtenteils vermeidbar bzw. kompensierbar. Wärmepumpen werden insgesamt als eher naturschutzkompatibel bewertet.

Freiflächensolarthermieanlagen haben einen sehr geringen Flächenbedarf (5 m²/MWh). Wenn möglich sollten bereits versiegelte Flächen genutzt oder Solarthermieanlagen auf Gebäuden installiert werden.

Für die Bereitstellung von Wärme durch biogene Brennstoffe variiert der Flächenbedarf in Abhängigkeit der eingesetzten Sortimente. Bei Rest- und Abfallstoffen sowie bei Waldrestholz wird faktisch keine zusätzliche Fläche beansprucht. Anbaubiomasse (Energiepflanzen) ist hingegen weitaus weniger flächeneffizient. Mit den aktuellen Substratmischen (Anteile NaWaRo und Reststoffe) liegen die Flächeneffizienzen bei rund 240 m²/MWh (Biomethan) bzw. 174 m²/MWh (Biogas).

Folgende Kernaussagen lassen sich aus der Analyse von Wärmetechnologien hinsichtlich der Belange von Natur- und Landschaft ableiten:

1. Bei strombasierter Wärmeerzeugung sollten möglichst effiziente Technologien zum Einsatz kommen, die Strom mit einem hohen Wirkungsgrad in Wärme umwandeln. Wärmepumpen sind daher generell gegenüber PtH- und PtG-Technologien zu bevorzugen.
2. Großwärmepumpen können allgemein als eine mit dem Naturschutz gut vereinbare Technologie bezeichnet werden. Nachteilige Auswirkungen auf die Natur durch Wärmepumpen mit natürlichen Wärmequellen (Luft, Erdwärme, Oberflächengewässer) sollten durch naturschutzgerechte Ausgestaltung (bauliche und betriebliche Maßnahmen) vermieden werden.
3. In Bezug auf Biomasse sollten primär Rest- und Abfallstoffe verwendet werden. Wenn möglich, sollten biogene Materialien zunächst stofflich genutzt und recycelt werden, bevor sie energetisch genutzt werden. Die energetische Nutzung von Abbaubiomasse ist zu minimieren.
4. Biogas/Biomethan: Die Nutzung von Anbaubiomasse zur anschließenden Vergärung (z. B. Mais) hat einige nachteilige Auswirkungen auf Natur sowie Landschaft und ist wenig flächeneffizient. Der Substratanbau wirkt sich nachteilig auf Tiere, Pflanzen und biologische Vielfalt sowie auf den Boden und auf die Wasserqualität aus. Mehrjährige Blümmischungen oder die durchwachsende Silphie können positive Effekte für Boden, Biodiversität und Wasserhaushalt haben, wenn sie eine intensivere Bewirtschaftung ablösen.
5. Nutzung von Gülle zur Biogas- und Methanherzeugung sollte unbedingt Priorität haben. Der Klimaschutznutzen ist sehr groß und es sind keine negativen Auswirkungen auf Boden, Wasser oder Biodiversität zu erwarten.
6. Feste Biomasse: KUPs haben eine eher schlechte Flächeneffizienz im Vergleich aller Wärmetechnologien. Aus Sicht des Naturschutzes fällt die Bewertung je nach Standort und Anlage unterschiedlich aus. Führt die KUP zu einer Extensivierung und werden vielfältige Hecken als Umrandung gepflanzt können sie sich, je nach Standort, durchaus positiv auswirken. Bei einer intensiven Bewirtschaftung/Anbau auf Grünland sind eher negative Auswirkungen zu erwarten.
7. Feste Biomasse: Waldrestholz sollte ausschließlich aus nachhaltiger Forstwirtschaft stammen. Nur dann sind Minimumstandards garantiert, die eine Übernutzung der Wälder ausschließen und damit die negativen Auswirkungen minimieren. Eine Intensivierung der

Waldbewirtschaftung sollte vermieden werden. Fällungen speziell für die energetische Nutzung sind zu vermeiden; sondern es ist das ohnehin anfallende Restholz, welches bei der stofflichen Verwertung entsteht (Baumkronen, Äste) oder Schadholz etc. zu verwenden, auch wenn dies eine Herausforderung für die aktuell große Nutzung in Einzelfeuerungsstätten darstellt.

8. Solarthermieranlagen: Die Integration in das Landschaftsbild ist möglich. Werden Naturschutzaspekte bei der Standortwahl und der Anlagenausgestaltung berücksichtigt, kann daraus mitunter eine positive Wirkung für den Naturschutz resultieren.
9. Gebäudeeffizienz: Maßnahmen am Gebäudebestand oder bei Neubauten müssen in ihrer Wirkung auf den Naturschutz differenziert werden. Der Austausch von Heizkesseln und Heizungssystemen hat kaum naturschutzrelevante Auswirkungen. Die Vorketten der Materialien die für die Hausdämmung eingesetzt werden, sind jedoch relevant. Bei Dämmung von Fassaden und dem Abdichten von Dachstühlen können Lebensräume verloren gehen. Dach-/Fassadenbegrünungen: wirken sich unmittelbar positiv auf den Naturschutz aus, schaffen Lebensräume im urbanen Raum und sorgen für Klimaanpassung. Sie sind jedoch schwierig zu realisieren und bedürfen je nach konkreter Art differenzierter Ausgestaltung.
10. Wärmenetze haben geringe Wirkung auf Natur/Fläche. Der Wärmeleitungsbau kann nachteilige Auswirkungen auf das Stadtgrün haben, da Bodenstrukturen, Bäume und Wurzelsysteme beschädigt werden können. Lebensräume von Tieren und Pflanzen können während der Bauphase beeinträchtigt werden. Teilweise dürfen über Wärmetrassen inkl. Schutzstreifen keine tiefwurzelsenden Sträucher und Bäume gepflanzt werden.
11. Wärmespeicher können das Landschaftsbild beeinflussen und haben je nach Speichertyp eine geringere Flächeneffizienz und relevante Auswirkungen auf Natur und Landschaft (Erdbeckenspeicher) bzw. eine gute Flächeneffizienz und weniger Auswirkungen auf Natur und Landschaft (Aquifere). Naturschutzfachlich wertvolle Flächen sollten bei der Standortwahl kritisch betrachtet, und, falls die Vereinbarkeit des Konzeptes mit dem Naturschutz ausgeschlossen ist, nicht genutzt werden.

1.6. Stellschrauben und Empfehlungen für eine naturschutzkompatible Wärmewende

Insgesamt ergibt sich aus dieser Studie, dass die mit dem Ziel eines möglichst effizienten Energiesystems erstellten Szenarien in Bezug auf die Wärmeversorgung strukturell kompatibel mit dem Ziel einer möglichst naturverträglichen Wärmewende sind. Eine auf energiewirtschaftliche Effizienz orientierte Wärmewende ist demnach tendenziell auch für den Naturschutz positiv, weil damit prioritär Technologien gefördert werden, die zugleich niedrige Kosten und geringe Eingriffe in den Naturhaushalt mit sich bringen. Für den Naturschutz ist dies ein positiver Befund, weil er sich bei der Wärmewende nicht gegen wirkungsmächtige andere Interessen durchsetzen muss, sondern der Naturschutz strukturell im Fahrwasser des energie-wirtschaftlichen Mainstreams mitfahren kann. Gleichwohl verbleiben einzelne Handlungsfelder, die aus Sicht des Naturschutzes besonders adressiert werden sollten. Auf Basis der in dieser Studie herausgearbeiteten Ergebnisse lassen sich die folgenden Stellschrauben und Empfehlungen für eine naturschutzorientierte Wärme- und Kältepolitik erarbeiten:

Minderung des Wärme-/Kältebedarfs (Endenergie)

Nicht nur für ein effizientes Energiesystem ist eine Senkung des Energiebedarfs erforderlich, sondern auch für eine möglichst naturverträgliche Wärmewende. Je geringer der Endenergiebedarf für Wärme und Kälte ist, desto weniger erneuerbare Energien müssen erzeugt werden und desto weniger Eingriffe in Natur und Landschaft werden dadurch induziert. Verstärkte

Wärme- und Kälteschutzmaßnahmen an Gebäuden sowie verbesserte Effizienzmaßnahmen bei industriellen und gewerblichen Verbrauchern sind somit eine wichtige Priorität.

Daneben werden Maßnahmen für eine Minderung der sommerlichen Hitze in Städten aufgrund der steigenden Temperaturen dabei zunehmend wichtig und können auch für den Naturschutz eine positive Wirkung entfalten. Mit einer zielgerichteten Planung zum Erhalt und Ausbau der „blau-grünen Infrastruktur“ von Städten (Frischluftschneisen, Grünflächen, Flächen zur Rückhaltung und Versickerung von Regenwasser etc.) kann der zu erwartende Anstieg der sommerlichen Temperaturen und des Kältebedarfs in Städten begrenzt werden.

Empfehlungen: Auch aus Naturschutzsicht sollten die Rahmenbedingungen für Energieeffizienz an Gebäuden und für eine effiziente Erzeugung von Prozesswärme und -kälte insgesamt deutlich verbessert werden. Insbesondere würde eine schnellere Anhebung des CO₂-Preises im Brennstoffemissionshandel die Wirtschaftlichkeit für Maßnahmen zum effizienteren Energieeinsatz für die Wärme- und Kälteerzeugung verbessern. Die Anforderungen des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) sollten für Neubau und Gebäudebestand deutlich angehoben werden. In der Landes- und Regionalplanung sowie in der kommunalen Bauleitplanung sind verstärkt die infrastrukturellen Voraussetzungen zur Senkung der sommerlichen Hitze in Städten umzusetzen, die zugleich zu einer Verbesserung der Lebensbedingungen von Tieren und Pflanzen führen („blau-grüne Infrastruktur“).

Naturverträgliche Effizienzmaßnahmen an Gebäuden

Bei Effizienzmaßnahmen an Gebäuden gilt es aus Naturschutzsicht, auf deren möglichst naturschutzfreundliche Ausgestaltung zu achten. Für neue Gebäude sollten möglichst viele begrünte Fassaden und Gründächer geplant und umgesetzt werden, da hiermit sowohl der Wärme- und Kälteschutz der Gebäude verbessert werden und zugleich Lebensräume für Pflanzen und Tiere entstehen. Bei bestehenden Gebäuden sind die Schwerpunkte aus Sicht des Naturschutzes andere, da insbesondere Gründächer nachträglich aus statischen Gründen häufig nicht umgesetzt werden können; Fassadenbegrünung ist jedoch auch im Altbau häufig möglich. Zusätzlich ist der Schutz von bestehenden Lebensräumen insbesondere kulturfolgender Arten wichtig, zudem können Maßnahmen zur Verbesserung der Lebensbedingungen dieser Arten im Zuge der energetischen Gebäudesanierung unterstützt werden. Vor einer Sanierung sollte geprüft werden, ob Lebensräume geschützter Arten betroffen sein könnten. Ist dies der Fall, greift BNatSchG (Abs.1 und 5) und es müssen entsprechende Maßnahmen (z. B. Beachtung bestimmter Brutzeiten, Ersatznisthilfen) eingeleitet werden.

Sowohl im Neubau wie auch für die Sanierung bestehender Gebäude kann die Nutzung von biologischen Baustoffen aus Naturschutzmaßnahmen ein wichtiger Aspekt sein, um mittelbare Synergien für den Naturschutz zu erzielen, da somit neue Finanzierungswege für Naturschutzmaßnahmen entwickelt werden. Zu denken ist beispielsweise an Dämmstoffe aus Paludikulturen, um die Umsetzung von Moor-Wiedervernässungsprojekten zu befördern.

Empfehlungen: Der Bund verfügt über keine relevanten Gesetzgebungskompetenzen. Von Seiten des Bundes könnte jedoch eine verstärkte Förderung von Gründächern sowie an Förderprogramme zur Nutzung von Rohstoffen aus Paludikulturen angedacht werden. Zudem könnte die Neuschaffung von Nisthilfen auch als Fördervoraussetzung im BEG aufgenommen werden. Die Gesetzgebungskompetenz für das Bauordnungsrecht liegt bei den Ländern. Denkbar wären gesetzliche Regelungen in den Landesbauordnungen, mit denen für neue Gebäude ab einer bestimmten Größe die (ggf. anteilige) Realisierung von Gründächern und/oder Grünfassaden gefordert wird. Alternativ oder zusätzlich sinnvoll wären entsprechende Förderprogramme.

Die Kommunen können im Rahmen ihrer Kompetenzen für die Bauleitplanung für Gebäude Anforderungen an die Ausstattung von Dächern und Fassaden festsetzen (§ 9 Abs. 1 Nr. 25 BauGB). Energetische Sanierungen sind jedoch nicht genehmigungspflichtig bezüglich des Artenschutzrechtes. Vorhandene Lebensräume, die verloren gehen, werden behördlich aus naturschutzfachlicher Sicht daher nicht standardmäßig erfasst. Bei Sanierungsmaßnahmen kann der Vollzug des Artenschutzes durch Kooperation von Bau- und Naturschutzbehörden optimiert werden. Bei umfassenden Gebäudesanierungen sollten ordnungsrechtliche Festsetzungen für Nisthilfen etc. die Regel sein, um die Lücke im Vollzugsrecht zu schließen. Wichtig ist insgesamt der Aufbau von Ressourcen und Know-How in den zuständigen Abteilungen sowie der Austausch zwischen den zuständigen unteren Bau- und Naturschutzbehörden.

Naturschutzkompatible und effiziente Wärme- und Kälteerzeugungstechnologien

Auch bei einer deutlichen Verringerung des Endenergiebedarfs durch verstärkte Effizienzmaßnahmen wird es bei einem signifikanten Wärme- und Kältebedarf verbleiben, der zukünftig ausschließlich aus erneuerbaren Energien zu decken ist. Die hierfür zur Verfügung stehenden Technologien unterscheiden sich in ihren (potenziellen) Auswirkungen auf den Naturschutz erheblich. Diese Naturschutz-Perspektive gilt es in die Debatte um die Ausgestaltung der Wärmewende einzubringen, um deren Auswirkungen auf Natur und Landschaft zu minimieren.

Zu unterscheiden ist zwischen Technologien, die Wärme mit Hilfe von Strom erzeugen, die Biomasse nutzen und Technologien, die Wärme brennstoff- und weitestgehend stromfrei direkt auf dem erforderlichen Temperaturniveau erzeugen. Zu letzteren gehören Abwärmenutzung, Geothermie und Solarthermie.

Abwärme ist Energie, die unvermeidbar in anderen Prozessen anfällt (z. B. Metallproduktion, Chemieindustrie, Rechenzentren, Kühlprozesse). Anlagen zur Nutzung von Abwärme werden in aller Regel auf bereits industriell oder gewerblich genutzten Gebäuden errichtet. Abwärme führt daher i. d. R. zu keinen Naturschutzkonflikten. Für die Nutzung von Abwärme sind i.d.R. Wärmenetze erforderlich.

Empfehlung: Aus Naturschutzsicht ist die konsequente Nutzung von Abwärme empfehlenswert. Wichtige Instrumente zur verbesserten Abwärmenutzung sind der Ausbau von Wärmenetzen, die kommunale Wärmeplanung und verbesserte Förderinstrumente, welche die spezifischen Projektrisiken adressieren.

Geothermie: Zu unterscheiden sind oberflächennahe und Tiefengeothermie. Je tiefer die Geothermie-Bohrungen sind, desto höhere Temperaturen können dem Boden entzogen werden. Die niedrigen Temperaturen von oberflächennaher Geothermie können direkt für die Kühlung bzw. mittels Temperaturerhöhung durch Wärmepumpen auch für die Beheizung von Gebäuden oder für niederkalorische Prozesse verwendet werden. Da die Temperaturen im Boden über das Jahr weitgehend konstant bleibt, erreichen diese Wärmepumpen eine höhere Effizienz als Wärmepumpen, die mit der Außenluft als Wärmequelle arbeiten, so dass sie weniger Strom benötigen. Für die direkte Beheizung von Gebäuden oder Prozessen muss Wärme aus tiefen Bodenschichten entzogen werden. Die unmittelbaren Auswirkungen von geothermischen Anlagen auf Naturschutzbelange sind räumlich sehr begrenzt und beschränken sich in der Betriebsphase im Wesentlichen auf die üblichen Wirkungen von Gebäuden auf ihre Umgebung.

Empfehlungen: Tiefe Geothermie bietet besonders geringes Konfliktpotenzial mit dem Naturschutz und sollte daher konsequent ausgebaut werden. Wichtig hierfür ist der Ausbau von Wärmenetzen, eine kommunale Wärmeplanung sowie eine wesentlich verbesserte Risiko-Ab-sicherung und -Förderung, damit die vorhandenen Potenziale erkundet und wirtschaftlich realisiert werden können. Oberflächennahe Geothermie ist aufgrund der höheren Effizienz

gegenüber Luft-Wärmepumpen aus Naturschutzsicht vorzuziehen. Unklar ist allerdings, inwiefern oberflächennahe Geothermie zu einer Abkühlung des Bodens und damit zu Beeinträchtigungen der Flora und Fauna führen kann. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf. Die Nutzung des Bodens zur sommerlichen Kühlung von Gebäuden ist ebenfalls zur Verringerung des Strombedarfs und der damit einhergehenden Naturschutzkonflikte sinnvoll.

Solarthermie: Anders als bei Abwärme und Geothermie ist der Flächenbedarf von Solarthermie wegen der benötigten Fläche für die Solarkollektoren nicht per se vernachlässigbar. Die Naturschutzauswirkungen sind daher abhängig von der Flächennutzung: Auf Dächern ist die Flächenkonkurrenz gering, zumal eine Kombination mit Gründächern möglich ist. Die übliche Anwendung von Aufdach-Solarthermie ermöglicht allerdings in der Regel nur erneuerbare Anteile von ca. 10 bis 30 % des Wärmebedarfs, weshalb dezentrale Solarthermieanlagen üblicherweise als Ergänzung zu Erdgas- oder Heizöl-Heizungen errichtet werden. Freiflächenanlagen haben deutlich niedrigere Wärmegestehungskosten und eignen sich daher gut zur Erzeugung von Fernwärme. Die Auswirkungen für Natur und Landschaft hängen dabei – ähnlich wie bei Freiflächen-PV-Anlagen – von der vorherigen Flächennutzung und den begleitenden Minderungs- und Ausgleichsmaßnahmen ab.

Empfehlungen: Solarthermie sollte aus Klimaschutzsicht in absehbarer Zeit nur noch im Rahmen von Strategien zur Herstellung einer vollständigen Klimaneutralität von Wärmesystemen gefördert werden. Dies ist bei zentralen Wärmenetzen einfacher als im dezentralen Bereich. Bei der Flächenauswahl und der Umsetzung von Freiflächen-Solarthermie-Anlagen sollte durch Auflagen in der Bundesförderung effiziente Wärmenetze (BEW) sichergestellt werden, dass die Biodiversität der Flächen nach Möglichkeit verbessert wird.

Effiziente Stromnutzung: Minderung des Primärenergiebedarfs

Der Wärmesektor wird ausweislich der analysierten Energiesystemszenarien in Zukunft zum größten Teil auf Strom basieren. Die Naturschutzauswirkungen von strombasierten Technologien richten sich im Wesentlichen danach, wieviel Strom sie benötigen und wie naturverträglich der Strom erzeugt wurde. Bei den Umwelt- und Naturschutzauswirkungen einer strombasierten Wärme- und Kälteversorgung ist zwischen den unmittelbaren und mittelbaren Auswirkungen zu differenzieren. Unmittelbare Auswirkungen entstehen bei der Umwandlung von Strom in Wärme, mittelbare Auswirkungen sind jene, die bei der Stromproduktion und -verteilung entstehen (insbesondere Windkraft und PV-Anlagen sowie Stromleitungen). Die Effizienz der Stromnutzung bzw. die durch die Gebäudeversorgung beanspruchte Menge Primärenergie in Form von Strom spielt daher eine überragende Rolle bei der Bewertung der Natur- und Umweltauswirkungen der unterschiedlichen strombasierten Techniken zur Wärme- und Kälteerzeugung.

Direkte Stromnutzung (Power-to-Heat, PtH): Technologisch am einfachsten und mit den niedrigsten Investitionskosten verbunden ist die direkte Umwandlung von Strom in Wärme. Unmittelbare Umweltauswirkungen entstehen dabei kaum. Der Strombedarf der Anlagen ist hoch, da aus einer erzeugten kWh Strom etwas weniger als eine kWh nutzbare Wärme erzeugt wird. Einen Beitrag zur Flexibilisierung des Energiesystems kann PtH in Verbindung mit Wärmespeichern und in Wärmenetzsystemen liefern. Aufgrund ihrer niedrigen Investitionskosten können hohe Leistungskapazitäten von PtH-Anlagen an Wärmespeichern errichtet werden, mit denen ansonsten abzuregelnder „überschüssiger“ EE-Strom genutzt werden kann. In Gebäuden mit sehr niedrigem Wärmebedarf kann PtH eine vertretbare Lösung sein.

Empfehlungen: Das GEG sollte vom Bund so überarbeitet werden, dass Stromdirektheizungen nur noch zur Warmwassererzeugung und ggf. in multivalenten Heizungssystemen, z. B. in Kombination mit Wärmepumpen zum Einsatz kommen, um an besonders kalten Tagen etwaige Lastspitzen abzufangen. Als monovalente Heizung sollte PtH nur in besonders gut

gedämmten Gebäuden zum Einsatz kommen dürfen. Im Gebäudebestand sollten Nachtspeicherheizungen als monovalente Heizungen regulatorisch zum Austausch gebracht werden.

Wärmepumpen: nutzen Strom, um das Temperaturniveau von Umwelt- oder Abwärme zu erhöhen. Bei der Umwandlung von Strom zu Wärme können z. B. bei der Nutzung von Gewässern abhängig von der lokalen Situation unmittelbare Naturschutzauswirkungen entstehen: Wird z. B. einem See oder Fluss Wasser entnommen, um daraus Wärme zu entziehen, können auf der Passage des Wassers durch den Wärmetauscher eingesaugte Organismen geschädigt werden. Es kommt daher stark auf das genutzte Medium und die lokale Situation an, ob der Betrieb von Wärmepumpen Konflikte mit dem Naturschutz hervorrufen kann.

Die mittelbaren Umweltauswirkungen von Wärmepumpen durch den Strombezug hängen von der jeweiligen Effizienz der Wärmepumpe ab. Diese hängt vor allem von dem Temperaturhub ab, der von der Wärmepumpe zu überwinden ist: Je höher die Temperatur der Wärmequelle ist und je geringer die erforderliche Zieltemperatur, desto geringer ist der erforderliche Temperaturhub und desto weniger Strom wird benötigt. Effiziente Gebäude mit niedrigen Vorlauftemperaturen haben somit eine dämpfende Hebelwirkung auf die erforderliche Primärenergie. Da die Wärmepumpen dann besonders effizient betrieben werden können, verringert sich der erforderliche Strombedarf zur Erzeugung der benötigten Endenergie.

Im Vergleich mit PtH sind die für Wärmepumpen erforderlichen Strommengen deutlich geringer. Abhängig von der Gebäudeeffizienz und der Temperatur der genutzten Umweltmedien ist ca. ein Viertel bis die Hälfte des Stroms für dieselbe Wärmemenge erforderlich.

Empfehlungen: Aufgrund ihres geringeren Strombedarfs sind Wärmepumpen zum zentralen Standbein der Wärmewende sowohl bei der dezentralen Gebäudeversorgung wie auch in der Fernwärme auszubauen. Die ökonomischen Rahmenbedingungen für Wärmepumpen müssen durch Umlagereform kompensiert werden, zu der insbesondere eine Reduktion des Strompreises (Wegfall der EEG-Umlage) gehört. Die höheren Investitionskosten für Wärmepumpen sind durch attraktive Förderungen zu kompensieren. Wärmepumpen mit hoher Jahresarbeitszahl (aufgrund technologischer Neuentwicklung oder durch Nutzung von oberflächennaher Geothermie) sollten besonders gefördert werden. Konflikte von Oberflächenwasser-Wärmepumpen mit dem Naturschutz sollten proaktiv bearbeitet werden. Insbesondere sollten die bislang fehlenden naturschutzfachlichen Grundlagen erarbeitet werden, um die Auswirkungen der Anlagen auf Gewässer abschätzen zu können.

In den Energiesystemszenarien spielt grüner Wasserstoff für die Gebäudewärmeerzeugung aufgrund der auf absehbare Zeit geringen Verfügbarkeit und der hohen Kosten eine geringe Rolle. Die erforderlichen Mengen an grünem Wasserstoff werden voraussichtlich zu einem großen Teil von außerhalb der EU importiert, sodass Naturschutzkonflikte durch Wind- und PV-Anlagen, Elektrolyse und Transport-Infrastruktur in anderen Erdteilen auftreten.

Die erforderliche Menge Strom zur Erzeugung einer Einheit Wärme ist aufgrund der Umwandlungsverluste bei der Elektrolyse im Vergleich zur direkten Stromnutzung deutlich höher, im Vergleich zu Wärmepumpen beträgt der Strombedarf ein Vielfaches.

Empfehlungen: Die Verwendung von grünem Wasserstoff im Wärmesektor sollte aus Sicht des Naturschutzes so stark wie möglich minimiert werden. Für dezentrale Gebäude kommt grüner Wasserstoff nicht als Lösung für einen weitgehenden Ersatz von dezentralen Erdgas- und Heizöl-Heizungen in Frage. Regelungsbedarf besteht hierbei aktuell nicht. In der Fernwärme wird grüner Wasserstoff voraussichtlich eine relevante Rolle für den Betrieb von KWK-Anlagen einnehmen. Das KWKG sollte so ausgerichtet werden, dass die flexible Erzeugung elektrischen Stroms maximiert wird und dadurch die erforderlichen Wasserstoffmengen verringert werden. Für die Produktion und den Import von grünem Wasserstoff sollten aus Sicht

des Naturschutzes Nachhaltigkeitsanforderungen aufgestellt werden, da die Produktion von grünem Wasserstoff mit erheblichen Umweltkonflikten einhergehen kann.

Naturverträgliche Nutzung von Biomasse

Ähnlich wie beim grünen Wasserstoff sollte die Nutzung von Biomasse aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von nachhaltig erzeugter Biomasse im Wärmemarkt nur eine untergeordnete Rolle spielen. Die Anwendung sollte auf solche Bereiche begrenzt werden, die anderweitig schwer klimaneutral zu versorgen sind. Soweit Biomasse im Wärmemarkt eingesetzt werden soll, ist eine nachhaltige, naturverträgliche Herkunft sicherzustellen. Es sollten möglichst nur Rest- und Abfallstoffe genutzt werden, die Nutzung von Anbaubiomasse oder Waldholz ist aus Naturschutzsicht kritisch zu bewerten.

Empfehlungen: Die Nutzung von Biomasse im Wärmemarkt sollte auf bestehende Gebäude beschränkt werden. Der Bund sollte die (indirekte) Förderung von Biomasse-Anlagen im Neubau über die Bundesförderung effiziente Gebäude (BEG) abschaffen. Auf kommunaler Ebene können entsprechende Verbrennungsbeschränkungen als Festsetzungen in Bebauungsplänen getroffen werden (§ 9 Abs. 1 Nr. 23 a BauGB). Biomasse sollte möglichst nicht als Haupt-Wärmequelle für Gebäude dienen, sondern nur bivalent zur Abdeckung von Spitzenlasten in Form von Rest- und Abfallstoffen. Förderprogramme (BEG und BEW) sollten entsprechend überarbeitet werden. Um eine naturverträgliche Herkunft der im Wärmemarkt eingesetzten Biomasse zu gewährleisten, sollte der Bund gesetzliche Nachhaltigkeitsanforderungen für Biomasse im Wärmesektor aufstellen, z. B. im GEG.

Ausbau von Wärmenetzen und -speichern

Für ein effizientes Energiesystem ist nach den analysierten Energieszenarien ein erheblicher Ausbau von Wärmenetzen erforderlich, die zukünftig insbesondere in den Städten verdichtet und ausgebaut werden sollen. Auch wenn ein Wärmenetz mit unterschiedlichsten Erzeugungstechniken versorgt werden kann, die ihrerseits jeweils sehr unterschiedliche Auswirkungen auf den Naturschutz haben können, bietet der Ausbau von Wärmenetzen strukturelle Vorteile für den Naturschutz, insbesondere aufgrund der einsetzbaren Technologien. In verdichteten Städten sind die lokal verfügbaren erneuerbaren Wärmequellen besonders knapp und aufgrund der vorhandenen Baustruktur in der Umsetzung besonders komplex und damit auch teuer. Insbesondere bietet die Nachrüstung von Mehrfamilienhäusern mit Wärmepumpen in verdichteten Gebieten erhebliche Herausforderungen: Um Grundwasser- oder Erdsonden-Wärmepumpen zu nutzen, fehlt es häufig an den erforderlichen Flächen, zudem sind in verdichteten Gebieten dabei Nutzungskonkurrenzen zu erwarten. Auch Luftwärmepumpen weisen ggf. aufgrund von Schallemissionen ein gewisses Konfliktpotenzial in innerstädtischen Bereichen auf und bedürfen ggf. erheblicher baulicher Maßnahmen, sofern diese z. B. auf dem Dach installiert werden sollen.

Die von Teilen der Gaswirtschaft ins Spiel gebrachte Lösung liegt darin, in Städten auch zukünftig viele dezentrale Gas-Verbrennungsheizungen zu betreiben, wobei Erdgas durch Biomethan und grünen Wasserstoff ersetzt werden soll. Grüner Wasserstoff wird nach aktuellen Energieszenarien frühestens ab 2030 in relevanten Mengen zur Verfügung stehen und dann voraussichtlich teuer sein. Aus Naturschutzsicht besteht die Gefahr, dass keine ausreichenden Mengen Wasserstoff zu vertretbaren Preisen dem Wärmemarkt zur Verfügung stehen, sodass verstärkt auf Biomethan zurückzugreifen wäre.

Wärmenetze bieten demgegenüber die Möglichkeit zur Nutzung unterschiedlichster Energiequellen und zur Flexibilisierung und Stabilisierung des gesamten Energiesystems. Insbesondere sind sie Voraussetzung für die Nutzung der besonders naturschutzkompatiblen Technologien der Abwärmennutzung und der Tiefengeothermie. Sie ermöglichen zudem die Nutzung

von EE-Strom, der ansonsten abgeregelt würde, durch kostengünstige PtH-Anwendungen in Verbindung mit großen Wärmespeichern und reduzieren somit den Bedarf an Windkraft- und PV-Anlagen. Wärmenetze reduzieren den Strombedarf auch dadurch, dass Großwärmepumpen von großen, zentralen Wärmequellen Wärme entziehen können, die an kalten Tagen ein höheres Temperaturniveau als die Außenluft aufweisen (z. B. Klärwerke oder Oberflächengewässer) und damit eine höhere Effizienz als dezentrale Wärmepumpen aufweisen.

Empfehlungen: Die (andernorts bereits ausführlich untersuchten) politischen Rahmenbedingungen für die Verdichtung und den Ausbau von Wärmenetzen sind vom Bund, den Ländern und den Kommunen konsequent zu verbessern.

2. Summary

2.1. Background information on the topic

Addressing the climate crisis is one of the most urgent challenges today, but the biodiversity crisis is a relevant problem as well. More species are threatened with extinction today than at any time in human history before. A first-ever joint analysis by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) and the Intergovernmental Panel on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES) was presented in June 2021. The results illustrate that both climate change and biodiversity loss are mutually reinforcing (Pörtner et al. 2021). However, policy strategies have been addressing them independently.

The present work tackles precisely this issue: Policy instruments should be designed to create synergies for both climate and nature conservation to achieve the maximum, often only at a manageable additional cost. Another advantage is that the consideration of nature conservation aspects can also ensure an improved acceptance of renewable energies in the (local) population.

While the conflict between nature conservation and renewable energies has been comprehensively investigated in numerous research projects focusing on electricity generation from wind, ground-mounted PV and biomass, specific preliminary work is not available for renewable heat supply to the same extent. The present work consists in the creation of an orientation framework and a knowledge base for the integration of nature conservation concerns into the development of future heating and cooling supply regulation. Recommendations for the adaptation of existing and new policy instruments are discussed.

2.2. Project content and methodic

The analysis of the current political orientation as well as the laws and instrumentation in the heating sector is shown in chapter 3. The focus is on the analysis of national legislation. Relevant EU level targets and federal state instrumentation will also be discussed (WP 1).

The meta-analysis in chapter 4 examines the future development of the heating and cooling sector in Germany. A total of 22 scenarios from seven publications are selected to be examined and compared regarding the development until 2050. The aim is to clarify commonalities and differences between the scenarios and to establish connections between regulatory framework conditions and the development of the heating sector (WP 2).

In chapter 5, technologies, efficiency measures and infrastructures (TEI) for renewable heat and cold generation are presented and their specific impact on nature, landscape and area is analysed (WP 3).

Based on the synthesis of the political framework conditions, the future development of the heating and cooling market and the effect of the technologies on nature, basic principles for a heat transition compatible with nature conservation are derived (WP 4). The recommendations for the adaptation of the instrumental design (WP 5) result directly from the generally valid basic principles and the comparison with the current design of the regulatory system. The results are presented altogether in chapter 6.

2.3. Political framework: Targets and instrumentation in the heating sector

The following national climate targets apply to the heating sector (as of July 2020):

- Climate-neutral heat supply in 2050 (Klimaschutzgesetz (KSG) 2019) updated LSG as of 31.8.21: climate neutrality until 2045 with intermediate targets 2030: -65 % and 2040: -88 %;
- Intermediate step in 2030: energy sector -62 %, buildings -67 %, industry -50 % (Klimaschutzplan 2050 (2016)); update KSG 2021: energy sector -77 %, buildings -68 %, industry -58 %;
- RES share in final energy consumption heating and cooling in 2030: 27 % (Energieeffizienzstrategie 2050 (2019));
- Share of renewables in the heating sector to be increased by 1.1 % per year from 2021 to 2030 – by 1.3 % if waste heat is considered. (RED II 2018 Art. 23, binding target as of novel RED II 07/2021);
- District heating and cooling: RES share to increase 2,1 % annually (non-binding target, novel RED II 07/2021).

Selection of relevant national-level instruments in the heating sector:

BEHG: national carbon pricing for the heating (and transport) sector (national emissions trading system nETS): Participants (fuel distributors) must purchase allowances to cover their yearly emissions. Fixed prices for emissions increase from €25/t CO₂ (2021) to €55/t CO₂ (2025), after which prices will be set through auctions (2026 price corridor of €55 to €65/t). All fuels that produce CO₂ when burned will be included in the nETS, including gasoline, diesel, heating oil, natural gas, liquefied petroleum gas and coal. Biogenic fuels will be included from 2023 onwards, except those meeting sustainability criteria.

Regulatory law: Building Energy Act (GEG) combines previous laws for the requirements for the energy quality of buildings and heat supply (EnEG, EEWärmeG and EnEV). GEG implements the European requirements without tightening. The creation and use of energy certificates and the use of renewable energies in buildings are regulated by GEG. Also, it implements a ban on the commissioning of monovalent oil heating systems from 2026.

Regulatory law: Wärmelieferverordnung (WärmeLV with § 556c BGB): regulates the conversion of a heating system owned by the landlord to supply heat by third parties (connection to a heating network). This conversion may not cause higher costs for the tenant than in the three preceding years. In many cases, this regulation using a retrospective benchmark blocks the switch to district heating in existing buildings supplied with natural gas.

Subsidy programs for buildings and district heating:

- Federal subsidy for efficient buildings (BEG): provides investment support for the installation of renewable heating systems (including biomass) or connection to a heating network if this has a RE share of > 25% (individual measures). Promotes the construction or renovation of buildings to efficiency house level 40/55, provided that renewable energies are used for heating/cooling (also biomass). In addition, roof and facade insulation are eligible as individual measures.
- MAP/KfW funding: investments in renewable heat technologies.
- Federal support for efficient heating networks (BEW, planned for 2021) replacing Wärmenetzsysteme 4.0: Support for feasibility as well as transformation studies for DH grids; investment support for new or existing DH grids; operational support for solar thermal energy and heat pumps.
- KWKG: Support for CHP plants as well as heat grids and storage facilities

- KWKG/iKWK: Support for innovative CHP systems consisting of three elements CHP plant, PtH module and renewable heat generator. Minimum RE share of 35 % of the reference heat (CHP plant). The subsidy is determined in tenders. A fixed RE bonus is paid only from 10 MW (subsidy rate increases depending on the RE share of the CHP system).

Biomass is expected to continue to play a role in heat supply according to current policy objectives, however it is recognized that the available domestic potential is limited. Some instruments, such as the national emissions trading scheme, the Building Energy Act (GEG), and national subsidy programs such as the federal subsidy for efficient buildings (BEG) create attractive framework conditions for renewable heating and especially also for biomass-based heat generation. An increase in biomass use in the building heat sector is likely under current regulatory and economic conditions.

2.4. Meta-analysis of the future heating and cooling sector

The scenarios examined represent a wide spectrum: They differ in terms of biomass restrictions, efficiency levels in the building sector, economic boundary conditions and social attitudes.

Klimapfade für Deutschland (Gerbert et al. 2018): Scenarios N80 und G95 focusing on different greenhouse gas reduction pathways.

Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem (Sterchele et al. 2020): Emphasis on social aspects; four different scenarios were evaluated.

Entwicklung der Gebäudewärme und Rückkopplung mit dem Energiesystem in -95 % THG-Klimaszenarien (Gerhardt et al. 2019): Four scenarios examine the sensitivities of the heating and cooling market for the phase-out of decentralised biomass use and for building renovation.

RESCUE – Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität (Purr et al. 2019): The conservation of natural resources is the main objective, and the key indicators for measuring progress are total raw material productivity and aspects of land use. A total set of six scenarios differs in terms of lifestyle changes, economic growth and the timeframe for ambition and action.

Naturverträgliche Energieversorgung aus 100 % erneuerbaren Energien 2050 (Walter et al. 2018) considers nature conservation goals and resource efficiency (e.g. National Strategy on Biological Diversity).

Systemlösungen für Bioenergie im Wärmesektor im Kontext zukünftiger Entwicklungen (Jordan et al. 2019): Two scenarios with different biomass availability in the heating sector.

Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050 (Kemmler et al. 2020) examines the effect of the 2030 climate protection program. The target horizon is the year 2030, so comparing to the other scenarios is only possible to a limited extent.

The modeling of the heat market until 2050 results in wide ranges of heat generation based on different technologies. This result is not surprising because of the strongly varying framework conditions of 22 scenarios. Even though the results differ considerably in quantitative terms, their interpretation allows conclusions to be drawn that are consistent within the scenarios.

The average of all scenarios examined shows that heat pump technology clearly dominates the generation of building heat, with an average of 71 % of building heat in 2050 being provided by heat pumps. For process heat generation, electricity direct use (PtH), synthetic gases (PtG; synthetic methane and hydrogen), and biomass are the most relevant technologies, accounting for 78 % of process heat generation in 2050.

The interpretation of the scenarios including the economic considerations shows that large amounts of electricity or electricity-based fuel imports (PtX imports) are inefficient and lead to high additional system costs. Especially if decentralised gas connections remain (scenario ISE Beh), or in case of increased biomass use in the decentralised building sector, due to which biomass potentials in peak load and process heat generation in industry are missing (IEE Bio), PtX imports must ensure the achievement of emission targets. The most efficient (economically most cost-effective) climate-neutral heat market exists if the timely phase-out of decentralized biomass use is successful. This is proven by the results of the ISE study, BDI, IEE and the DBFZ studies, which examine this sensitivity. The necessary market ramp-up of alternative generation options for renewable heat in the decentralized sector (especially heat pumps) as well as the expansion of the district heating network should already take place in the coming years to avoid lock-in effects and wrong setting of course.

Efficiency measures in the building sector that reduce energy consumption and enable the integration of renewable heat technologies are relevant in all scenarios. Depending on the perspective of each publication, different assumptions regarding building efficiency are made. While the IEE study found a small cost difference between the ambitious and moderate renovation scenarios (RE heat can provide the higher heat demand at low cost) and that early phase-out of decentralised biomass use is much more crucial for cost-effective achievement of climate targets, the RESCUE study takes a different view. According to these scenarios, the refurbishment rate should be increased about at least 2.5 times to achieve the climate targets in a resource-efficient way.

In the long term, biomass should only play a minor role in the decentralised heat supply. From a macroeconomic point of view, biomass should rather be used for process heat generation and district heating. In the years up to about 2040, the use of biomass depends strongly on the selected framework conditions. Biomass in decentralised applications enables the achievement of the sector target for buildings up to 2030 (IEE). Especially in hybrid systems in decentralised applications, biomass is expected to be competitive until about 2040. In the following years until 2050, however, a higher willingness to pay in the industrial sector ensures the increasing shift of biomass to the area of process heat generation (DBFZ, BDI). One result of Klimaneutrales Deutschland (BDI) is that an active steering of biomass from the less efficient fields of application (e.g. electricity and building heat generation) to industry applications is necessary for a cost-optimal reduction of industrial energy emissions. Another possibility is the use of biomass in hybrid systems in the decentralised building sector (DBFZ).

2.5. Impact of technologies on nature, landscape and area

How heat generation technologies, efficiency measures and heat distribution as well as storage technologies and corresponding projects affect nature, landscape and land is analysed in chapter 5. Area consumptions of the single technologies are determined and compared without considering the nature conservation quality of the areas.

Direct conversion of renewable electricity (RES-E) into heat using PtH plants consumes 36 m²/MWh of generated heat. PtG has a land requirement of about 80 to 90 m²/MWh heat. RES-E goes through at least two conversion steps for PtG heat (electrolysis plus methanation if necessary and heat generation in fuel cell or gas CHP/boiler), so PtG is less efficient than PtH.

Heat pumps using near-surface geothermal energy convert electricity into heat efficiently: only 9 m²/MWh heat are required. Due to the somewhat lower COP of air-source heat pumps, they require about 12 m²/MWh. When using heat pumps, the exploitation of the heat source can potentially have environmental impact. However, this impact can be avoided when according

principles are regarded (see chapter 6). Overall, heat pumps are rated as rather compatible with nature conservation aims.

Ground-mounted solar thermal systems have a very low land requirement for generating heat (5 m²/MWh). If possible, already sealed surfaces should be used or solar thermal systems should be installed on buildings.

For the provision of heat by biogenic fuels, the area requirement varies depending on the assortments used. Residual and waste materials as well as residue forest wood do not require any additional area. Cultivated biomass, on the other hand, is far less area efficient. With the current substrate mixes (shares of NaWaRo and residues), the land efficiencies are around 240 m²/MWh (biomethane) and 174 m²/MWh (biogas).

The following key statements can be derived from the analysis of heat technologies with regard to the concerns of nature and landscape:

1. Electricity-based heat generation should use the most efficient technologies possible to convert electricity into heat with a high degree of efficiency overall. Heat pumps are therefore generally to be preferred over PtH and PtG technologies.
2. Large-scale heat pumps can be described as a technology that is compatible with nature conservation. Adverse impacts on nature by heat pumps using natural heat sources (air, geothermal, surface water) should be avoided by designing them in a way that is compatible with nature conservation (constructional and operational measures).
3. Regarding biomass: The use of degradation biomass for energy purposes must be minimized. Residual and waste materials should be used primarily rather than cultivated biomass. If possible, biogenic materials should first be used materially and recycled before being used for energy.
4. Biogas/biomethane: The use of cultivated biomass for subsequent fermentation (e.g. corn) generally has adverse effects on nature, landscape and land utilisation efficiency. Substrate cultivation adversely affects animals, plants, and biodiversity, as well as soil and water quality. Perennial flowering mixtures or growing-through silphia can have positive effects on soil, biodiversity and water balance if they replace more intense cultivation.
5. Using manure and other residues for biogas and biomethane production should be a priority. The climate protection benefits are very high and no negative effects on soil, water or biodiversity are expected.
6. Solid biomass: Short rotation plantations (SRP) have a poor land use efficiency. From a nature conservation perspective, the assessment varies depending on location and plant. If SRP leads to extensification and diverse hedges are planted as a border, they can have a positive impact at some locations. In the case of intensive cultivation/planting on grassland, rather negative effects are to be expected.
7. Solid biomass: Forest residues should come exclusively from sustainable forestry to guarantee minimum standards avoiding overexploitation of forests and minimizing negative impacts. Intensification of forest management should be avoided. The felling of trees specifically for energy use should be avoided too; instead, preference should be given to the residual wood that accumulates during material recycling (treetops, branches) or to damaged wood.
8. Solar thermal plants: Their integration into the landscape is possible. If nature conservation aspects are considered in the choice of location and the design of the system, solar plants can have a positive effect on nature conservation, increasing biodiversity at the site.

9. Building efficiency: Measures in existing or new buildings must be differentiated in terms of their effect on nature conservation. The replacement of boilers and heating systems has hardly any impact on nature conservation. The pre-processing of the materials used for house insulation are relevant. Additionally, habitats can be lost when insulating facades and sealing roof trusses. Green roofs/façades have a direct positive impact on nature conservation, create habitats in urban areas and provide climate adaptation. However, they are difficult to implement and require differentiated design depending on the specific type.
10. District heating grids have low impact on nature/area. Heat pipe construction can have adverse effects on urban greenery as soil structures since trees and root systems can be damaged. Animal and plant habitats may be impacted during construction phase. In some cases, deep-rooted shrubs and trees may not be planted on top of heat lines.
11. Heat storage can have an impact on the landscape. Depending on the type of storage facility, some types have a lower area efficiency and relevant impact on nature and landscape (such as earth reservoirs) or a good area efficiency and less impact on nature and landscape (like aquifers). Areas that are valuable for nature conservation should be considered critically when selecting a site and, if the compatibility of the concept with nature conservation is impossible, should not be used.

2.6. Principles for nature-compatible heat transition

Overall, this study shows that the scenarios optimizing the energy system in terms of macroeconomic criteria are structurally compatible with the goal of a nature-compatible heat transition. Accordingly, a heat transition oriented toward energy efficiency also tends to be positive for nature conservation goals, because it gives priority to technologies that are both low-cost and have little impact on the natural environment (e.g. heat pumps). This is a positive finding for nature conservation because it does not have to assert itself against other powerful interests in the heat transition. Nevertheless, there remain important areas of action that should be addressed from the point of view of nature conservation. Based on the results of this study, the following parameters and recommendations for a nature conservation-oriented heating and cooling policy can be developed:

Reduction of heating and cooling demand (final energy)

The reduction in energy demand is as much necessary for an efficient energy system as it is for a nature-compatible heat transition. The lower the final energy demand for heating and cooling, the less renewable energy must be generated, therefore less impact on nature and landscape is induced. Increased efficiency measures on buildings as well as improved efficiency in industrial processes are thus priorities from the point of the energy system assessment.

In addition, measures to reduce summer thermal stress in cities are becoming increasingly important due to rising temperatures and can also have a positive effect on nature conservation in the urban context. Supporting and expanding the so called "blue-green infrastructure" in cities (fresh air corridors, green spaces, areas for rainwater retention and infiltration, etc.), the expected increase in summer temperatures as well as the cooling demand in cities can be limited.

Recommendations: The overall framework for energy efficiency in buildings and for efficient generation of process heating and cooling should also be significantly improved. An increase in the CO₂ price in fuel emissions trading would improve the economic viability of measures for more efficient energy use for heating and cooling. The requirements of the Building Energy Act (GEG) should be raised significantly for new and existing buildings. In state and regional planning, as well as in communal urban land use planning, the infrastructural prerequisites for

reducing summer heat in cities must be implemented more intensively, also improving the living conditions of animals and plants in cities ("blue-green infrastructure").

Nature-friendly efficiency measures in buildings

It is important to ensure that efficiency measures for buildings are considering nature protection goals. For new buildings, as many green facades and green roofs as possible should be planned and implemented, as this improves both the heat and cold protection of the buildings and at the same time creates habitats for plants and animals. In existing buildings, the focus is different since green roofs often cannot be implemented retrospectively for structural reasons; however, façade greening is often possible even in old buildings. In addition, the protection of existing habitats surrounding the building is important. Measures to improve the living conditions of these species can also be supported during energy-efficient building refurbishment.

In advance of building refurbishment, it should be assessed whether habitats of protected species could be affected. If this is the case, German nature conservation law (BNatSchG Abs. 1, 5) apply and appropriate measures (e.g. observance of certain breeding periods, substitute nesting aids) must be introduced.

Both in new construction and for the refurbishment of existing buildings, the use of biological building materials from nature conservation measures are important to achieve indirect synergies for nature conservation. Also new financing channels for nature conservation measures might be developed. For example, insulation materials from paludiculture should be considered to promote the implementation of peatland rewetting projects.

Recommendations: The federal government has no relevant legislative powers. However, the federal government could consider increased support for green roofs and schemes to promote the use of raw materials from paludiculture. In addition, the creation of new nesting aids could also be included as a funding requirement in the BEG. The legislative competence for building regulations lies with the federal states. It would be conceivable to include legal regulations in the building codes of the federal states that would require the implementation of green roofs and/or green facades for new buildings above a certain size. Alternatively, or in addition, appropriate funding programs would be useful.

Within the scope of their competences for urban land use planning, the municipalities can specify requirements for the equipment of roofs and facades for buildings (§ 9 para. 1 no. 25 BauGB). However, energetic refurbishments are not subject to official permission regarding species protection law. Existing habitats that are lost due to refurbishment of buildings are therefore not recorded by the authorities. In the case of renovation measures, species protection can be optimized through cooperation between building and nature conservation authorities. In the case of comprehensive building renovations, regulatory provisions for nesting aids and other obligations are necessary to close the gap in enforcement law. Overall, it is also important to build up resources and know-how in the responsible departments as well as emphasize the exchange between the responsible lower building and nature conservation authorities.

Nature-compatible and efficient heating and cooling technologies

Even with a significant reduction in final energy demand through increased efficiency measures, there will remain a significant demand for heating and cooling, which in the future will have to be supplied exclusively by renewable energies. The available technologies differ considerably in their (potential) impact on nature conservation. This perspective must be brought into the debate on the design of the heat transition to minimize its impact on nature and the landscape.

A distinction must be made between technologies that generate heat with the help of electricity, which use biomass, and technologies that generate heat directly at the required temperature level without using fuels or electricity. The latter include waste heat recovery, geothermal energy and solar thermal energy.

Waste heat is energy that is unavoidably generated in other processes (e.g. metal production, chemical industry, data centers, cooling processes). Plants for the utilization of waste heat are usually located in areas already used for industrial or commercial purposes. Waste heat therefore typically does not lead to any conflicts with nature conservation. Heating grids are usually required for the use of waste heat.

Recommendation: From a nature conservation point of view, the use of waste heat is recommended. Important instruments for improved waste heat utilization are the expansion of district heating grids, municipal heat planning and improved funding instruments that address the specific project risks of recovering waste heat.

Geothermal energy: A distinction must be made between near-surface and deep geothermal energy. The deeper the geothermal wells, the higher the temperatures that can be extracted from the soil. The low temperatures of near-surface geothermal energy can be used directly for cooling or, by increasing the temperature through heat pumps, for building heat or for low-calorific processes. Since the temperatures in the ground remain largely constant throughout the year, these heat pumps achieve higher efficiencies than ambient air heat pumps, so they require less electricity. For direct heating of buildings or processes, heat must be extracted from deep soil layers. The direct effects of geothermal systems are spatially limited and, in the operational phase, are essentially limited to the effects of small operational buildings on their sites.

Recommendations: Deep geothermal energy shows low potential for conflict with nature conservation and should therefore be consistently expanded. Important for this is the expansion of district heating grids, municipal heat planning as well as a substantially improved risk protection and support for deep geothermal projects, so that the existing potentials can be explored and realized economically. Near-surface geothermal energy is preferable to air-source heat pumps due to its higher efficiency. Using the ground to cool buildings in the summer reduces the electricity demand and the associated conservation conflicts.

Unlike waste heat and geothermal, the land requirements of solar thermal plants are not negligible per se because of the surface area needed for solar collectors. Therefore, the impact on nature conservation depends on the type of land use: On roofs, the area competition is low, especially since a combination with green roofs is possible. However, the usual application of rooftop solar thermal systems usually only allows renewable shares of about 10 % to 30 % of the heat demand, which is why decentralized solar thermal systems are usually installed as a supplement to natural gas or fuel oil heating systems. Ground-mounted systems have significantly lower heat generation costs and are therefore well suited for the generation of district heat. Like ground-mounted PV systems, the impact on nature and landscape depends on the previous land use and the accompanying mitigation and compensation measures.

Recommendations: From a climate protection point of view, solar thermal energy should only be promoted in the foreseeable future as part of strategies to achieve complete climate neutrality of heating systems. This is easier in the case of centralised heating grids than in the decentralised sector. When selecting sites and implementing ground-mounted solar thermal systems, conditions in the federal funding for efficient heating networks (BEW) should ensure that the biodiversity of the sites is improved wherever possible.

Efficient use of electricity: Reduction of primary energy demand

According to the energy system scenarios, the future heating sector will be based largely on electricity. The environmental impact of electricity-based technologies depends mainly on how much electricity they require and how environmentally friendly the electricity is generated. The impacts of electricity-based heating and cooling on nature must be differentiated between direct and indirect impacts. Direct impacts arise from the conversion of electricity into heat, while indirect impacts are those that arise from electricity production and distribution (especially wind power and PV plants as well as power lines). The efficiency of electricity use, or the amount of primary energy in the form of electricity consumed by building supply, therefore plays a major role in assessing the natural and environmental impacts of different electricity-based technologies for heating and cooling.

Direct use of electricity (power-to-heat, PtH): Direct conversion of electricity into heat has low investment costs. There is hardly any immediate environmental impact of the PtH plant itself. The electricity demand of the plants is higher than in heat pumps, since slightly less than one kWh of usable heat is generated from one kWh of electricity produced. PtH can contribute to the flexibilization of the energy system in connection with heat storage and in district heating systems. Due to their low investment costs, high power capacities of PtH plants can be installed at heat storage facilities, with which otherwise "surplus" RES-E can be used. In buildings with very low heat demand, PtH can be a viable solution.

Recommendations: The GEG should be revised by the federal government in such a way that direct current heating systems are only used for hot water production and, if necessary, in multivalent heating systems, e.g. in combination with heat pumps, to supply peak loads on particularly cold days. As monovalent heating systems, PtH should only be used in particularly well insulated buildings. In existing buildings, monovalent night storage heaters should be replaced.

Heat pumps use electricity to raise the temperature level of environmental or waste heat. When surface water is used as a heat source, it can have a direct impact on aquatic ecosystems, for example by cooling the water body, by influencing habitats or by harming microorganisms. Therefore, it strongly depends on the medium used and the local situation whether the operation of heat pumps can cause conflicts with nature conservation.

The indirect environmental impact of heat pumps through electricity consumption depends on the respective efficiency of the heat pump. This depends mainly on the temperature difference that must be overcome by the heat pump: the higher the temperature of the heat source and the lower the required target temperature, the more efficient the heat pump operates, requiring less electricity. Efficient buildings with low supply temperatures thus have a reducing effect on the required primary energy.

Compared with PtH, the amounts of electricity required for heat pumps are significantly lower. Depending on building efficiency and the temperature of the environmental heat source used, about one-quarter to one-half of the electricity is required for generating the same amount of heat.

Recommendations: Due to their lower electricity demand, heat pumps should become the central pillar of the heat transition, both in decentralised building supply and in district heating. The economic conditions for heat pumps must be compensated by reforms, which includes a reduction in the electricity price (e.g. by eliminating the EEG surcharge). The higher investment costs for heat pumps must be compensated by attractive subsidies. Heat pumps with a high annual performance factor (due to new technological developments or the use of near-surface geothermal energy) should receive special support. Conflicts of surface water heat pumps with

nature conservation should be dealt with proactively. To be able to estimate the effects of the systems on water bodies, additional research is necessary.

In the energy system scenarios, green hydrogen for building heat generation plays a minor role due to low availability and high costs. The required amounts of green hydrogen are expected to be imported from outside the EU to a large extent, resulting in conservation conflicts from in other parts of the world.

The amount of electricity required to generate one unit of heat is significantly higher compared to direct electricity use (PtH) due to conversion losses in electrolysis; compared to heat pumps, the electricity requirement is many times higher.

Recommendations: The use of green hydrogen in the heating sector should be from a nature conservation perspective. For supplying heat to buildings, green hydrogen cannot be considered as a solution for an extensive replacement of natural gas and fuel oil heating systems. There is currently no need for regulation in this area noted. In district heating grids, green hydrogen is expected to play a relevant role in the operation of CHP plants. The KWKG should be aligned in such a way that the flexible generation of electric power is maximized, thereby reducing the required quantities of hydrogen. Sustainability requirements should be established for the production and import of green hydrogen from a nature conservation perspective, as the production of green hydrogen can be associated with significant environmental conflicts.

Nature-compatible use of biomass for heating

Like green hydrogen, the use of biomass should only play a minor role in the heating market due to the limited availability of sustainably produced biomass. Its use should be limited to applications that are otherwise difficult to supply. Nature-compatible sourcing and meeting of sustainability criteria must be ensured for the biomass used in heat applications. Residual and waste materials should be used; the use of cultivated biomass or forest wood should be critically evaluated from a nature conservation perspective.

Recommendations: The use of biomass in the heating market should be limited to old/existing buildings. The federal government should abolish the (indirect) promotion of biomass plants in new buildings in the building subsidy schemes (BEG). At the municipal level, corresponding combustion restrictions can be stipulated in urban development plans (so called Bebauungspläne § 9 para. 1 no. 23 a BauGB). If possible, biomass should not be used as the main heat source for buildings, but only bivalent or multivalent to cover peak loads. The federal subsidy programs (BEG and BEW) should be revised accordingly. In order to ensure that the biomass used in the heating market originates from sustainable sources, the federal government should establish legal sustainability requirements for biomass in the heating sector, e.g. in the GEG.

Expansion of district heating grids and heat storage

According to the energy scenarios analysed, an efficient energy system requires a considerable expansion of district heating, which should be densified and expanded in the future, especially in cities. Even though district heating can be supplied with a wide variety of generation technologies, each of which can have very different effects on nature conservation, the expansion of heating networks offers structural advantages for nature conservation aims because of the technologies that can be implemented. In dense cities, locally available renewable heat sources are particularly scarce and due to the existing building structure, particularly complex and expensive to implement. Retrofitting multi-family homes with heat pumps in dense areas offers significant challenges: There is often a lack of the necessary space to use groundwater or geothermal heat pumps; in addition, competing uses are to be expected. Air-source heat pumps also have a certain conflict potential in inner-city areas due to noise emissions and may require considerable construction measures if they are to be installed on the roof, for example.

The recommended solution by parts of the gas industry is to continue to operate many decentralised gas combustion heating systems in cities in the future, with natural gas being replaced by bio-methane and green hydrogen. According to current energy scenarios, green hydrogen will not be available in relevant quantities until 2030 at the earliest and will probably be expensive then. From a nature conservation perspective, there is a risk that enough hydrogen will not be available to the heating market at reasonable prices, so that greater use would have to be made of biomethane – with negative impacts on nature, landscape and area.

District heating, on the other hand, offers the possibility to use a variety of energy sources and to turn the energy system more flexible and stable. Nature conservation-compatible technologies like waste heat and deep geothermal energy can only be integrated when using district heating. DH grids also enable the use of RE electricity, which would otherwise be regulated, through cost-effective PtH applications in conjunction with large heat storage systems, using surplus renewable electricity. Heat grids also reduce electricity demand by allowing large-scale heat pumps to extract heat from large, centralised heat sources that have a higher temperature level than the outside air on cold days (e.g. sewage treatment plants or surface water) and thus are more efficient than decentralised heat pumps.

Recommendations: The political framework conditions for the densification and expansion of heat networks (which have already been examined in detail) must be consistently improved by the federal government, the states and the municipalities.

3. Politische Zielstellungen und Instrumente im deutschen Wärmesektor

Auf internationaler Ebene wurde mit dem Pariser Klimaschutzabkommen das völkerrechtlich verbindliche Ziel formuliert, die Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C zu beschränken.

Zur Erreichung dieses Ziels ist der Wärmemarkt von großer Bedeutung. In Deutschland beträgt der Anteil des Anwendungsbereiches Wärme/Kälte 57 % des Endenergieverbrauchs und circa 40 % der energiebedingten Treibhausgasemissionen sind auf den Wärmemarkt zurückzuführen (BDEW 2019).

Vor diesem Hintergrund hängt die Dekarbonisierung des Energiesystems in Deutschland maßgeblich vom Wärmesektor ab. Die vollständige Transformation der Energieversorgung im Wärmebereich hin zu einer klimaneutralen, auf erneuerbaren Energien basierenden Versorgungsstruktur (Wärmewende) sollte auf drei Elementen beruhen:

- Einsparung von Energie durch Minderung des Energiebedarfs (Effizienz im Verbrauch, z. B. durch energetische Gebäudesanierung),
- Effizienzverbesserung in der Bereitstellung von Energie (Effizienz in der Erzeugung, z. B. durch bessere Wirkungsgrade) und
- Ersatz fossiler Brennstoffe durch erneuerbare Energien und unvermeidbare Abwärme.

Der gesamte Energiemarkt hängt in hohem Maß von dem bestehenden regulatorischen Umfeld ab, das unter anderem auf Basis von politischen Zielstellungen gestaltet wird. Für die drei genannten Elemente existieren zahlreiche Zielvorgaben und Instrumente, die das regulatorische Umfeld bestimmen und erhebliche Auswirkungen auf die Umsetzbarkeit und Wirtschaftlichkeit energiewirtschaftlicher Investitionen in den jeweiligen Bereichen haben.

Der Wärmesektor wird bisher in deutlich geringerem Maß durch ein kohärentes Regelwerk gesteuert als beispielsweise der Stromsektor. Mit der Schaffung eines wettbewerblichen Strommarktes Mitte der 90er Jahre sowie des Erneuerbare-Energien-Gesetzes ging eine umfangreiche Regulierung mit Gesetzen und Verordnungen einher, die es in dieser Form für den Wärmesektor nicht gibt.

Gerade vor diesem Hintergrund ist es wichtig, eine Bestandsaufnahme der Gesetze, Förderungen, politischen Zielstellungen und Akteure mit Einfluss auf den Wärmesektor durchzuführen. In Arbeitspaket 1 erfolgt eine nicht abschließende Darstellung maßgeblicher Gesetze, Förderungen und politischen Zielstellungen mit Einfluss auf den Wärmesektor (Überblick s. Abb. 1), sowie eine fachliche Einordnung der Auswirkung auf den Naturschutz bzw. die Biomassenutzung.

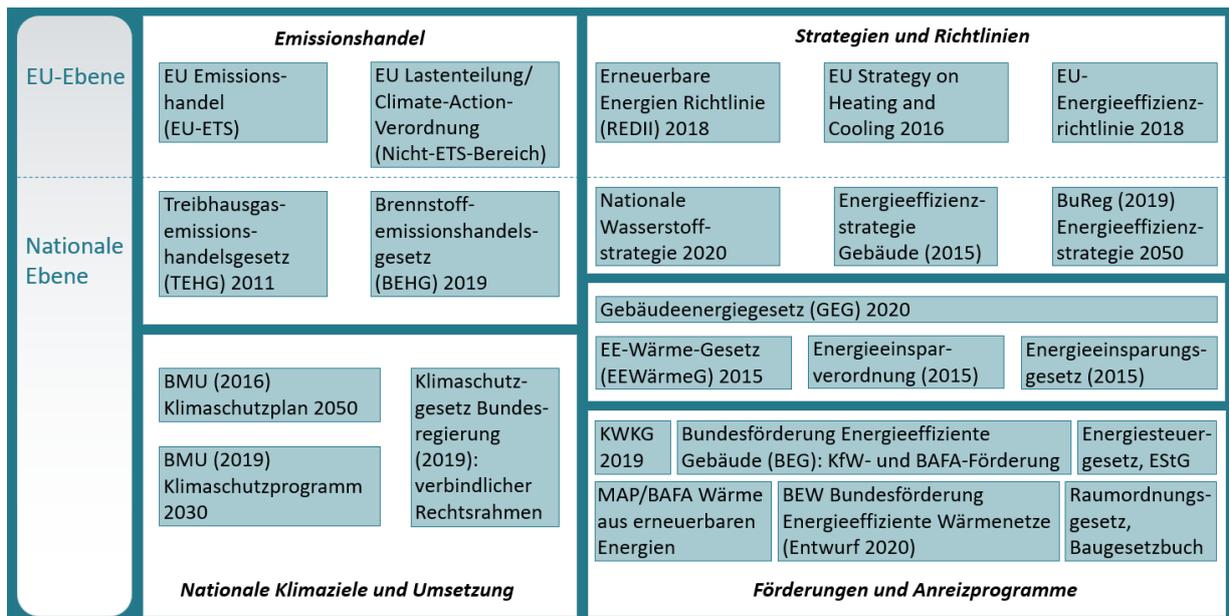


Abb. 1: Ausgewählte Strategien, Gesetze und Förderungen auf EU- und nationaler Ebene, die relevant für den Wärme- bzw. Kältemarkt in Deutschland sind (Quelle: Hamburg Institut)

3.1. Emissionshandel

Zentrale Instrumente der EU-Klimaschutzpolitik mit Wirkung auf den deutschen Wärmesektor sind der EU-ETS Emissionshandel und die Verordnungen zur Lastenteilung gemäß Effort-Sharing-Entscheidung.

Das europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) umfasst die THG-Emissionen aller größeren Kraftwerke, der energieintensiven Industrie und des EU-Flugverkehrs. Für den Wärmesektor relevant ist dies demnach für Feuerungsanlagen mit einer Wärmeleistung von über 20 MW (große Wärmeerzeugungsanlagen, die z. B. in Fernwärmenetze einspeisen wie fossil befeuerte Kraftwerke, Heizkraftwerke in KWK-Betrieb und Heizwerke, sowie industrielle Anlagen zur Prozesswärmeerzeugung). Die Menge der Emissionen wird durch den ETS begrenzt, indem Emissionshandelsrechte in Form von Zertifikaten auf dem europäischen Markt gehandelt werden. Die deutsche Gesetzgebung setzt die Vorgaben mit dem Treibhausgasemissionshandelsgesetz (TEHG) um. Das Gesetz sieht vor, dass Unternehmen jährlich eine ihren Emissionen entsprechende Anzahl an Emissionsberechtigungen abgeben müssen. Diese Berechtigungen können sie entweder kostenlos vom Staat zugeteilt bekommen, bei Auktionen auf dem Primärmarkt ersteigern oder auf dem Sekundärmarkt kaufen.

Die Lastenteilungsentscheidung (Effort Sharing) und die daraus hervorgehende EU-Climate Action-Verordnung legt verbindliche Ziele für die Senkung der THG-Emissionen der Mitgliedsstaaten in den Nicht-ETS-Sektoren fest (Verkehr, Landwirtschaft, Gebäude und kleinere Teile von Energiewirtschaft und Industrie mit Anlagen unter 20 MW Wärmeleistung). Etwa die Hälfte der THG-Emissionen in Deutschland entsteht in Nicht-ETS-Sektoren. Lange Zeit gab es für diesen Bereich keine CO₂-Bepreisung, aller Voraussicht nach verfehlt Deutschland unter anderem deshalb seine Klimaziele für das Jahr 2020. Für den Wärmesektor sind insbesondere die Bereiche Gebäude und kleine Wärmeerzeugungsanlagen (Industrie sowie Kraft- und Heizwerke) relevant (Deutsch et al. 2018).

In Deutschland tritt für die Umsetzung der EU-Climate-Action-VO ab 2021 das Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) in Kraft. Damit wird die CO₂-Bepreisung im nationalen Emissionshandelssystem (nEHS) für den Nicht-ETS Bereich in den Sektoren Wärme und Verkehr implementiert. Verantwortlich für den Vollzug ist die Deutsche Emissionshandelsstelle im Umweltbundesamt (DEHSt 2020). Der nEHS setzt bei den Inverkehrbringern der Brennstoffe an

(„Upstream“-Emissionshandel), anstatt wie der europäische Emissionshandel nach dem „Downstream“-Prinzip die Anlagenbetreiber zu verpflichten. Inverkehrbringer sind beispielsweise Großhändler von Brennstoffen, Hersteller von Brennstoffen mit Großhandelsvertrieb sowie Unternehmen, die Brennstoffe nach Deutschland importieren (im Sinne der Energiesteuer einführen). Es ist davon auszugehen, dass die Inverkehrbringer den Preis der Emissionszertifikate an ihre Kunden weitergeben, sodass am Ende der Lieferkette die Brennstoffnutzer den Preis für ihre CO₂-Emissionen zahlen.

Ähnlich wie im EU-ETS sind die Teilnehmenden dazu verpflichtet, jährlich Zertifikate im Umfang ihrer Emissionen zu erwerben und bei der DEHSt abzugeben. Es gibt im Gegensatz zum EU-ETS jedoch keine kostenlos zugeteilten Zertifikate. Die Festpreise für Emissionen steigen von 25 €/t CO₂ (2021) auf 55 €/t CO₂ (2025) an, danach werden die Preise über Versteigerungen wettbewerblich ermittelt.

Alle Brennstoffe, bei deren Verbrennung CO₂ entsteht, werden in das nEHS einbezogen. Dazu gehören Benzin, Diesel, Heizöl, Erdgas, Flüssiggas und Kohle (vgl. BEHG Anlage 1).

Biogene Brennstoffe zählen ebenfalls dazu, für die ersten beiden Jahre (2021 und 2022) sind sie jedoch von der Berichtspflicht ausgenommen. Ab 2023 besteht für biogene Brennstoffe die Berichtspflicht. Erfüllen die Brennstoffe jedoch Nachhaltigkeitskriterien, so besteht keine Abgabepflicht von Zertifikaten. Dies stellt die Holznutzung zur Wärmeerzeugung ggü. der Nutzung von abgabepflichtigen Brennstoffen besser und könnte diese massiv anreizen.

3.2. Politische Ziele und Strategien

3.2.1. Europäische Ebene

Neben den genannten europäischen Strategien, die den Emissionshandel beeinflussen, wurde auf EU-Ebene das Thema Wärmewende verstärkt mit der im Februar 2016 veröffentlichten EU Strategy on Heating and Cooling (Europäische Kommission 2016) angegangen. Zentrale Aufgabenfelder sind laut dieser Strategie die Kopplung des Strom- und Wärmesektors: Wärmespeicher sollen zunehmend als Energiespeicher für fluktuierende EE-Stromerzeugung dienen. Weiter heißt es, dass Wärmenetze das Potenzial haben, erneuerbare Wärmequellen einzubinden und die Energieeffizienz zu steigern. Strategische Ansatzpunkte seien die Transparenz von Preisen und Effizienzwerten verschiedener Wärmelösungen, sodass durch Energielabel und Möglichkeiten des Preisvergleichs effizientere Technologien verbreitet werden und kumulierte CO₂-Einsparungen von 135 MT bis 2030 erreicht würden.

Die Erneuerbare-Energien-Richtlinie RED II (EU 2018a) setzt das verbindliche Ziel, bis zum Jahr 2030 32 % des Endenergieverbrauchs der EU durch erneuerbare Energiequellen zu decken. Die RED II richtet sich in der Neufassung erstmals direkt an den Wärmesektor (Art. 23 RED II) mit dem Hinweis, den Anteil der Erneuerbaren Energien in dem Sektor schrittweise zu erhöhen. Jährlich sollte der EE-Anteil im Wärmesektor im Zeitraum von 2021 bis 2030 um 1,1 Prozentpunkte erhöht werden (bei Berücksichtigung von Abwärme um 1,3 %). Dieses Ziel ist indikativ, es wird also anerkannt, dass die Mitgliedsstaaten selbst über geeignete Maßnahmen zur Zielerreichung entscheiden können. Als Möglichkeiten werden u. a. auch der Ausbau von Fernwärmenetzen und die Erhöhung des EE-Anteils in diesen genannt.

In der EU-Energieeffizienzrichtlinie (EU 2018b) wird die Reduktion des prognostizierten Primärenergieverbrauchs im Jahr 2030 um 32,5 % von 1.887 Mio. t RÖE auf 1.273 Mio. t RÖE angestrebt. Dafür sollen u. a. nachhaltige Technologien für effiziente Fernwärme und Fernkältesysteme gefördert werden.

Um die Energie- und Wärmewende im Gebäudesektor voranzutreiben, hat die EU am 14. Oktober 2020 das Programm Renovation Wave verabschiedet. Relevante Aspekte darin sind der Modernisation Fund (ca. 14 Mrd. Euro), der Investitionen in energieeffiziente Gebäude und in

die Modernisierung von Fernwärmesystemen unterstützt, sowie Maßnahmen im Bereich Dekarbonisierung von Wärme und Kälte. Unter anderem wird erwähnt, dass die Zielvorgaben für erneuerbare Wärme und Kälte im Rahmen der RED-Überarbeitung verschärft werden könnten. Zudem könnten in diesem Zuge Vorgaben für Anteile erneuerbarer Wärme in Gebäuden gesetzt werden (Europäische Kommission 2020).

3.2.2. Nationale Ebene

In diesem Abschnitt wird auf die inhaltlichen Festlegungen in Bezug auf den Wärmesektor folgender nationaler Strategiepaper eingegangen:

- Energiekonzept der Bundesregierung (2010)
- Energieeffizienzstrategie Gebäude (2015)
- Klimaschutzplan (2016)
- Energieeffizienzstrategie 2050 (2019)
- Klimaschutzprogramm 2030 (2019)
- Klimaschutzgesetz (2019) - Update durch am 31.8.2021 novelliertes KSG: Klimaneutralität bis 2045 anstatt bis 2050; mit Zwischenzielen 2030: -65 % (bislang: -55 %) und 2040: -88 %; zudem: Zwischenschritt im Jahr 2030: Energiewirtschaft -62 % bis -61 %, Gebäude -67 % bis -66 %, Industrie -51 % bis -49 % (Klimaschutzplan 2050 (2016)) bzw. Update KSG 2021: Energiewirtschaft -77 %, Gebäude -68 %, Industrie -58 %;
- Integrierter nationaler Energie- und Klimaplan (NCEP) (2020)
- Nationale Wasserstoffstrategie (2020)

Auf nationaler Ebene dient das Energiekonzept der Bundesregierung aus dem Jahr 2010 (BMWi, BMU 2010) weiterhin als Grundlage vieler Strategien und politischen Zielstellungen. Darin werden folgende Ziele definiert:

- Der EE-Anteil am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte soll bei 14 % bis 2020 liegen.
- Der Wärmebedarf von Gebäuden soll bis 2020 um 20 % reduziert werden, der Primärenergiebedarf von Gebäuden um etwa 80 % bis 2050 („nahezu klimaneutraler Gebäudebestand“).

Die Energieeffizienzstrategie 2050 (BuReg 2019a) soll die von der EU geforderten Energieeffizienzziele (EU 2018b) ausgestalten. Zudem werden EE-Anteile am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte im Gebäudesektor definiert (27 % im Jahr 2030) und Maßnahmen zur Zielerreichung genannt.

Im Gegensatz zu der Energieeffizienzstrategie Gebäude (BMWi 2015) wird in der Energieeffizienzstrategie 2050 nicht gesondert auf die Nutzung von Biomasse zur Erfüllung dieses Ziels eingegangen.

Das BMWi erarbeitete 2015 die Energieeffizienzstrategie Gebäude, die den langfristigen Sanierungsbedarf im Gebäudebestand festlegt und beschreibt, wie ein nahezu klimaneutraler Gebäudebestand bis 2050 erreicht werden kann.

Darin heißt es in Bezug auf Biomasse: „Die Flächenkonkurrenz beschreibt einerseits die Konkurrenz zwischen landwirtschaftlichen und anderen Nutzungsformen der Landschaft und andererseits zwischen den verschiedenen landwirtschaftlichen Nutzungen. Es wird davon ausgegangen, dass das gesamte Flächenpotenzial für Biomasseanbau in Deutschland langfristig eingeschränkt gegenüber 2015 ausgedehnt werden kann (ifeu: um 20 Prozent). Eine Nutzungskonkurrenz ist auf der Ebene der energetischen Nutzung der Biomasse bei der sektoralen Zuordnung möglich. Die Wärmeerzeugung – sofern sie aus flüssigen oder gasförmigen Biobrennstoffen stammt – kann mit der Verwendung im Mobilitätsbereich konkurrieren. Insbesondere bei der Mobilität, der Stromerzeugung und der Prozesswärmeerzeugung

(Hochtemperatur) ist Biomasse nach heutigem Kenntnisstand oft die einzige Möglichkeit, erneuerbare Energieträger einzusetzen und somit Treibhausgase zu reduzieren.“ (BMW 2015).

Im November 2016 verabschiedete die Bundesregierung den Klimaschutzplan 2050 (BMU 2016) als die im Pariser Abkommen geforderte Klimaschutzstrategie. Deutschlands Ziel ist demnach, bis zum Jahr 2050 weitestgehend klimaneutral zu sein.

Das Klimaschutzprogramm 2030 (BMU 2019) konkretisiert diese Ziele und verbindet dabei sektorspezifische Ziele mit übergreifenden Maßnahmen. Hier sind für unser Projekt insbesondere die Sektoren Energiewirtschaft und Gebäude relevant.

Im am 18. Dezember 2019 in Kraft getretenen Klimaschutzgesetz (BuReg 2019b) schreibt die Bundesregierung ihre im Klimaschutzplan 2050 und Klimaschutzprogramm 2030 definierten nationalen Klimaschutzziele verbindlich fest und definierte das Ziel Klimaneutralität im Jahr 2050. Ein Urteil des Bundesverfassungsgerichts vom 29. April 2021 stellte jedoch die Unvereinbarkeit der festgelegten nationalen Klimaschutzziele und der bis 2030 zulässigen Jahresemissionsmengen mit den Grundrechten fest. Die Novellierung des Klimaschutzgesetzes sieht Klimaneutralität bis zum Jahr 2045 vor und eine Reduktion der THG-Emissionen um 65 % bis 2030.

Der integrierte nationale Energie- und Klimaplan (National Energy and Climate Action Plan – NCEP) Deutschlands gibt zudem einen Überblick über die deutsche Energie- und Klimapolitik sowie den aktuellen Stand der Planungen auf diesen Gebieten wieder (BMW 2020). Die Maßnahmen des Klimaschutzprogramms 2030 sind im NCEP berücksichtigt.

Im NCEP wird Bezug auf die erwarteten Zielpfade für die Bioenergienachfrage (aufgeschlüsselt nach Wärme, Strom und Verkehr, vgl. Tab. 1 und Tab. 2) sowie auf das Biomasseangebot genommen.

Dort heißt es: „Die genutzte Bioenergie soll künftig stärker auf Abfall- und Reststoffen basieren. Daher ist es wichtig, alle Abfall- und Reststoffe tatsächlich zu erfassen; das Prinzip der Kaskadennutzung muss dabei beachtet werden. Eine Ausweitung der Anbauflächen für Bioenergie ist nicht zu erwarten und kommt aufgrund von Flächenrestriktionen nicht in Betracht. Die Nachhaltigkeitskriterien der RED II sind auch auf Importe (aus dem Binnenmarkt und aus Drittstaaten) anzuwenden. Unter Beachtung aller Aspekte beträgt die für Bioenergie maximal verfügbare Biomasse in Deutschland gegenwärtig rund 1.000 bis 1.200 PJ/a (Inlandspotenzial).

Nach bisherigen Prognosen sinkt im Stromsektor die Nutzung von Biomasse, während sie im Wärme- und Kälte- [...] bis 2030 ansteigt. Die Nutzung von Biomasse im Stromsektor sinkt, weil sie dort im Vergleich mit anderen Technologien wie Windenergie und Photovoltaik ein relativ kostenintensiver erneuerbarer Energieträger ist. Dies gilt insbesondere für die Stromerzeugung aus nachwachsenden Rohstoffen und auch unter Berücksichtigung der Bereitstellung von regelbarer Leistung bzw. Flexibilität.

Der energetische Einsatz von Biomasse [...] in Hochtemperaturprozessen in der Industrie sowie in aufgrund von technischen oder rechtlichen Restriktionen nicht oder nur schwer dämmbaren Gebäuden kann, unter Berücksichtigung des begrenzten Potenzials nachhaltiger Biomasseproduktion, eine Option sein, um die nationalen Klimaschutzziele kosteneffizienter zu erreichen als insbesondere durch den Einsatz strombasierter Brenn- und Kraftstoffe.“ (BMW 2020).

Es wird auf nationaler Ebene also einerseits anerkannt, dass das Biomassepotenzial nicht unbegrenzt steigerbar ist, andererseits wird der Biomasse jedoch eine große Bedeutung bei der Dekarbonisierung der Wärmeversorgung zugeschrieben.

Tab. 1: Auszug aus den technologiespezifischen Anteilen für erneuerbare Energien unter Angabe des voraussichtlichen gesamten Bruttoendenergieverbrauchs je Technologie und Sektor in TWh (NCEP). Quelle: BMWi 2020 (angepasst).

TWh	2020	2025	2030
Biomasse und sonstige erneuerbare Abfälle	151	163	163
sonstige EE	23	46	70

Tab. 2: Erwartete Zielpfade für die Biomassenachfrage im NCEP. Quelle: BMWi 2020.

Angaben in PJ	2021	2025	2030
Endenergieverbrauch	1130	1140	490
feste Biomasse	516	505	118
flüssige Biomasse	119	116	352
Biogas	354	376	144
Abfall, biogen	141	143	
Endenergieverbrauch für Wärmezwecke (inkl. Biodiesel in der Landwirtschaft)			
feste Biomasse	425	430	421
flüssige Biomasse	14	17	19
Biogas	98	120	124
Abfall, biogen	78	81	83

Deutschland setzt mit der im Juni 2020 vereinbarten Nationalen Wasserstoffstrategie auf Wasserstoff, vorwiegend zur Dekarbonisierung der Anwendungsbereiche Verkehr und Industrie (BuReg 2020a). Wasserstoff soll in der Industrie vorrangig stofflich eingesetzt werden, jedoch auch zur Prozesswärmeerzeugung beispielsweise beim anteiligen Einblasen in bestehende Hochöfen in der Stahlherstellung. Im Bereich Wärme werden im Wasserstoffstrategiepapier der Bundesregierung nur zwei Maßnahmen genannt: die Förderung hocheffizienter Brennstoffzellenheizgeräte im Rahmen des Anreizprogramms Energieeffizienz (APEE) und die Prüfung der Förderung von „Wasserstoff-readiness“-Anlagen. Der Bedarf an Wasserstoff wird im Jahr 2030 mit 90 bis 110 TWh quantifiziert, bis dahin können inländische Elektrolyseanlagen mit einer Kapazität von 5 GW bis zu 14 TWh Wasserstoff auf Basis von erneuerbarem Strom herstellen (grüner Wasserstoff). Bis zum Jahr 2035 oder spätestens 2040 sollen weitere 5 GW Erzeugungskapazität folgen. Der überwiegende Teil der Wasserstoffnachfrage soll laut Strategie nicht lokal grün erzeugt werden, sondern aus Regionen mit überschüssigem erneuerbar erzeugtem Strom importiert werden.

3.2.3. Gebäudeenergiegesetz

Das im Juni 2020 verabschiedete Gebäudeenergiegesetz (GEG) ist Teil der Umsetzung des Klimaschutzprogramms 2030 und tritt am 1. November 2020 in Kraft.

Damit werden das EEWärmeG, das EnEG und die EnEV auf eine gemeinsame gesetzliche Grundlage gestellt. So sollen die verschiedenen Regelwerke zur Gebäudeeffizienz und zur Nutzung von EE-Wärme vereinheitlicht und entbürokratisiert werden.

Im GEG werden die europäischen Vorgaben zu Anforderungsniveaus für Neubauten und Sanierungen im Bestand umgesetzt, jedoch nicht verschärft. Gegenüber EnEV und EEWärmeG gibt es keine weitreichenden Veränderungen bei den Anforderungen an Neubauten. Ein

eingeschränktes Verbot des Einbaus von reinen Öl-Heizungen gilt in Neubauten sowie ab 2026 im Bestand.

Die Anforderungsniveaus zur Nutzung erneuerbarer Energien im Neubau entsprechen im Wesentlichen denen des EEWärmeG: Deckungsanteile sind bei Solarthermie 15 %, bei Geothermie/Umweltwärme 50 % und bei Biomasse 50 %.

Neu ist, dass auch die Anwendung von Biomethan oder Biogas in Brennwertkesseln und nicht nur wie bislang in KWK-Anlagen als Erfüllungsoption der Neubau-Anforderungen besteht (bis dato wird dies im EEWärmeG geregelt).

Zudem werden die Primärenergiefaktoren (PEF) für biogene Brennstoffe teilweise gesenkt: für Biomethan beträgt dieser nur noch 0,5 bzw. 0,7 (Kessel/KWK) anstatt wie bislang mit Erdgas gleichgesetzt zu werden (PEF 1,1). Der PEF für Holz bleibt bestehen.

Die Biomethanbranche verbucht diese Änderungen bereits als Erfolg und hofft auf einen attraktiveren Einsatz von Biomethan für Verbraucher in der Zukunft.

3.2.4. Förderung

Basierend auf dem Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050 wurden einige Förderprogramme kürzlich aktualisiert oder novelliert.

So wurden beispielsweise die Förderbedingungen für Wärmepumpenanlagen, Biomasseheizkessel und Solarthermieranlagen des Marktanzreizprogramms des BAFA (MAP zur Förderung von Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt) im Rahmen der im Januar 2020 in Kraft getretenen Novellierung deutlich attraktiver gestaltet. Biomasseanlagen werden im MAP nun mit bis zu 45 % (Austauschprämie für Ölheizungen) bzw. mit 35 % (Regelfall) der Investitionskosten gefördert. Es zeichnete sich bereits in den ersten sieben Monaten des Jahres 2020 ein deutlicher Zuwachs an entsprechenden Förderanträgen ab: Auf ca. 130.000 Anträge 2020 kamen im Jahr 2019 im gleichen Zeitraum nur ca. 42.000 Anträge. In 40 % der aktuellen Anträge wurde der Förderantrag für eine Biomasseanlage gestellt. Besonders Pelletöfen mit integrierter Wassertasche seien sehr gefragt, meldet der Deutsche Energieholz- und Pellet-Verband (Bröer 2020).

Auch das KWKG wurde im Juli 2020 in novellierter Form durch Bundestag und Bundesrat beschlossen. Ein neuer Fördermechanismus für innovative KWK-Systeme (iKWK) sieht Fördersätze je erzeugter kWh Strom abhängig vom Anteil erneuerbarer Wärme im iKWK-System vor. Aufgrund der geforderten Jahresarbeitszahl von 1,25 wird Biomasse (Biogas oder Holz) vom EE-Bonus jedoch ausgeschlossen. Der im KWKG festgelegte Kohleersatzbonus unterscheidet nicht, ob von Kohle auf Erdgas, Biomasse oder Abfall umgerüstet wird.

Förderungen sowohl von zentraler als auch dezentraler EE-Wärmeerzeugung bestehen auch in den KfW-Förderprogrammen (Erneuerbare Energien Premium/Standard). Die Anreize bestehen aus zinsgünstigen Darlehen und Tilgungszuschüssen, die sich im Januar 2020 erhöht haben. Förderfähig sind beispielsweise Biomasseheizkessel und Biomasse-KWK-Anlagen ab 100 kW, EE-Wärmenetze mit einem Biomasseanteil von 50 % und Biogasleitungen.

Die vom BMWi anvisierte Bundesförderung effiziente Wärmenetze (BEW) soll als neues Förderprogramm vor u. a. das Modul Wärmenetze 4.0 beinhalten. Dieses fördert bereits seit 2017 (novelliert: Dez. 2019) auf erneuerbaren Energien basierende effiziente Wärmenetze von der Machbarkeitsstudie bis hin zur Umsetzung. Darüber hinaus wird das BEW vsl. weitere investive Grundförderungen (für Einzelmaßnahmen sowie für die Transformation von Bestandsnetzen) und eine Betriebsprämie für EE-Erzeuger (für Solarthermie und Großwärmepumpen) beinhalten.

4. Meta-Analyse zur Entwicklung der Wärme- und Kältebereitstellung in Deutschland bis 2050

Das Arbeitspaket 2 dient der vergleichenden Analyse (Metaanalyse) verschiedener Entwicklungsszenarien für den Wärmesektor.

Aufgabe der Metaanalyse ist es, die Bandbreite der Rahmenbedingungen und der Ergebnisse unterschiedlicher Klimaschutzszenarien für den Wärme- und Kältesektor aufzuzeigen. Die systematische Analyse der Szenarien soll die mögliche Bandbreite an zukünftigen Wärmebedarfen und maßgeblichen Schlüsseltechnologien sowie bedeutende Stellgrößen darstellen.

Dafür wird eine große inhaltliche Bandbreite der Szenarien abgebildet, um die unterschiedlichen Auswirkungen verschiedener Entwicklungspfade auf den Naturschutz im weiteren Verlauf des Projekts angemessen darstellen zu können.

Die in AP 1 (Kapitel 3) des Projekts beschriebenen politischen Ziele und Instrumente im Wärmesektor tauchen auch im Kontext der Metaanalyse wieder auf: In den untersuchten Szenarien definieren sie Rahmen- und Zielbedingungen.

Da Szenarien zwar zukünftige Entwicklungspfade aufzeigen, jedoch mit dem verfügbaren Wissensstand zu einem bestimmten Zeitpunkt erstellt werden, sind sie Momentaufnahmen einer möglichen Zukunft. Die hier untersuchten Studien sind aus diesem Grund sehr aktuelle Veröffentlichungen, damit sie die politischen Rahmenbedingungen möglichst realistisch wiedergeben.

Insgesamt werden 22 Szenarien aus sieben Studien ausgewählt, um in der Metaanalyse untersucht und hinsichtlich der modellierten Entwicklung bis 2050 verglichen zu werden. Diese Szenarien bilden ein großes Spektrum an möglichen Schwerpunkten: Sie unterscheiden sich u. a. hinsichtlich angenommenen Biomasserestriktionen, Effizienzniveaus, Wirtschaftsentwicklungen, zeitlichen Entwicklungen und gesellschaftlichen Einstellungen. Die analysierten Studien wurden im Zeitraum von 2018 bis 2020 veröffentlicht.

Die Metaanalyse wird in drei Schritten durchgeführt. Im ersten Schritt werden die exogenen Modellvariablen (fest vorgegebene, von außen bestimmte Parameter, die als Modell-Input übernommen werden) sowie die Modellstrukturen der Szenarienmodelle erläutert. Im zweiten Schritt werden die Ergebnisse gebündelt nach den verschiedenen Erzeugungsoptionen dargestellt und miteinander verglichen. Anschließend werden die wichtigsten Einflussgrößen der Studien hinsichtlich ihrer Wirkung eingeordnet.

4.1. Ausgangssituation: erneuerbare Wärmeherzeugung in Deutschland

Der Anteil erneuerbarer Energien an der Wärmeherzeugung in Deutschland liegt mit etwa 176 TWh im Jahr 2019 bei gut 14 %, Biomasse hat daran mit rund 86 % den größten Anteil (vgl. Abb. 2) (BMWi 2019).

Biomasse ist in der Wärmebereitstellung vielfältig und flexibel einsetzbar, da Lagerung und Transport einfach sind und Wärme auf verschiedenen Temperaturniveaus bereitstellen kann. Somit bietet der Einsatz von Biomasse im Wärmesektor oft eine kostengünstige und versorgungssichere Alternative zu fossilen Brennstoffen, wenn THG-Emissionen eingespart werden sollen (DBFZ 2019). Die feste Biomasse (vornehmlich Holz) trug mit 116 TWh zur Wärmeherzeugung bei.

Die solarthermische Erzeugung sank 2019 im Vergleich zum Vorjahr aufgrund niedriger Sonneneinstrahlung leicht auf 8 TWh.

Aus Umweltwärme und oberflächennaher Geothermie sowie tiefer Geothermie wurden ca. 16 TWh Wärme bzw. Kälte erzeugt.

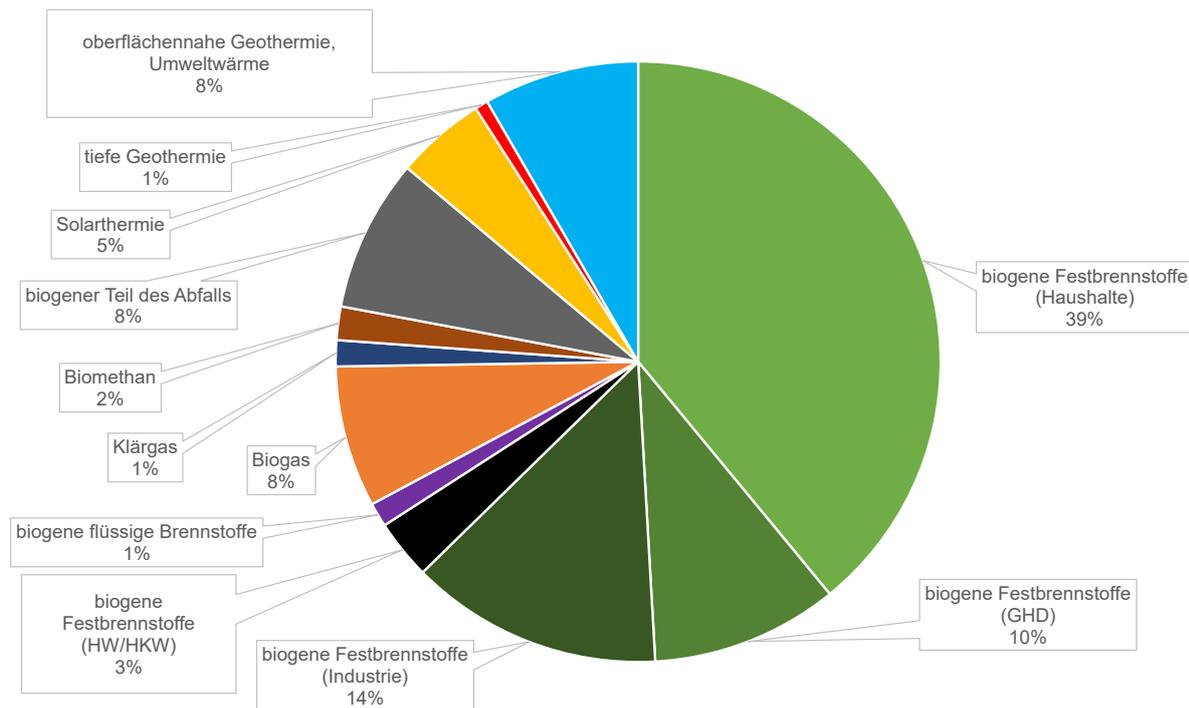


Abb. 2: Wärmeverbrauch aus erneuerbaren Energien im Jahr 2019. Quelle: Hamburg Institut basierend auf Umweltbundesamt (2020).

Aufgrund verbesserter Förderbedingungen, insbesondere für Förderprogramme für dezentrale Heizungssysteme sind auf dem Wärmemarkt im Laufe des Jahres 2020 gegenüber dem Vorjahr Veränderungen zu verzeichnen.

Bei der Inanspruchnahme der MAP-Förderung zeichnet sich bereits in den ersten sieben Monaten des Jahres 2020 ein deutlicher Zuwachs an entsprechenden Förderanträgen ab (Bröer 2020).

In Abb. 3 ist der Zuwachs der Anträge dargestellt. Der deutlichste Anstieg ist bei Biomasseheizsystemen zu verzeichnen, deren Anträge sich ggü. 2019 um über 250 % erhöht haben. Auch die Anträge für Zuschüsse für Wärmepumpen und Solarthermieranlagen wurden 2020 mehr als verdoppelt.

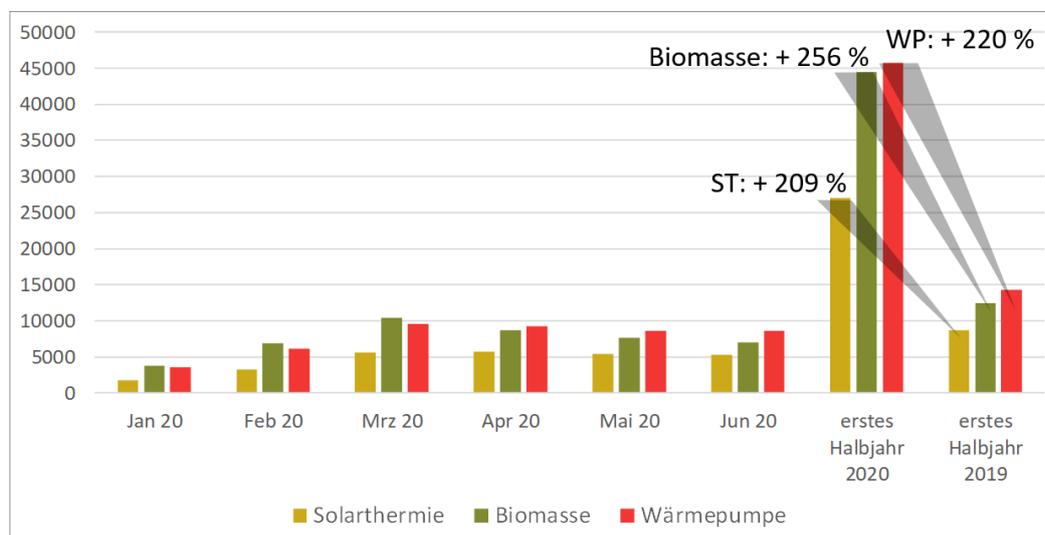


Abb. 3: BAFA Heizen mit erneuerbaren Energien. Anträge im ersten Halbjahr 2020 im Vergleich zu 2019. Quellen: Bröer (2020), Roeder (2020).

4.2. Annahmen und Rahmenbedingungen der Szenarien

Bei der Modellierung von Szenarien lassen sich zwei Arten unterscheiden: Zielszenarien zeigen mögliche Transformationspfade zu einem definierten Zustand in der Zukunft auf, während explorative Szenarien von einem Startpunkt ausgehen und die Entwicklung ausgehend von getroffenen Rahmenbedingungen darstellen. Die meisten der im Rahmen der Metaanalyse untersuchten Szenarien sind Zielszenarien, die als Vorgabe THG-Reduktionsziele für Deutschland bis 2030 bzw. bis 2050 festlegen.

Bei der Erreichung der Ziele besteht allerdings ein großer Spielraum, der durch die Modellstrukturen und eingehenden Parameter bestimmt wird. Die Modellstrukturen bilden die Wirkzusammenhänge des Systems ab und sind bei energiesystemischen Modellierungen oftmals komplex, sodass mehrere Modelle parallel oder sequenziell verwendet werden, die jeweils verschiedene Sektoren oder Optimierungsbereiche abbilden.

Die eingehenden Parameter sind die Stellgrößen des Systems und werden anhand aktueller politischer, ökonomischer, technischer und gesellschaftlicher Bedingungen und zukünftiger Trends festgelegt. Zu den eingehenden Parametern gehören beispielsweise die vorgegebenen THG-Reduktionsziele (Zielzustand). Weitere Größen sind z. B. die Entwicklung der Brennstoffpreise, die CO₂-Preise im europäischen Emissionshandel und die Kosten zur Bereitstellung erneuerbarer Wärme oder Strom. Weiterhin werden in den Studien unterschiedliche Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung und zur Gesamtwohnfläche getroffen. In Kombination mit den Einflussfaktoren Sanierungsrate und -tiefe von Gebäuden beeinflussen diese Annahmen in hohem Maße die Entwicklung des Endenergiebedarfs im Gebäudesektor.

Zusätzlich zu den geschilderten Annahmen kommen weitere Modellfestlegungen hinzu: Welche Technologien zur Wärme- bzw. Kälteerzeugung werden berücksichtigt? Wie stark verbreiten sich Technologien auf dem Markt, die bislang einen geringen Reifegrad haben und bisher nur in einigen Pilot- und Forschungsprojekten eingesetzt werden, aber potenziell sehr große Auswirkungen auf die THG-Emissionen haben können (Game-Changer)?

Auch die Biomasseverfügbarkeit differiert in den Szenarien. Viele Modelle legen eine Obergrenze der verfügbaren Biomassemenge oder -anbaufläche als Restriktion fest, bestimmen jedoch nicht den sektoralen Einsatz der Biomasse vor der Modellierung (z. B. BDI, ISE). Andere Szenarien setzen den Ausstieg aus einzelnen Nutzungsarten (z. B. aus der dezentrale Biomassenutzung: IEE ExitBio) oder den kompletten Ausstieg aus der energetischen Biomassenutzung voraus (RES).

Neben diesen Größen existieren weitere Unsicherheitsfaktoren, die einen Einfluss auf die zukünftige Entwicklung des Wärme- und Kältemarktes haben. Einige Studien untersuchen die Auswirkungen von verschiedenen gesellschaftlichen Verhaltensweisen (z. B. das Umweltbewusstsein, das Verhalten bzgl. Energie- und Ressourcenkonsum) sowie von unterschiedlicher öffentlicher Akzeptanz für große Infrastrukturprojekte (ISE, RES).

Für die Metaanalyse werden insgesamt 22 Szenarien aus sieben Studien ausgewählt, die einerseits ähnliche Zielzustände aufweisen (-95 %-THG-Reduktion 2050, mit Ausnahme von BDI N80 und PRO 30) und andererseits unterschiedliche Annahmen in Bezug auf zukünftige politische/gesellschaftliche/wirtschaftliche Entwicklungen, Effizienzniveaus und (für den Wärmesektor) verfügbare Biomassepotenziale treffen (s. Tab. 3).

Die Optimierung der Szenarien erfolgt in den jeweiligen Zieljahren meist nach volkswirtschaftlichen Kriterien, sodass für das Gesamtsystem die geringsten Kosten entstehen.

Tab. 3: Überblick der untersuchten Szenarien

Studie	Szenario	Kürzel	Ziel-jahr	CO ₂ -Reduktion	Biomasse-rest-riktion	Effizi-enz Ge-bäude-sektor	weitere Schwerpunkte
BDI (2018): Klimapfade für Deutschland	Nationaler Klimaschutz 80 %-Ziel	BDI N80	2050	-80 %	gering	mittel	"Nationale Alleingänge": kein global einheitlicher UN-Klimaprozess; neben Deutschland verfolgen nur wenige Länder umfangreiche Klimaschutzambitionen
	Globaler Klimaschutz 95%-Ziel	BDI G95	2050	-95 %	gering	hoch	"Globaler Klimaschutz": Weltgemeinschaft verpflichtet sich zur Erreichung des Zwei-Grad-Celsius-Ziels und koordiniert globale Instrumente zur Emissionsreduktion
Fraunhofer ISE (2020): Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem	Referenz	ISE Ref	2050	-95 %	gering	moderat	keine fördernden bzw. erschwerenden Randbedingungen
	Beharrung	ISE Beh	2050	-95 %	gering	moderat	Gesellschaftsverhalten: Widerstände gegen Einsatz neuer Technologien im privaten Bereich
	Inakzeptanz	ISE Inak	2050	-95 %	gering	moderat	Gesellschaftsverhalten: Mangelnde Akzeptanz für den Ausbau großer Infrastrukturen
	Suffizienz	ISE Suf	2050	-95 %	gering	mittel	Gesellschaftsverhalten: Verhaltensänderungen resultieren in merklicher Minderung des Energieverbrauchs
Fraunhofer IEE (2019): Entwicklung der Gebäude-wärme und Rückkopplung mit dem Energiesystem in -95 % THG-Klimazielszenarien	Moderate Sanierung; Beibehaltung dezentraler Biomassenutzung	IEE Mod Bio (2B)	2050	-95 %	gering	moderat	kein weiterer Schwerpunkt
	Moderate Sanierung; Ausstieg aus dezentraler Biomassenutzung	IEE Mod ExitBio (2A)	2050	-95 %	teilweise (dezentrale Nutzung)	moderat	kein weiterer Schwerpunkt
	Hohe Sanierung; Beibehaltung dezentraler Biomassenutzung	IEE San Bio (1B)	2050	-95 %	gering	hoch	kein weiterer Schwerpunkt

Studie	Szenario	Kürzel	Ziel-jahr	CO ₂ -Reduktion	Biomasse-rest-riktion	Effizi-enz Ge-bäude-sektor	weitere Schwerpunkte
	Hohe Sanierung; Ausstieg aus de-zentraler Bio-massenutzung	IEE San ExitBio (1A)	2050	-95 %	teilweise (de-zentrale Nut-zung)	hoch	kein weiterer Schwerpunkt
	Beibehaltung de-zentraler Bio-massenutzung	IEE 30 Bio	2030	-55 %	gering		kein weiterer Schwerpunkt
	Ausstieg aus de-zentraler Bio-massenutzung	IEE 30 ExitBio	2030	-55 %	teilweise (de-zentrale Nut-zung)		kein weiterer Schwerpunkt
UBA (2019): Wege in eine ressourcen-schonende Treibhaus-gasneutralität – RESCUE-Studie	GreenEe1	RES 1	2050	-95 %	hoch	hoch	Industrie steigert Produktionskapazitäten kontinuierlich; Exporte steigen weiter an
	GreenEe2	RES 2	2050	-95 %	hoch	hoch	Ausgeglichener globaler Handel; nationale Produktionskapazitäten rückläufig; durch steigende Qualität der produzierten Güter und Innovationen dennoch anhaltendes Wirtschaftswachstum
	GreenLate	RES Late	2050	-95 %	hoch	moderat	Verspäteter Anstieg des Ambitionsniveaus aufgrund von verzöger-tem gemeinschaftlichem Verständnis und Willen zur Umsetzung von Klima- und Ressourcenschutz
	GreenMe ("Ma-terial Efficiency")	RES Me	2050	-95 %	hoch	hoch	Materialeffizienz: gemeinschaftlicher Konsens für Klimaschutz, De-karbonisierung, Energieeinsparung und Ressourcenschutz mit ent-sprechenden politischen Rahmenbedingungen; bevorzugt Techni-ken mit geringem Primärrohstoffbedarf
	GreenLife	RES Life	2050	-95 %	hoch	hoch	Verbreitung nachhaltiger Lebensstile: starke Prägung des Willens jeder Einzelperson für ambitionierte und umweltbewusste Lebens-weise; Umweltbewusstsein und Wissen über notwendiges schnel-les Handeln sind Mainstream; legislative Maßnahmen unterstüt-zen, ohne dass sie als Zwang verstanden werden (Bottom-Up)

Studie	Szenario	Kürzel	Ziel-jahr	CO ₂ -Reduktion	Biomasse-rest-riktion	Effizienz Ge-bäude-sektor	weitere Schwerpunkte
	GreenSupreme	RES Sup	2050	95 %	hoch	hoch	Frühzeitiges ambitioniertes gemeinschaftliches Verständnis zur Umsetzung von Klimaschutz und Ressourcenschutz; schnell integrierte umweltpolitische verursachergerechter Rahmenbedingungen; bereits bis 2040 fundamentaler Beitrag zum 1,5 °C Transformationspfad; Kohleausstieg bis 2040; individuelles Umweltbewusstsein
BfN (2018): Naturverträgliche Energieversorgung aus 100 % erneuerbaren Energien 2050	Szenario 2: absehbare technologische Entwicklungen werden als zukünftige Standards angenommen, Naturschutzziele einbezogen (z. B. Erweiterung des Schutznetzes)	BfN 2	2050	k. A.	hoch	hoch	kein weiterer Schwerpunkt
UFZ, DBFZ (2019): Systemlösungen für Bioenergie im Wärmesektor im Kontext zukünftiger Entwicklungen	Case a: "Major share of Biomass" im Wärmesektor	DBFZ Maj (a)	2050	-95 %	mittel	hoch	kein weiterer Schwerpunkt
	Case b: "Minor share of Biomass" im Wärmesektor	DBFZ Min (b)	2050	-95 %	hoch	hoch	kein weiterer Schwerpunkt
Prognos (2020): Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050. Szenario unter Klimaschutzprogramm 2030		PRO 2030	2030	-52 %	gering		Kein weiterer Schwerpunkt

4.2.1. Klimapfade für Deutschland (BDI, Gerbert et al. 2018)

Die im Januar 2018 veröffentlichte Studie „Klimapfade für Deutschland“ wurde im Auftrag des Bundesverbandes der Deutschen Industrie (BDI) durch The Boston Consulting Group (BCG) und Prognos erstellt. Ziel der Studie ist es, volkswirtschaftlich kosteneffiziente Wege zur Erreichung der deutschen Emissionsminderungsziele bis zum Jahr 2050 aufzuzeigen (Basisjahr 2015). In einem umfangreichen Bottom-Up Prozess mit der deutschen Industrie erarbeiteten und validierten fast 200 Experten und Expertinnen von BCG, Prognos, dem BDI und aus rund 70 Unternehmen und Verbänden THG-Minderungsmaßnahmen. Deren Priorisierung erfolgt nach den direkten volkswirtschaftlichen CO₂-Vermeidungskosten der Maßnahmen.

Folgende Szenarien der BDI-Studie werden analysiert:

- BDI N80: Nationaler Alleingang mit 80 % THG-Minderung bis 2050,
- BDI G95: Globaler Klimaschutz mit 95 % THG-Minderung bis 2050.

In beiden Szenarien werden ein Bevölkerungsrückgang und eine Alterung der Gesellschaft angenommen. Im Zeitraum von 2015 bis 2050 verringert sich die Einwohnerzahl in Deutschland um 6 % auf 76,6 Mio. (2050). Die Anzahl der Haushalte nimmt dennoch leicht zu auf insgesamt 42 Mio. (2050). Zudem vergrößert sich die Wohnfläche pro Kopf von 45 m² auf 55 m². Die Gesamtwohnfläche vergrößert sich daher in Deutschland um 11 % auf 4.223 Mio. m². Im GHD-Sektor hingegen verringert sich die Nutzfläche um 15 % auf 1.755 Mio. m².

Der Import von Biomasse oder die Umwidmung von landwirtschaftlichen Flächen aus der Nahrungsmittel- oder Tierfuttermittelproduktion zum Anbau von Biomasse werden in den Szenarienmodellierungen ausgeschlossen. Die in Deutschland verfügbare Biomasse unterliegt einer absoluten Potenzialrestriktion, so sind im Jahr 2050 maximal 330 TWh (1.200 PJ) Biomasse zur energetischen Nutzung verfügbar.

Potenzielle Game-Changer sind noch sehr marktunreife Technologien, die bei einem Ramp-up jedoch ein hohes Wirkungspotenzial entfalten können, wie z. B. die Wasserstoffwirtschaft, Nanoschaum als Dämmstoff für Gebäude, Carbon-Capture-and-Storage/Utilization (CCS/CCU) und der Verzicht auf Fleischkonsum. Deren Entwicklung bis 2050 ist aus heutiger Sicht unsicher. Sowohl im N80- als auch im G95-Szenario wird für die sogenannten Game-Changer ein eher konservatives Vorgehen gewählt, sodass diese größtenteils unberücksichtigt bleiben.

In dem BDI N80-Szenario wird das Ziel der THG-Reduktion um 80 % bis 2050 (ggü. 1990) unter der Annahme eines „Nationalen Alleingangs“ modelliert. Während die Weltwirtschaft sich entsprechend einem eher konservativen Referenzpfad weiterentwickelt und große Volkswirtschaften Klimaschutzmaßnahmen nur zur Erreichung innenpolitischer Ziele verfolgen, verfolgt nur ein „Kern-Europa“ gemeinsam mit wenigen anderen Ländern ambitioniertere Klimaziele. In der internationalen Gemeinschaft herrscht ein Dissens über notwendige Klimaambitionen, sodass internationale Klimaschutzinstrumente verhindert werden und stattdessen nationale Sonderwege nebeneinander existieren. Es wird ein wirksamer Carbon-Leakage-Schutz angenommen, der energie- und emissionsintensive Industrien von über das heutige Niveau hinausgehenden direkten oder indirekten CO₂-bedingten Mehrkosten aus dem EU-ETS-Handel befreit. Folgen des nationalen Fokus sind auch ein Rückgang der Innovationsgeschwindigkeit und eine geringere Zahlungsbereitschaft für den Klimaschutz.

Es bestehen globales wirtschaftliches Wachstum und größtenteils offene Märkte. Die Preise für Rohöl, Erdgas, Kesselkohle, Biomasse und Kraftstoffe steigen sowohl in der EU als auch in den USA, China und Japan an, der Rohölpreis beispielsweise von 51 USD/Barrel (2015) auf 115 USD/Barrel (2050).

Auch die EU-ETS CO₂-Zertifikatskosten steigen von 11 €/t (2020) auf 45 €/t (2050).

Die wichtigsten Maßnahmen im Wärmesektor, die zur Zielerreichung im N80-Szenario berücksichtigt werden, sind:

- Steigerung der jährlichen Sanierungsrate um 50 % auf 1,7 % (2050) und Erhöhung der mittleren Sanierungseffizienz auf KfW-70-Effizienzhausniveau in Wohngebäuden.
- Neubauten mit 30 % weniger Verbrauch bis 2030 (z. B. durch Effizienzmaßnahmen und Gebäudeautomation) und zu 100 % erneuerbar beheizt.
- Deutlicher Ausbau der Fernwärme in urbanen Gebieten mit bestehender Infrastruktur auf etwa 20 % des Wärmemarktes.
- Beschleunigung des Einbaus von 14 Mio. Wärmepumpen im Gebäudebestand bis 2050.
- Stärkere Durchdringung der Solarthermie in Kombination mit anderen Technologien, begrenzt durch das geeignete Dachflächenpotenzial, das Profil der Wärmeverfügbarkeit ggü. der Nachfrage und die Dachflächenkonkurrenz mit Photovoltaik.
- Elektrifizierung und Effizienzgewinne in der Prozesswärme im Gewerbe, Handel und Dienstleistungs-Sektor (GHD).
- Erzeugungsstruktur der Fernwärme: Industrieabwärme, Solarthermie, Geothermie, Power-to-Heat, Hochtemperaturwärmepumpen, KWK-Gaskraftwerke sollen ältere Kohle-KWK-Anlagen ersetzen.
- Biomasse soll verstärkt aus bestehenden Anwendungen in der Strom- und Wärmeerzeugung in die Industrie gelenkt werden und dort effizient Gas und Kohle im Mitteltemperatursegment der Prozesswärmeerzeugung ersetzen.

Für derzeit noch unreife Technologien (Batterien, Ladeinfrastruktur) werden im N80-Szenario längere Ramp-up-Zeiten durch langsamere Lernkurven angenommen; potenzielle Game-Changer bleiben unberücksichtigt. Game-Changer werden aufgrund von fehlender gesellschaftlicher Akzeptanz nicht berücksichtigt.

Das G95-Szenario unterscheidet sich sowohl in Bezug auf das Klimaziel (95 % THG-Reduktion bis 2050 ggü. 1990) als auch in Bezug auf die Rahmensituation von dem N80-Szenario.

Im Gegensatz zu jenem verpflichten sich im Zielszenario „Globaler Klimaschutz“ alle großen Emittentenstaaten zu einem angemessenen Beitrag für das Erreichen des Zwei-Grad-Celsius-Ziels. Globale bzw. global koordinierte Klimaschutzinstrumente führen zu vergleichbaren Lasten und CO₂-Preisniveaus in allen Industrie- und Schwellenländern. Der CO₂-Preis steigt bis 2030 auf 55 €/t und bis 2050 auf 124 €/t.

Auch in diesem Szenario bestehen wirtschaftliches Wachstum und offene Märkte. Trotz des globalen Wachstums stagniert die Weltnachfrage nach fossilen Energieträgern, deren Preise dadurch dauerhaft auf einem niedrigen Niveau liegen. Der Rohölpreis liegt im Jahr 2050 nach einem leichten Anstieg wieder bei 50 USD/Barrel.

Im BDI G95-Szenario existiert eine höhere Zahlungsbereitschaft für Klimaschutz. Investitionen in Klimatechnologien beschleunigen Innovationen in diesem Bereich.

Folgende Maßnahmen werden im G95-Szenario berücksichtigt:

- Intensivierung der jährlichen Sanierungsrate auf 1,9 % (2050), Erhöhung der mittleren Sanierungseffizienz auf KfW55- bzw. KfW70-Effizienzhausniveau.
- 2050 sind knapp 80 % des Gebäudebestands ersetzt oder saniert; sanierte Wohngebäude haben dann den Energiestandard heutiger Neubauten und werden erneuerbar beheizt.
- Ausbau von Wärmepumpen in Kombination mit Umrüstung auf Flächenheizungssysteme.
- Neuerschließung weiterer Gebiete mit Fernwärmenetzen und Umbau der Fernwärme auf 100 % erneuerbare Fernwärmeerzeugung: Ersatz der KWK-Erzeugung durch Elektrokessel, Hochtemperaturwärmepumpen, Abwärme, Solar- und Geothermie.

- Biomassekessel oder synthetische Brennstoffe als Alternative zur dezentralen Wärmezeugung.
- Betrieb des Gasnetzes mit einer Mischung aus synthetischem Methan, Biogas und geringer Beimischung von Wasserstoff (bis zu 3 %) trägt auch zur Flexibilisierung des Energiesystems bei.
- Die verfügbare Biomasse (ohne Importe) wird auf die industrielle Prozesswärmeerzeugung im niedrigen und mittleren Temperatursegment konzentriert, im hohen Temperaturbereich sollen vor allem synthetische Brennstoffe zum Einsatz kommen.
- Import von synthetischen Brennstoffen (PtL, PtG, H₂) aus Ländern mit besseren Bedingungen für erneuerbare Stromerzeugung.

In diesem Szenario werden den potenziellen Game-Changern etwas weniger starke Restriktionen auferlegt; so werden CCS/CCU und Emissionsreduktionen im Tierbestand bei entsprechender technischer und wirtschaftlicher Eignung berücksichtigt.

4.2.2. Fraunhofer ISE: Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem (Sterchele et al. 2020)

Die Studie „Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem – Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen“ wurde vom Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE in Eigenforschung erstellt und im Februar 2020 veröffentlicht.

Der Schwerpunkt der Studie liegt darauf, den Einfluss gesellschaftlicher Verhaltensweisen auf die Energiewende bis 2050 mit dem Ziel einer THG-Minderung um 95 % (ggü. 1990) zu untersuchen. Neben der technischen Machbarkeit spielen die gesellschaftliche Einstellung und das Verhalten der Einzelpersonen eine große Rolle, so z. B. für den verhaltensbedingten Energieverbrauch, für den Ausbau von Infrastrukturen (wie z. B. von Windenergieanlagen oder Stromnetzen) und für Investitionsentscheidungen.

In der vorliegenden Metaanalyse werden die Ergebnisse der vier -95 %-Szenarien der ISE-Studie dargestellt, in denen jeweils bestimmte gesellschaftliche Einstellungen dominieren und die Rahmenbedingungen beeinflussen:

- ISE Ref: Referenz-Szenario
- ISE Beh: Szenario Beharrung
- ISE Inakz: Szenario Inakzeptanz
- ISE Suf: Szenario Suffizienz

In allen Szenarien wird ein Anstieg der beheizten Wohnfläche in Deutschland um 8 % im Zeitraum von 2020 bis 2050 angenommen.

Für die dezentrale Wärmeversorgung im Gebäudesektor werden 20 verschiedene Optionen berücksichtigt. Die Techniken zur Wärmebereitstellung umfassen konventionelle Kessel basierend auf Erdgas, Biomasse oder Öl; KWK-Anlagen; elektrische, brennstoffbasierte oder hybride Wärmepumpen, die Umweltwärme aus der Luft oder aus der Erde beziehen; Brennstoffzellensysteme basierend auf Methan oder Wasserstoff; ergänzt durch Warmwasserspeicher und solarthermische Kollektoren. Zudem werden zwei Klassen von Heizungssystemen anhand ihrer Temperaturniveaus unterschieden: Standardheizungssysteme mit Radiatoren und Niedertemperaturheizungen mit Flächenelementen.

Wärmenetze werden mit geothermischen Anlagen, aus KWK-Anlagen, mit elektrischen Großwärmepumpen, Gaskesseln, solarthermischen Kollektoren und Großwärmespeichern versorgt.

Biomasse wird zur Bereitstellung von industrieller Prozesswärme und von Gebäudewärme verwendet. Die Nutzung ist entweder direkt (z. B. in Holzkesseln) oder in Anlagen zur

Umwandlung (Biogasanlagen, Vergaser-Anlagen zur Herstellung von synthetischen Brennstoffen) möglich. Die Biomasseverfügbarkeit bleibt auf dem Status-Quo-Stand von ca. 290 TWh.

Wasserstoff wird in den Szenarien der ISE-Studie u. a. zur Wärmeerzeugung in der Industrie und in Gebäuden mittels H₂-Brennstoffzellen genutzt. Es bestehen die Möglichkeiten, Wasserstoff direkt ins Erdgasnetz einzuspeisen oder ein synthetisches Erdgassubstitut mit Wasserstoff durch Methanisierung herzustellen. Wasserstoff kann importiert werden oder mit Biomasse, durch Dampfreformierung oder Elektrolyse hergestellt werden.

Das Referenz-Szenario (ISE Ref) untersucht die Transformation des Energiesystems, ohne ein ausgeprägtes gesellschaftliches Verhalten hinsichtlich Akzeptanz für Veränderungen oder ein geändertes Konsumverhalten anzunehmen.

Die maximale Sanierungsrate steigt im ISE Ref-Szenario über den Betrachtungszeitraum von 1 % auf 3 % an, durchschnittlich beträgt die Sanierungsrate von 2020 bis 2050 1,4 %. In der dezentralen Gebäudewärme ist die Anzahl der jährlich neuinstallierten Wärmepumpen auf 85 % der Neuinstallationen begrenzt.

Die Prozesswärmenachfrage nimmt aufgrund technologischer Neuerungen und Nutzung von Effizienzpotenzialen kontinuierlich um 0,5 % pro Jahr ab.

Im Szenario Beharrung (ISE Beh) wird angenommen, dass die Bevölkerung nur eingeschränkt zum Umstieg auf neue Technologien bereit ist, sondern auf der Nutzung konventioneller Technologien beharrt. Dies bedeutet eine deutliche Verzögerung für die Verbreitung neuer Technologien. Die jährlichen Neuinstallationen von Wärmepumpen werden auf 20 % der neuinstallierten Heizungsanlagen begrenzt.

Die energetische Sanierungsrate von Gebäuden beträgt konstant 1 %.

Die Prozesswärmenachfrage nimmt aufgrund technologischer Neuerungen und Nutzung von Effizienzpotenzialen kontinuierlich um 0,5 % pro Jahr ab.

Große Infrastrukturen wie Übertragungsnetze oder Windenergieanlagen bedürfen Genehmigungsverfahren und öffentlicher Akzeptanz der (lokalen) Bevölkerung, um flächendeckend umgesetzt zu werden. Im Szenario Inakzeptanz (ISE Inakz) wird davon ausgegangen, dass der Infrastrukturausbau durch gesellschaftlichen Widerstand deutlich geringer ausfällt, als dies in einer kostenoptimalen Entwicklung geschehen würde.

Die durchschnittliche Sanierungsrate beträgt ähnlich dem Referenz-Szenario 1,5 %.

Die Prozesswärmenachfrage nimmt aufgrund technologischer Neuerungen und Nutzung von Effizienzpotenzialen kontinuierlich um 0,5 % pro Jahr ab.

Im Szenario Suffizienz (ISE Suf) wird angenommen, dass in der breiten Öffentlichkeit eine Bereitschaft zu Verhaltensänderungen besteht, die zu einer wesentlichen Reduktion des Energiebedarfs führen. Entsprechend ändern sich die Werte gegenüber des Referenz-Szenarios:

Die durchschnittliche Sanierungsrate über den gesamten Untersuchungszeitraum beträgt 1,9 %. Im Jahr 2050 beträgt die minimal mögliche Sanierungsrate 2 %, die maximale 3 %.

Die Nachfrage nach industrieller Prozesswärme sinkt bis 2050 kontinuierlich um 0,75 % pro Jahr.

4.2.3. Fraunhofer IEE: Entwicklung der Gebäudewärme und Rückkopplung mit dem Energiesystem in -95 % THG-Klimazielszenarien (Gerhardt et al. 2019)

Der Teilbericht im Rahmen des Projektes Transformationspfade im Wärmesektor „Entwicklung der Gebäudewärme und Rückkopplung mit dem Energiesystem in -95 % THG-

Klimazielszenarien“ des Fraunhofer Instituts für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE) wurde im Auftrag des BMWi erstellt und im Februar 2019 veröffentlicht.

In der Studie wird die Dekarbonisierung des Gebäudebestands in Deutschland in Rückkopplung mit dem gesamten Energiesystem bewertet. In einem technologieneutralen Optimierungsverfahren wird der Erzeugereinsatzmix nach den CO₂-Vermeidungskosten ermittelt und vom bestehenden regulatorischen Rahmen abstrahiert. Die Energiesystemkosten unter Einhaltung der Klimaziele (-95 % THG-Reduktion im Jahr 2050; -66 % als Sektorziel für Gebäudewärme 2030) werden unter verschiedenen Bedingungen minimiert. Der Gebäudewärmebereich wird in Rückkopplung mit dem gesamten Energiesystem unter Berücksichtigung der zunehmend wetterabhängigen Wind- und PV-Stromerzeugung und Power-to-X (PtX)-Importmöglichkeiten aus globalen Vorzugsregionen für erneuerbare Energien modelliert.

Es wird ein restriktives nationales Biomassepotenzial gemäß 95 %-Szenario aus der Studie Klimaschutzszenario 2050 von insgesamt ca. 314 TWh (Anbaufläche ca. 1,5 ha) angenommen. Biomasseimporte werden nicht betrachtet.

In vier 2050-Szenarien werden die Sensitivitäten des Wärme- und Kältemarktes für den Ausstieg aus der dezentralen Biomassenutzung sowie für die Gebäudesanierung untersucht und dargestellt. Bei dem langfristigen Ausstieg aus der dezentralen Biomassenutzung (ExitBio-Szenarien) verschiebt sich die energetische Nutzung der Biomasse in der Industrie und Fernwärme, während in den Bio-Szenarien die Biomasse weiterhin zur dezentralen Gebäudewärmeerzeugung genutzt wird.

Die Sanierungsraten sind keine Modelleingangsgrößen, stattdessen werden die Reduktionen der Endenergiebedarfe im Fall von moderater oder hoher Sanierung festgelegt.

Folgende vier Szenarien mit unterschiedlichen Kombinationen wurden modelliert:

- IEE Mod Bio: moderate Sanierung und Beibehaltung dezentraler Biomassenutzung
- IEE Mod ExitBio: moderate Sanierung und Ausstieg aus dezentraler Biomassenutzung
- IEE San Bio: hohe Sanierung und Beibehaltung dezentrale Biomassenutzung
- IEE San ExitBio: hohe Sanierung und Ausstieg aus dezentraler Biomassenutzung

In zwei weiteren Szenarien werden für das Zieljahr 2030 die kostenoptimierte Energiesysteme mit dem Schwerpunkt dezentrale Biomassenutzung im Wärmesektor modelliert:

- IEE 30 Bio: Beibehaltung dez. Biomassenutzung mit dem Zieljahr 2030
- IEE 30 ExitBio: Ausstieg aus dez. Biomassenutzung mit dem Zieljahr 2030

Im Gebäudewärmebereich werden 8 Wohngebäudetypen und 4 Nichtwohngebäude abgebildet; der Prozesswärmebedarf wird in drei Kategorien anhand von Temperaturbereichen modelliert.

Die Kosten für fossile Energieträger werden basierend auf dem World Energy Outlook 2017 angenommen: Im Jahr 2050 betragen diese (ohne CO₂-Preis) für Öl 35 €/MWh, Erdgas 24 €/MWh, Steinkohle 8 €/MWh, Diesel 56 €/MWh und Benzin 57 €/MWh.

Langfristig ergibt sich ein CO₂-Preis von 311 €/t als Grenzkosten gegenüber PtL-Importkosten (Heizöl/Diesel) von 118 €/t.

4.2.4. Rescue: Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität (Purr et al. 2019)

Die Studie „Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität“, auch unter dem Namen Rescue-Studie bekannt, wurde im Rahmen des gleichnamigen Projektes durch das Umweltbundesamt erstellt und im November 2019 veröffentlicht. Der Hintergrund und Zweck des

Projektes war es, die Abhängigkeiten und Rückkopplungen zwischen Rohstoffnutzung und Klimaschutz mit einem systemischen Ansatz zu erforschen.

In der Rescue-Studie werden die in dem Energiekonzept 2010 der Bundesregierung und die im Klimaschutzplan (2016) festgelegten Klimaziele als Zielszenarien modelliert. Alle Szenarien erreichen eine Treibhausgasreduktion um 95 % ggü. 1990. Im gleichen Zuge sollen auch konkrete Ziele im Bereich der nachhaltigen Ressourcennutzung eingehalten werden, die im Deutschen Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) festgelegt sind. In diesem Strategieprogramm wird beschrieben, dass die wirtschaftliche Entwicklung von der Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen langfristig entkoppelt werden soll. ProgRess betrachtet die gesamte Wertschöpfungskette zur Steigerung der Materialeffizienz und zur absoluten Reduktion der Inanspruchnahme von fossilen, mineralischen und biotischen Rohstoffen. Der Leitindikator zur Messung des Fortschritts ist die Gesamtrohstoffproduktivität, die den sparsamen und effizienten Einsatz von Rohstoffen misst. Auch Aspekte der Flächennutzung spielen in der Schonung natürlicher Ressourcen eine Rolle, hier wird in der Rescue-Studie auf die in der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung (2016) genannten Ziele Bezug genommen.

Vorherige Studien zeigten bereits, dass die weitestgehende Treibhausgasneutralität in Deutschland bis zum Jahr 2050 technisch realisierbar ist. In der Rescue-Studie werden in einer systemischen Vorgehensweise erstmals der Klima- und Ressourcenschutz gemeinsam über die Anwendungsbereiche Strom, Wärme, Verkehr, Industrie, Landwirtschaft, betrachtet. Die Entwicklungspfade bis zum Jahr 2050 werden für sechs Zielszenarien aufgezeigt, die unterschiedliche Entwicklungsoptionen umfassen (z. B. Lebensstiländerung oder Wirtschaftswachstum).

Die folgenden Szenarien werden modelliert (Überblick s. Tab. 4):

- RES 1: GreenEe1-Szenario
- RES 2: GreenEe2-Szenario
- RES Late: GreenLate-Szenario
- RES Me: GreenMe-Szenario („Material efficiency“)
- RES Life: Green-Life-Szenario
- RES Sup: GreenSupreme-Szenario

Den Szenarien wird ein langfristiger Bevölkerungsrückgang bei schwacher Einwanderung und niedriger Geburtenrate (1,4) unterstellt. Die Flächenneuanspruchnahme aller Szenarien wird bis 2050 auf netto Null reduziert.

Tab. 4: Überblick zu den Szenarien der Rescue-Studie. Darstellung übernommen von Purr et al. (2019).

	RES 1 und 2	RES Late	RES Me	RES Life	RES Sup
Ambitionsniveau der Klimaschutzanstrengungen im Transformationspfad (2030 und 2040)	Hoch	Mittel	Hoch	Hoch	Sehr hoch
Endenergiebedarf	Niedrig	Hoch	Niedrig	Sehr niedrig	Sehr niedrig
Rohstoffinanspruchnahme	Mittel	Hoch	Niedrig	Niedrig	Niedrig
Materialeffizienz	Hoch	Mittel	Sehr hoch	Hoch	Sehr hoch
Änderungen der Verhaltensweise	Mittel	Mittel	Mittel	Sehr hoch	Sehr hoch

Für die Biomassenutzung gelten in allen Szenarien starke Restriktionen. Die Flächeninanspruchnahme von Anbaubiomasse und die negativen Auswirkungen auf Wasser, Boden,

Biodiversität und Naturschutz werden als unvertretbar erachtet. Daher gilt die Bedingung, dass ab 2030 keine Biomasse für energetische Zwecke mehr angebaut wird. Die energetische Nutzung von Waldrestholz ist in allen Szenarien stark rückläufig und findet ab 2050 nicht mehr statt.

In allen Szenarien wird 2050 ein System erreicht, in dem durch Sektorkopplung mittels PtX fossile Energieträger vollständig durch erneuerbare Energien ersetzt werden. Aufgrund der geringen Akzeptanz in der Bevölkerung wird die CCS-Technologie nicht als Bestandteil der nachhaltigen Energieversorgung berücksichtigt.

In den Szenarien GreenEe1 und GreenEe2 (hier: RES 1 und RES 2) werden Energieeffizienzpotenziale über alle Anwendungsbereiche hinweg erschlossen. Klima- und Ressourcenschutz als gemeinschaftliches Verständnis wächst und spiegelt sich in den politischen Rahmenbedingungen wider. International setzt sich dieses Verständnis ebenfalls durch, wenn auch etwas langsamer. Im RES 1-Szenario steigert die deutsche Industrie ihre Produktionskapazitäten kontinuierlich und Exporte steigen weiter an. Im RES 2-Szenario hingegen erfolgt ein ausgeglichener globaler Handel mit national rückläufigen Produktionskapazitäten. Durch die steigende Güterqualität und Innovationen hält das Wirtschaftswachstum an und ist eher qualitativer als quantitativer Art.

Die Energieversorgung im Jahr 2050 beruht vollständig auf erneuerbaren Energien. In der Industrie wird die Prozesswärme wo technisch möglich auf strombasierte Erzeugung umgestellt (PtH). Der Bedarf an Gebäudewärme reduziert sich bis 2050 durch Sanierungen stark (Sanierungsrate von 2020 bis 2050: 2,6 %) und wird vor allem durch effiziente Wärmepumpen und Wärmenetze gedeckt.

Im Szenario RES Late erfolgt ein verzögerter Anstieg des Ambitionsniveaus bei der Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen. Durch das verspätete Handeln müssen die erforderlichen Maßnahmen und Investitionen in einem kürzeren Zeitraum realisiert werden. Um das 95 %-Ziel zu erreichen, sind enorme strukturelle Änderungen verbunden mit hoher Investitionsbereitschaft gegen Ende der ersten Jahrhunderthälfte nötig. In Anwendungsbereichen mit kurzen Erneuerungszyklen und Bereichen mit hohen Investitionsanreizen können hohe Durchdringungen systemisch effizienter Techniken eher realisiert werden. In weiten Bereichen werden die Einführungen neuer Technologien allerdings verschlafen, sodass der Bedarf an importierten, regenerativ erzeugten Energieträgern erhöht ist. Im Bereich der Gebäudewärme sind noch konventionelle dezentrale Heiztechniken im Einsatz. Die geringe Sanierungsrate bei RES Late von 1,6 % führt zu höheren Endenergiebedarfen als in den RES 1- und RES 2-Szenarien.

In dem Material efficiency-Szenario RES Me wird neben der Energieeffizienz die Rohstoffeffizienz über alle Anwendungsbereiche hinweg fokussiert. In vielen Bereichen stimmt dieses Szenario mit dem RES 2-Szenario überein. Zusätzlich werden im Me-Szenario in der Energieversorgung vor allem Techniken mit geringem Primärrohstoffbedarf und langlebige Bauteile eingesetzt. Das ökologisch-technische Recyclingpotenzial wird voll ausgeschöpft. In der Prozesswärmebereitstellung in der Industrie wird in erster Linie auf PtH gesetzt. Im Gebäudebereich setzen sich u. a. Holzbauweisen, Dämmmaterialien aus natürlichen Rohstoffen und materialeffiziente Fenster durch. Eine Sanierungsrate von 2,6 % und eine relativ konstante Wohnfläche sorgen für einen niedrigen Endenergiebedarf im Zieljahr.

Das Szenario RES Life ist das weiterentwickelte RES 2-Szenario, das durch den Willen jedes Einzelnen für eine ambitionierte und umweltbewusste Lebensweise geprägt ist. Bereits heute erkennbare Trends einer nachhaltigen Lebensweise gehen schnell in den Mainstream über. Förderpolitische und legislative Maßnahmen wirken unterstützend, ohne dass sie als Zwang von oben angesehen werden. Einzelne Branchen vollziehen durch die Digitalisierung

Umstrukturierungen. Die Dekarbonisierung der Prozesswärmebereitstellung erfolgt beispielsweise durch PtX-Technologien.

Es setzen sich modulare Gebäudebauweisen durch, die eine flexible Nutzung der Wohnfläche ermöglichen. Zudem finden Formen des gemeinschaftlichen Wohnens höheren gesellschaftlichen Zuspruch, sodass Mehrfamilienhäuser im Gebäudebestand zunehmen und sich die absolute Wohnfläche leicht reduziert. Die Flächenneuanspruchnahme wird bis zum Jahr 2050 auf null reduziert. Mit einer Sanierungsrate von 2,8 % besteht im Zieljahr 2050 ein sehr geringer Endenergiebedarf.

Das Szenario RES Sup zeichnet sich durch ein von Beginn an ausgeprägtes und ambitioniertes gemeinschaftliches Verständnis zur Umsetzung von Klima- und Ressourcenschutz aus. Schnell integrierte umweltpolitisch verursachergerechte Rahmenbedingungen setzen frühzeitig Anreize über alle Anwendungsbereiche hinweg, sodass im Zeitraum bis 2040 eine deutliche Treibhausgasreduktion erreicht wird.

Die Gebäudestruktur ändert sich bis zum Jahr 2050 maßgeblich. Durch ambitionierte Neubaustandards und Sanierungen (Sanierungsrate 2,8 %) ist der Endenergiebedarf für Gebäudewärme sehr gering.

4.2.5. BfN: Naturverträgliche Energieversorgung aus 100 % erneuerbaren Energien 2050 (Walter et al. 2018)

Die Studie „Naturverträgliche Energieversorgung aus 100 % erneuerbaren Energien 2050“ wurde im Auftrag des Bundesamts für Naturschutz (BfN) erstellt. Die im Jahr 2018 veröffentlichte Studie legt den Fokus auf die naturschutzfachlichen und raumplanerischen Aspekte der Energiewende. Die Raumwirksamkeit des notwendigen Ausbaus von EE-Anlagen wird in der Potenzialermittlung berücksichtigt. Außerdem werden Lösungsansätze aufgezeigt, wie Naturschutz und Erneuerbare Energien vereinbar sind.

Die Studie ermittelt basierend auf den Raumwiderständen verschiedener Technologien die mensch- und naturverträglichen Stromertragspotenziale in drei Szenarien. Die Szenarien unterscheiden sich durch die angenommenen Naturschutzziele und technologischen Weiterentwicklungen bis zum Zieljahr 2050.

In dieser Metaanalyse wird das Szenario II (BfN 2) verwendet, in dem bereits absehbare Entwicklungen im Bereich der Bereitstellungstechnologien als zukünftiger Standard angenommen werden. Ziele des Naturschutzes wie beispielsweise die Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt und zur Erweiterung des Schutzgebietsnetzes werden als umgesetzt berücksichtigt.

Es wird bis zum Jahr 2050 eine Bevölkerungsdegression von rund 12 % gegenüber 2012 angenommen. Die Wirtschaftsleistung wird bis 2050 um 48 % steigen, eine vollständige Entkopplung der Wirtschaftsleistung vom Primärenergiebedarf wird nicht angenommen. Die Bilanzgrenzen der Modellierung umschließen Deutschland. In der Modellbildung werden keine Energieimporte oder -exporte berücksichtigt.

Die Studie nimmt eine Sanierungsrate im Gebäudesektor von 2,6 % an, sodass der gesamte Gebäudebestand bis 2050 saniert ist und der Endenergiebedarf für Gebäudewärme 2050 nur noch rund ein Drittel des Bedarfs im Jahr 2012 beträgt.

Neben dem Stromsektor und seiner Raumwirksamkeit wurden in der BfN-Studie auch die Sektoren Haushalte, GHD, Industrie und Verkehr berücksichtigt. Die Modellierung der Wärmeerzeugung steht nicht im Fokus der Studie. Die Anteile verschiedener Technologien an der Wärmeerzeugung wird in der BfN-Studie nicht als Modellierungsergebnis berechnet, sondern geht als Eingangsgröße in das Modell ein. Vor den Berechnungen wird exogen festgelegt, dass der gesamte Wärmebedarf im Gebäudesektor durch Wärmepumpen gedeckt wird. Dies bedeutet,

dass in der BfN-Studie nicht wie in anderen Modellen die Anteile der jeweiligen Wärmeerzeuger modelliert und in Optimierungsvorgängen bestimmt werden.

Die Prozesswärme im Industriesektor wird teilweise durch die zur Verfügung stehenden biogenen Brennstoffe bereitgestellt. Es wird angenommen, dass die Residuallast im Industriesektor durch direkte Stromnutzung sowie durch strombasierte synthetische Brennstoffe gedeckt wird.

Biomasse steht ausschließlich in Form von Rest- und Abfallstoffen zur Verfügung. Die aus naturschutzfachlicher Sicht unbedenklichen biogenen Energieträger umfassen Reste aus der land- und forstwirtschaftlichen Nutzung, Industrie- und Altholz, Klärschlamm, Klärgas und Abfälle aus Gewerbe, Industrie und Siedlungen. Insgesamt beträgt das unbedenklich energetisch verwertbare Biomassepotenzial rund 60 TWh, vorwiegend soll dieses in den Sektoren Industrie und Verkehr eingesetzt werden. Die Aufteilung der Biomassenutzung zwischen den Sektoren Industrie und Verkehr wurde in der Studie nicht bestimmt. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die verfügbare Biomasse gleichmäßig den gegebenen Brennstoffbedarfen entsprechend auf die Sektoren Verkehr und Industrie verteilt wird (vgl. Tab. 5). Biomasse deckt demnach mit ca. 33 TWh rund 8 % des gesamten Prozesswärmebedarfs.

Tab. 5: Für die Metaanalyse abgeleitete Annahmen bzgl. des Biomasseeinsatzes im BfN-Szenario, basierend auf dem projizierten Endenergiebedarf im Jahr 2050: Variante 2: Elektrifizierung 50 % und Gebäudesanierung 2,64 % pro Jahr.

	Prozesswärme Industrie	Verkehr	Insgesamt
Bedarf Brennstoffe (gegeben)	173 TWh	142 TWh	315 TWh
Davon Biomasse (Annahme¹)	33 TWh	27 TWh	60 TWh

Das verwendete Modell ist GIS-basiert und ermittelt die Stromertragspotenziale auf für den Naturschutz unkritischen Flächen (Flächen mit geringem Raumwiderstand).

Die Modellierung erfolgt nicht nach volkswirtschaftlichen Kriterien. Die Szenarien verstehen sich vielmehr als besonders naturschutzkonforme Varianten eines Spektrums von Entwicklungsmöglichkeiten bis 2050, die jedoch nicht nach sozio-ökonomischen Kriterien optimiert sind. Daher bleiben in der BfN-Studie die Entwicklungen der Brennstoffpreise oder CO₂-Zertifikatspreise unberücksichtigt.

4.2.6. DBFZ: Systemlösungen für Bioenergie im Wärmesektor im Kontext zukünftiger Entwicklungen (Jordan et al. 2019)

Im Rahmen des Projekts „Bioplan W – Systemlösungen für Bioenergie im Wärmesektor im Kontext zukünftiger Entwicklungen“ wurde die Studie „Future competitive technologies in the German heat sector: Findings from an economic optimization approach“ im Jahr 2019 veröffentlicht.

Die Studie, die in Zusammenarbeit des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung und des Deutschen Biomasseforschungszentrums (DBFZ) erstellt wurde, untersucht unterschiedliche biomassebasierte Technologien zur Wärmeerzeugung und deren Potenziale in verschiedenen Subsektoren der Wärmeversorgung. Das Ziel ist herauszufinden, in welchen Sektoren die Technologien auf Basis biogener Brennstoffe unter bestimmten Voraussetzungen volkswirtschaftlich am kostengünstigsten eingesetzt werden können.

¹ In der Modellierung der Studie wurde nicht definiert, welcher Anteil der Biomasse in die Sektoren Industrie bzw. Verkehr fließt. Für die hier durchgeführte Analyse wird daher die Annahme getroffen, dass keiner der Sektoren „bevorzugt“ mit Biomasse versorgt wird, sondern jeweils der gleiche Biomasseanteil (ca. 19 %) am Brennstoffbedarf in den beiden Sektoren genutzt wird.

In der DBFZ-Studie beträgt die THG-Reduktion im Jahr 2050 95 % im Vergleich zu 1990. Die Entwicklung des CO₂-Preises (im Jahr 2050: 200 €/t) sowie der Brennstoffkosten basiert auf dem Klimaschutzszenario 2050 „KS95“ des Öko-Instituts. Der Stromsektor wird nicht als Teil der DBFZ-Studie modelliert, sondern über die Informationen zu Strompreisen und den Emissionsfaktoren der Modellierung des „KS95“ eingebunden. Als einziges Steuerungsinstrument wird die CO₂-Bepreisung im EU-ETS berücksichtigt, die EEG-Umlagen werden nicht einbezogen.

Die Biomasse für energetische oder stoffliche Nutzung wird in der DBFZ-Studie begrenzt. Zwei Szenarien der Studie definieren die Obergrenzen des Biomassepotenzials, das dem Wärmesektor zur Verfügung steht:

- DBFZ Maj (Szenario Case a): hohes Biomassepotenzial steht zur Wärmeerzeugung zur Verfügung (durchschnittlich ca. 180 TWh; 1,5 Mio. ha Fläche);
- DBFZ Min (Szenario Case b): kontinuierliche Reduktion des verfügbaren Biomassepotenzials im Wärmesektor bis 2050, sehr geringes Potenzial 2050 (ca. 30 TWh/a), keine Flächennutzung für Biomasse im Jahr 2050.

Die Potenziale für Anbaubiomasse und biogene Reststoffe sind aufgrund dieser Vorgaben für jedes Jahr bis 2050 festgelegt. Innerhalb dieser oberen Szenariogrenzen kann die Art der Biomasse aus insgesamt 20 biogenen Anbau- und Reststoffen frei gewählt werden. Die Preisentwicklung der biogenen Stoffe wird in Abhängigkeit des Weizenpreises modelliert. Im- oder Exporte von Biomasse werden im Modell nicht abgebildet, um eine Verlagerung der Naturschutzkonflikte ins Ausland auszuschließen.

Insgesamt 42 sowohl fossile als auch erneuerbare Technologiesysteme zur Wärmeerzeugung werden in der Modellierung berücksichtigt. Neben monovalenten, auf einer Energiequelle basierenden Systemen finden auch hybride Systeme Berücksichtigung, wie beispielsweise Erdgaskessel und Solarthermie. Heizölbasierte Wärmeerzeugung wird in der Modellbildung nicht abgebildet. Den 19 Subsektoren des Wärmemarktes werden jeweils verschiedene Sets von Erzeugungsoptionen zugeordnet.

Durch die Modellierung von Hybridsystemen erfolgt in der DBFZ-Studie auch die Darstellung der Ergebnisse in hybriden Kategorien (z. B. ein Systemverbund aus Solarthermie und Scheitholzofen). Um die Ergebnisse dennoch mit denen der anderen Studien vergleichen zu können, wurden für die Umrechnung in Einzelkategorien (Solarthermie respektive Holz bzw. feste Biomasse) die Erzeugungsanteile der Technologien zugrunde gelegt, die in den Modellierungen der Systeme angewendet wurden.

In der Modellierung wird der Wärmesektor in 19 Subsektoren aufgeteilt, die industrielle Prozesswärme auf unterschiedlichen Temperaturniveaus, Fernwärme sowie Wohn- und Nichtwohngebäude unterschiedlicher Größe und Art umfassen.

Die Sanierungsrate beträgt im Zeitraum von 2020 bis 2050 durchschnittlich ungefähr 2 %, höhere Sanierungsraten sind eher ab 2030 zu erwarten.

Die Modellierung umfasst ausschließlich den Wärmesektor, eine Modellierung und Optimierung des gesamten Energiesystems wird in der DBFZ-Studie nicht beschrieben.

Dadurch erfährt das Modell einerseits eine gewisse Begrenzung, da die Wärmeversorgung isoliert und ohne Berücksichtigung der Wechselwirkungen mit den anderen Sektoren betrachtet wird. Andererseits ist dadurch eine sehr detaillierte Modellierung der Wärmeversorgung möglich mit einer Vielzahl von Verbrauchern und Erzeugungssystemen, die u. a. 19 unterschiedliche Biomassearten beinhalten (sowohl Anbau als auch Reststoffe, z. B. Scheitholz, Miscanthus Pellets, Gülle/Mist).

Die geografischen Bilanzierungsgrenzen der Modellierung umfassen Deutschland. Es wird angenommen, dass die anderen europäischen Länder ähnlich ambitionierte Klimaziele verfolgen wie Deutschland. Die wirtschaftliche Entwicklung unterliegt keinen weiteren Schwerpunkten, es wird lediglich angenommen, dass die inländische Industrieproduktion in Deutschland bleibt und Importe nicht weiter ansteigen. Die CCS-Technologie bleibt in der Modellbildung unberücksichtigt.

4.2.7. Prognos: Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050 (Kemmler et al. 2020)

Die im Auftrag des BMWi erstellte Studie „Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050“ wurde im März 2020 veröffentlicht. Die Studie wurde in Zusammenarbeit der Prognos AG, des Fraunhofer ISI, der GWS und des IINAS erstellt.

Die Studie untersucht die Wirkung des Klimaschutzprogramms 2030 (KSP), das im September 2019 beschlossen wurde. Dafür wird die Entwicklung von Energieverbrauch und -angebot unter Berücksichtigung der KSP-Maßnahmen mit einem Referenzszenario verglichen. Das Referenzszenario basiert auf den bis Ende 2017 eingeführten politischen Maßnahmen und schreibt die aktuellen Trends fort. In die Metaanalyse geht das Szenario mit Berücksichtigung der KSP-Maßnahmenwirkung mit dem Kürzel PRO 2030 ein.

Die THG-Reduktion beträgt im PRO 2030-Szenario im Jahr 2030 rund 52 % im Vergleich zum Basisjahr 1990.

Im Gegensatz zu den anderen Szenarien, die in der Metaanalyse untersucht werden, ist das THG-Reduktionsziel keine Zielvorgabe, sondern das Simulationsergebnis der Entwicklung unter den Rahmenbedingungen des KSP. Das PRO 2030-Szenario ist somit kein Zielszenario, sondern ein exploratives Szenario.

Der Rohölpreis steigt von 13,4 €/GJ (2020) auf 19,4 €/GJ (2050) an. Auch der Erdgaspreis steigt in diesem Zeitraum von 7,8 €/GJ auf 10,6 €/GJ.

Der CO₂-Zertifikatspreis im EU-ETS beträgt im Jahr 2030 35 €/t und 2050 94 €/t.

Unter den KSP-Maßnahmen, die das PRO 2030-Szenario berücksichtigt, ist auch die Einführung eines nationalen Emissionshandelssystems (nEHS) und die damit verknüpfte Strompreissenkung. Im Brennstoffemissionshandels-Gesetz (BEHG) werden die nationalen CO₂-Preise bis 2026 festgelegt. Für die Modellierung wird angenommen, dass der nationale CO₂-Preis ab dem Jahr 2026 deutlich von 65 €/t auf 180 €/t im Jahr 2030 ansteigt. Die Preiserhöhung der Energieträger infolge des nEHS beträgt im Jahr 2030 bei Erdgas 2,8 ct/kWh und bei Heizöl 3,7 ct/kWh. Eine Abgabe auf Fernwärme erfolgt am Ort der Erzeugung durch den Kraftwerksbetreiber und wird daher in der Modellierung nicht beim Endkunden verortet. Es wird angenommen, dass die Steigerung des CO₂-Preises im nEHS bis 2030 ab 2023 kommuniziert und erwartet wird. Demnach berücksichtigen Akteure die erwartete Preissteigerung bei Investitionsentscheidungen, im Wärmesektor ist dies insbesondere bei Maßnahmen an der Gebäudehülle oder bei Wärmeerzeugungstechnologien relevant, die lange Investitionszeiträume haben.

Der Endkundenstrompreis (endogenes Modellergebnis) sinkt voraussichtlich in einem noch unbekanntem Ausmaß. Dies wird durch die vorgesehene Reduktion der EEG-Umlage für Stromabnehmer erreicht, welche zukünftig aus den Einnahmen der nEHS finanziert werden soll. In den Modellierungen wird eine mittelfristige Reduktion des Strompreises um 3 ct/kWh angenommen.

Weitere relevante in der Modellierung des Szenarios PRO 2030 berücksichtigte Maßnahmen im Gebäudewärmesektor sind die steuerliche Förderung der energetischen

Gebäudesanierung, die Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG), das Einbauverbot monovalenter Heizölkessel ab 2026, die Maßnahmen der Energieeffizienzstrategie 2050 (EffSTRA) sowie der Aus- und Umbau der Wärmenetze (Fortführung des Programms „Wärmenetze 4.0“).

Folgende Maßnahmen aus dem Bereich der Energiewirtschaft werden in die Modellierung einbezogen: Schrittweise Reduzierung der Kohleverstromung, Ausbau der erneuerbaren Energien, Weiterentwicklung und Modernisierung der KWK (Neubau, innovative KWK, Wärmenetze und Speicher) sowie die Umstellung der Wärmenetze auf erneuerbare Energien und unvermeidbare Abwärme.

Das verfügbare nachhaltige Biomassepotenzial wird auf rund 333 TWh/a festgelegt. Zusätzlich besteht ein nachhaltiges Importpotenzial von ca. 83 TWh/a, sodass insgesamt rund 416 TWh nachhaltiger Biomasse aus dem In- und Ausland zur Verfügung stehen.

4.2.8. Unsicherheitsfaktoren bei den Modellierungen

Die Annahmen der Szenarienmodellierungen werden auf Basis der beschriebenen Rahmenbedingungen und Prognosen festgelegt, die zum jeweiligen Zeitpunkt der Erstellung der Studien vorherrschen. Die im folgenden dargestellten Ergebnisse sind daher mit Unsicherheiten behaftet und allenfalls als mögliche Zielpfade zur Zielerreichung zu interpretieren.

Zum einen finden einige Technologien oder Entwicklungen keine Berücksichtigung in den Modellierungen, weil deren Marktreife bis 2050 zum Zeitpunkt der Modellierung unwahrscheinlich erscheint. Zum anderen sind die eingehenden Annahmen mit Unsicherheiten behaftet und können bei einer veränderten Entwicklung bedeutende Änderungen des Zielzustands bewirken.

Ein solcher zentraler Unsicherheitsfaktor ist die Entwicklung der Rohstoffpreise, die kaum belastbar über einen Zeitraum von circa 30 Jahren prognostizierbar ist. Von der Entwicklung hängen sowohl die Einsatzreihenfolge der Technologien zur Wärmeenergieerzeugung bei einer volkswirtschaftlichen Optimierung als auch die Gesamtkosten der Transformation ab. Zudem wird in den Modellierungen nicht berücksichtigt, dass die Summe der betriebswirtschaftlichen Einzelentscheidungen vom volkswirtschaftlich optimierten Gesamtzustand abweichen kann, beispielsweise aufgrund von persönlichen Einstellungen oder für den Einzelakteur nicht komplett vorhersehbarer Preis- bzw. Politikentwicklungen. Die zukünftigen politischen Entwicklungen und damit die eingesetzten Strategien, Ansätze, Maßnahmen und Instrumente in Deutschland sowie im Ausland sind mit großen Unsicherheiten behaftet und haben potenziell große Auswirkungen auf den Wärmesektor.

Auch demografische sowie sozioökonomische Entwicklungen sowie die Entwicklung der Wohnfläche sind mit Unsicherheiten behaftet. Der Endenergiebedarf im Bereich Gebäudewärme kann beispielsweise bei einer Reduktion der Wohnfläche pro Kopf durch flächensparendes Bauen oder neue Wohnkonzepte erheblich verringert werden.

Neuartige Baustoffe sowie Dämmstofftechnologien können ebenfalls eine Reduktion des Endenergiebedarfs bewirken. Dazu gehört beispielsweise sprühbarer Nanoschaum als Dämmstoff, der verbesserte Isolationseigenschaften gegenüber herkömmlichen Dämmstoffen aufweist und durch einfache und günstige Anwendung weite Verbreitung finden könnte.

Insbesondere bei den zukünftig eingesetzten Brennstoffen herrschen Unsicherheiten bezüglich deren verfügbaren Potenzial und Anwendungsmöglichkeiten.

Das angenommene verfügbare Biomassepotenzial ist ein entscheidender Faktor für den Einsatz von Biomasse. Werden höhere Potenziale angenommen, so steigt die Biomassenutzung im Wärmesektor dementsprechend an. Insbesondere eine höhere Beimischung von

Biomethan ins Gasnetz und der verstärkte Einsatz von Biomethan für industrielle Prozesse als Ersatz für Erdgas sind denkbare Entwicklungen bei entsprechenden Anreizen bzw. Vorgaben, die den Erzeugungsmix im Zieljahr 2030 bzw. 2050 erheblich verändern könnten.

Auch die Entwicklung des Einsatzes von Wasserstoff und synthetischem Methan im Wärmesektor ist noch mit gewissen Unsicherheiten behaftet. In vielen der hier vorgestellten Modellierungen werden eher konservative Ansätze gewählt, auch die nationale Wasserstoffstrategie der Bundesregierung (Juni 2020) findet in keiner der untersuchten Studien Berücksichtigung. Sollten Herstellung, Verteilung und Speicherung wettbewerbsfähig werden und verstärkt Anwendungsmöglichkeiten geschaffen werden (Umstellung von Prozessen der industriellen Produktion, etc.), so ist ein deutlich höherer Einsatz synthetischer Gase möglich.

Weitere technologiespezifische Unsicherheiten betreffen beispielsweise CCU- und CCS-Verfahren, bei denen eine Marktreife und Konkurrenzfähigkeit unter aktuellen Bedingungen nicht absehbar ist.

4.3. Entwicklung des Wärme- und Kältemarktes

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Szenarienmodellierungen dargestellt.

Die Resultate der 22 untersuchten Szenarien werden dafür in Diagrammen nebeneinander im zeitlichen Verlauf dargestellt, um eine Visualisierung aller Szenarien auf einen Blick zu ermöglichen. Zudem werden die Bandbreiten der Ergebnisse für die Jahre 2030 und 2050 in Boxplot-Diagrammen statistisch ausgewertet und dargestellt.

Ein Boxplot-Diagramm vermittelt schnell einen Eindruck darüber, in welchem Bereich die Daten liegen und wie sie sich über diesen Bereich verteilen. Es dient der grafischen Darstellung verschiedener robuster Streuungsmaße. Zur Erstellung werden die Daten der Größe nach sortiert. Es werden Minimum und Maximum, unteres und oberes Quartil (Spannbreite zwischen den ersten 25 % und 75 % der Daten) und der Median abgebildet. Zusätzlich wird hier der Mittelwert mit einem Kreuz markiert.

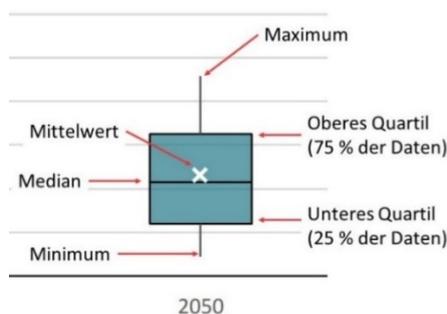


Abb. 4: Grafische Darstellung zur Erläuterung von Boxplot-Diagrammen.

Die in diesem Kapitel dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf den Endenergieverbrauch, da in den untersuchten Studien stets dieser als Bezugsgröße gewählt wurde. Als Endenergie „wird die Verwendung von Energieträgern in einzelnen Verbrauchersektoren bezeichnet, sofern sie unmittelbar zur Erzeugung von Nutzenergie oder für Energiedienstleistungen eingesetzt werden“ (AG Energiebilanzen 2012). Es handelt sich um die Energie, die beim Verbraucher etwa in Form von Brennstoffen, elektrischer Energie oder Fernwärme ankommt und am jeweiligen Zähler z. B. an der Hausübergabestation gemessen wird (BDEW 2015). Für den Naturschutz beispielsweise hat die Endenergie nur eine bedingte Aussagekraft, da aus dieser Größe nicht hervorgeht, was der Primärenergie- bzw. Rohstoffbedarf oder der Flächenbedarf ist.

Die Endenergieträger werden durch den Energiesektor bereitgestellt, indem Primärenergieträger wie Kohle, Roherdgas oder Holz in Kraft- oder Heizwerken, Raffinerien oder Pelletproduktionsfabriken in lieferbare Energieträger zur Wärmeherzeugung umgewandelt werden. Dabei kommt es zu Umwandlungs- sowie Transportverlusten, sodass ein Teil der Primärenergie nicht beim Endverbraucher ankommt. Die Verluste der Umwandlung unterscheiden sich stark in Abhängigkeit der Sektoren bzw. der eingesetzten Erzeugungsanlagen. Im Wärmesektor sind die Umwandlungsverluste deutlich geringer als beispielsweise im Stromsektor, in dem mehr Energie bei der Stromerzeugung in Form von ungenutzter Abwärme verloren geht. Das Verhältnis von Primärenergieverbrauch zu Endenergieverbrauch für den gesamten Wärmesektor liegt bei circa 5:4.²

Sektorenspezifische Energieverbrauchsdaten liegen häufig nur für den Endenergieverbrauch vor, die Umrechnung in den Primärenergieverbrauch kann beispielsweise durch eine Hochrechnung der Endenergieverbrauchsdaten mit Hilfe von Primärenergiefaktoren der Energieeinsparverordnung (EnEV) erfolgen.

Der Primärenergiefaktor (PEF) setzt die eingesetzte Primärenergie ins Verhältnis zur Endenergie. Die Werte der PEF für verschiedene Energieträger werden teilweise in der EnEV sowie in der DIN V 18599-1:2018-09 festgelegt.

Um eine Vergleichbarkeit der vorliegenden Ergebnisse hinsichtlich ihres Rohstoffverbrauchs zu ermöglichen, werden an dieser Stelle für die jeweiligen Energieträger Werte der PEF erläutert. Der Gesamt-PEF setzt sich aus dem erneuerbaren Anteil PEF_e und dem nicht-erneuerbaren Anteil PEF_{ne} zusammen. Für die energetische Bewertung von geschlossenen Systemen (Gebäuden, Fernwärmenetzen, etc.) wird häufig der nicht-erneuerbare Anteil des PEF verwendet. Für den Vergleich der Ressourcenbereitstellung eignet sich jedoch der Gesamt-PEF, da ansonsten die Vergleichbarkeit der Ressourceninanspruchnahme schwierig ist. Beim Holz beispielsweise würde mit dem nicht-erneuerbaren Anteil des PEF von 0,4 die berechnete Primärenergie geringer sein als die bereitgestellte Endenergie.

- Fernwärme/-kälte: Der PEF hängt vom Erzeugungsmix ab. Entweder der PEF wird individuell für das Bezugsnetz berechnet, oder es werden Werte von
 - $PEF_{ne} = PEF_{ges} = 0,7$ (KWK-fossil-basierte Netze) bzw. $PEF_{ne} = 0,0$ und $PEF_{ges} = 0,7$ (KWK-EE-basierte Netze) oder
 - $PEF_{ne} = PEF_{ges} = 1,3$ (Heizwerk-basierte Netze) festgelegt.
 - Die KWK-Erzeugung ist ein Sonderfall, da die eingesetzte Primärenergie den Endenergieformen Strom und Wärme nicht eindeutig zugeordnet werden kann. Es existieren verschiedene Berechnungsmethoden hierfür.
- Biogene Brennstoffe:
 - Biogas: $PEF_{ne} = 0,4$ und $PEF_{ges} = 1,4$
 - Bioöl: $PEF_{ne} = 0,4$ und $PEF_{ges} = 1,4$
 - Holz: $PEF_{ne} = 0,2$ und $PEF_{ges} = 1,2$
- Solarthermie, Tiefe Geothermie, Umgebungswärme und Erdwärme: $PEF_{ne} = 0,0$ und $PEF_e = 1,0$
- Strom (allgemeiner Strommix): $PEF_{ne} = 1,8$ und $PEF_{ges} = 2,8$
- Wärmepumpen: um Wärme bereitzustellen, nutzen Wärmepumpensysteme sowohl Umweltenergie als auch Strom. Das Verhältnis von eingesetztem Strom zu Umweltwärme ist entscheidend für die Berechnung des PEFs. Bei einer Jahresarbeitszahl

² Für das Jahr 2013 (PwC 2015).

von 4 beispielsweise ist das Verhältnis Strom zu Umweltwärme 1:3 und damit $PEF_{ne} = 0,25 * PEF_{ne,Strom} + 0,75 * PEF_{ne,Umweltwärme} = 0,25 * 1,8 + 0,75 * 0,0 = 0,45$. Der analog berechnete PEF_{ges} beträgt in diesem Beispiel 1,45.

- Synthetische Brennstoffe: Der PEF ist noch nicht definiert.

Die Umwandlungseffizienz von Strom in synthetischen Brennstoff beträgt ca. 50 %. Es ist daher für die Erzeugung ungefähr der zweifache Primärenergieeinsatz der Stromerzeugung anzusetzen. Zusätzlich kommen Verluste bei der Speicherung und beim Transport hinzu.

- Abwärme (aus Prozessen), Abfall: $PEF_{ne} = 0,0$ und $PEFe = PEF_{ges} = 1,0$
- Fossile Energieträger:
 - Heizöl, Erdgas Flüssiggas, Steinkohle: $PEF_{ges} = PEF_{ne} = 1,1$
 - Braunkohle: $PEF_{ges} = PEF_{ne} = 1,2$

4.3.1. Endenergieverbrauch Wärme

Der Verbrauch der Endenergie für Wärme wird hier für den Sektor Privathaushalte (PHH) und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) sowie für die Industrie dargestellt.

Der Sektor PHH und GHD umfasst den Energieverbrauch für die Erzeugung und Verteilung von Raumwärme und Warmwasser und wird als Gebäudewärme bezeichnet. Auch die Fernwärme wird in die Definition „Gebäudewärme“ eingeschlossen. Die Streuweite und der mittlere Endenergieverbrauch für Gebäudewärme in den Jahren 2030 und 2050 über alle 22 untersuchten Szenarien ist in Abb. 6 dargestellt.

Die industrielle Prozesswärme ist die Anwendung, auf die im Industriesektor mit gut zwei Dritteln der höchste Energieverbrauch entfällt³. Abb. 5 zeigt die Streuweite sowie den Mittelwert des industriellen Prozesswärmeendenergieverbrauchs aller Szenarien.

In Abb. 6 und Abb. 7 sind jeweils die Werte der einzelnen Szenarien für den Endenergieverbrauch in den Anwendungen Gebäudewärme respektive Prozesswärme dargestellt. Während die Werte für das Jahr 2020 in einem sehr ähnlichen Bereich liegen, nimmt die Differenz zwischen den Szenarien mit fortschreitender Zeit zu. Im Jahr 2050 beträgt der Endenergieverbrauch für Gebäudewärme in den extremen Fällen 658 TWh/a (ISE Ref) bzw. 246 TWh/a (RES Life und Sup).

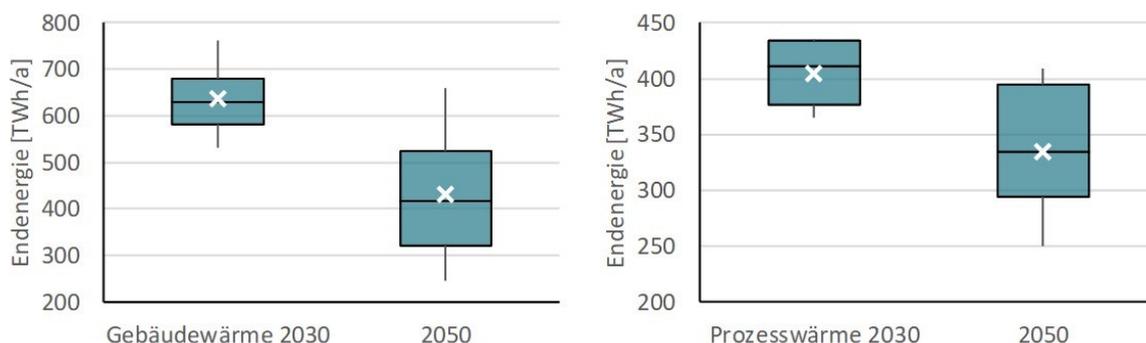


Abb. 5: Bandbreite der Szenarienergebnisse: Endenergie in den Jahren 2030 und 2050.

³ weitere Anwendungen: mechanische Energie, Beleuchtung, IKT, Prozesskälte und Raumwärme und Warmwasser.

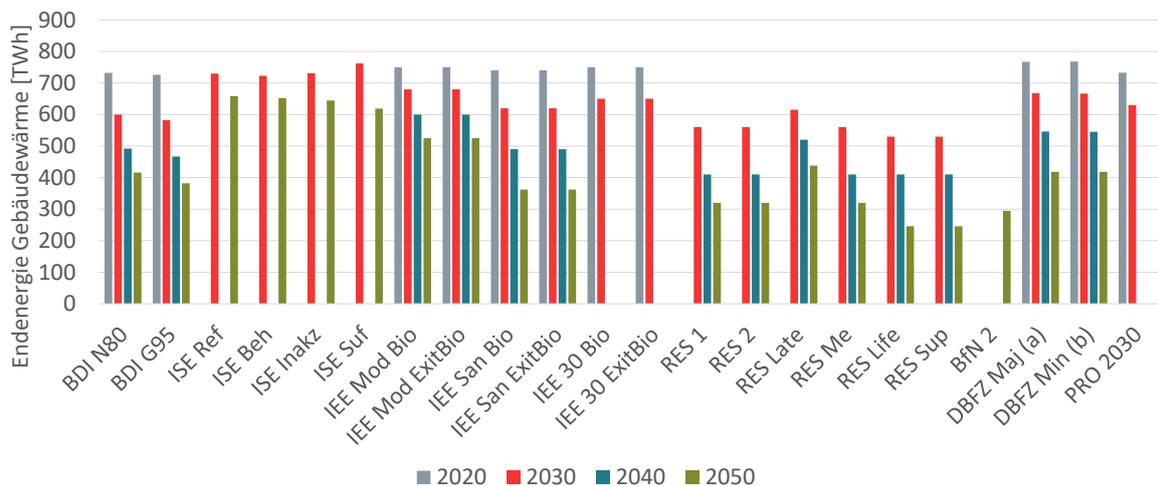


Abb. 6: Entwicklung des Endenergiebedarfs im Bereich Gebäudewärme.

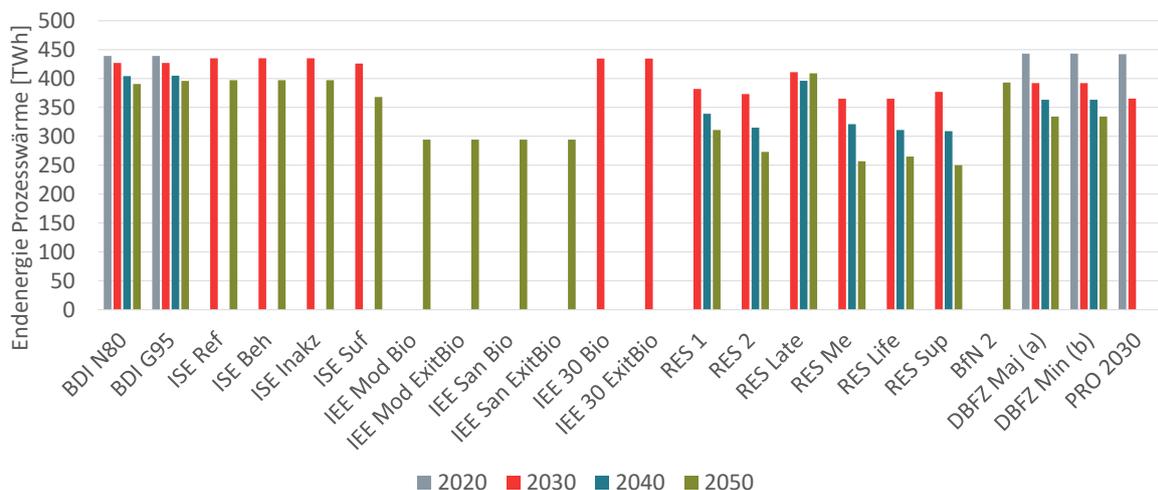


Abb. 7: Entwicklung des Endenergiebedarfs im Bereich Industrielle Prozesswärme.

4.3.2. Leitungsgebundene Wärme (Fernwärme)

Im Wärmesektor lässt sich neben der Kategorisierung nach Energiequellen oder eingesetzten Technologien auch nach der Art der Verteilung unterscheiden. Die Mittelwerte und die Streuung der insgesamt erzeugten Fernwärme in den Jahren 2030 und 2050 sowie der Anteil der Hausanschlüsse, die an ein Fernwärmenetz angeschlossen sind, werden in Abb. 8 dargestellt.

Der Fernwärmeanteil steigt in nahezu allen Szenarien über die Zeitschritte an (s. Abb. 9 und Abb. 10). Die absolut erzeugte Fernwärme hängt auch von den Effizianzorderungen der jeweiligen Szenarien ab. Bei den BDI-Szenarien und ISE-Szenarien (außer ISE Beh) steigt die absolut erzeugte Fernwärmemenge im zeitlichen Verlauf; bei den IEE-Szenarien steigt die Menge bis 2030 an und sinkt ab dann bis 2050 mit fortschreitender Effizienz im Gebäudesektor. In den RES- und DBFZ-Szenarien sinkt die erzeugte Fernwärmemenge über die Zeitschritte. In der BfN-Studie wird die Fernwärmeerzeugung nicht angegeben.

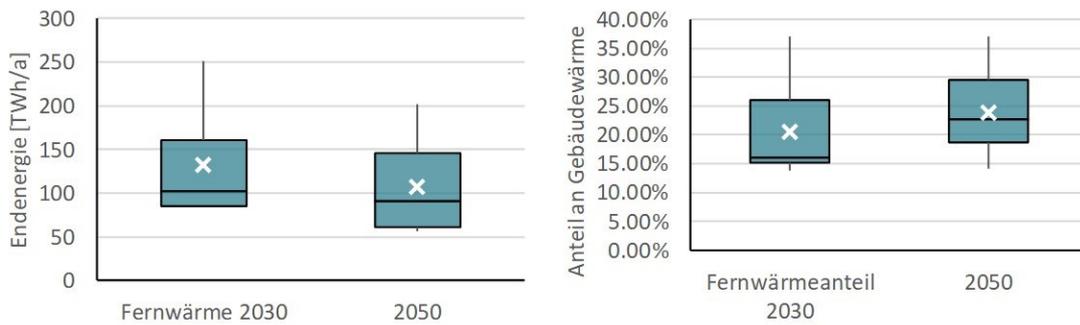


Abb. 8: Bandbreite der Szenarienergebnisse: Fernwärmeerzeugung absolut und Fernwärmeanteil in den Jahren 2030 und 2050.

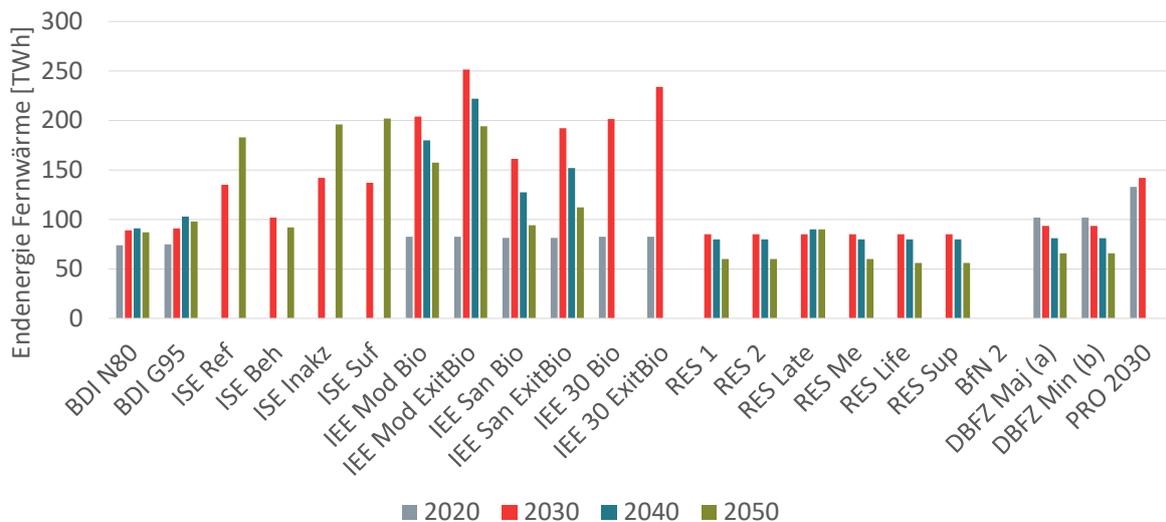


Abb. 9: Entwicklung der Fernwärmeerzeugung (absolut).

Für die industrielle Prozesswärmeerzeugung spielt die Fernwärme nur eine untergeordnete Rolle. Ausschließlich in den BDI- sowie in den Prognos-Szenarien wird diese modelliert.

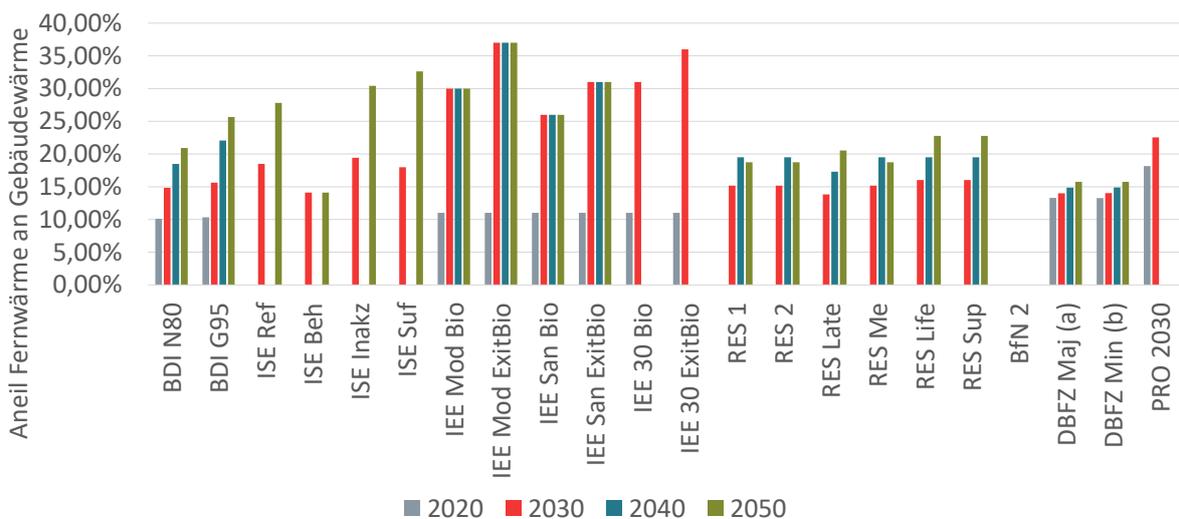


Abb. 10: Entwicklung des Fernwärmeanteils an der Gebäudewärme.

Die Erzeugung der Fernwärme wird in fast allen untersuchten Studien aufgeschlüsselt in die verschiedenen Technologien oder Energiequellen. Die Anteile der Fernwärmeerzeugungstechnologien fließen in die Kategorie Gebäudewärme ein. Lediglich in der ISE-Studie wird die

Fernwärmeerzeugung nicht aufgeschlüsselt. In den folgenden Abschnitten sind bei der ISE-Studie die Fernwärmeanteile daher nicht in der Kategorie Gebäudewärme enthalten.

4.3.3. Relevante Technologien im zukünftigen Wärmesektor

In diesem Abschnitt werden die Relevanz der Erzeugungstechnologien bzw. Brennstoffe in den Szenarien dargestellt. Um die relevantesten Technologien darzustellen, die den Modellierungen zufolge die Gebäudewärme- und Prozesswärmeerzeugung im Zieljahr 2050 bestimmen, werden hier die Durchschnittswerte aller Szenarien⁴ dargestellt.

Für die Erzeugung von Gebäudewärme im Jahr 2050 ist die Wärmepumpe die mit Abstand relevanteste Technologie (vgl. Abb. 11). Im Durchschnitt wird insgesamt 273 TWh bzw. 71 % der gesamten Endenergie mittels Wärmepumpen bereitgestellt. Die Kategorie „Wärmepumpe“ beschreibt die Wärmeerzeugung auf Basis von Niedertemperaturwärmequellen (Umweltwärme wie Luft, Oberflächengewässer, oberflächennahe Geothermie) sowohl dezentral als auch zentral zur Erzeugung von Fernwärme.

Mit deutlichem Abstand folgen als nächste relevante Technologien die Solarthermie, PtG bzw. synthetische Brennstoffe (jeweils durchschnittlich ca. 25 TWh), die direkte Nutzung von Strom zur Wärmeerzeugung (durchschnittlich ca. 24 TWh), Biomasse (durchschnittlich ca. 21 TWh), Erdgas (durchschnittlich ca. 16 TWh) und Abfall (durchschnittlich ca. 10 TWh).

Zu den weniger eingesetzten Technologien gehört die Tiefengeothermie (durchschnittlich ca. 7 TWh). Nahezu unbedeutend für die Gebäudewärmeerzeugung im Jahr 2050 sind Heizöl und Kohle mit jeweils durchschnittlich ca. 0,5 TWh.

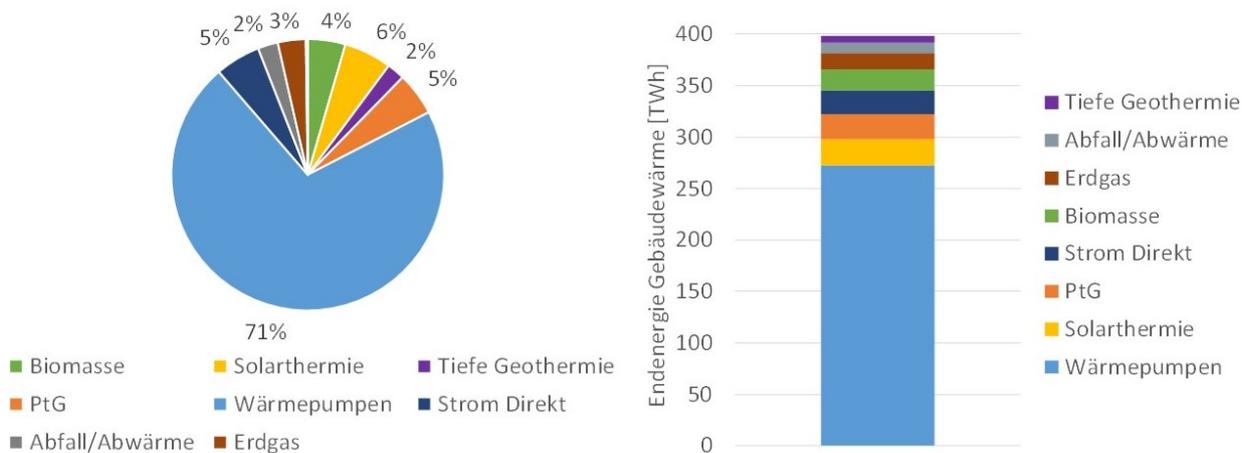


Abb. 11: Gebäudewärme 2050 (inkl. Fernwärme), Durchschnitt aller Szenarien mit angegebenen Werten für das Jahr 2050.

Für die Prozesswärmeerzeugung im Jahr 2050 (s. Abb. 12) sind die drei relevantesten Technologien die Stromdirektnutzung (durchschnittlich ca. 113 TWh), PtG (durchschnittlich ca. 94 TWh) und die Biomassenutzung (durchschnittlich ca. 62 TWh).

Es folgen ungefähr gleichauf Kohle (durchschnittlich ca. 33 TWh) und Wärmepumpen (durchschnittlich ca. 30 TWh).

Erdgas (durchschnittlich ca. 18 TWh) und Solarthermie (durchschnittlich ca. 4 TWh) spielen eine eher untergeordnete Rolle.

⁴ Mit Ausnahme der Szenarien IEE 30 Bio, IEE 30 ExitBio und PRO 2030, die jeweils nur bis zum Jahr 2030 modellieren.

Nicht-erneuerbare Abfälle und Abgase (durchschnittlich ca. 1,7 TWh) und Solarthermie (durchschnittlich ca. 0,07 TWh) sind am wenigsten bedeutend für die Prozesswärmeerzeugung im Jahr 2050.

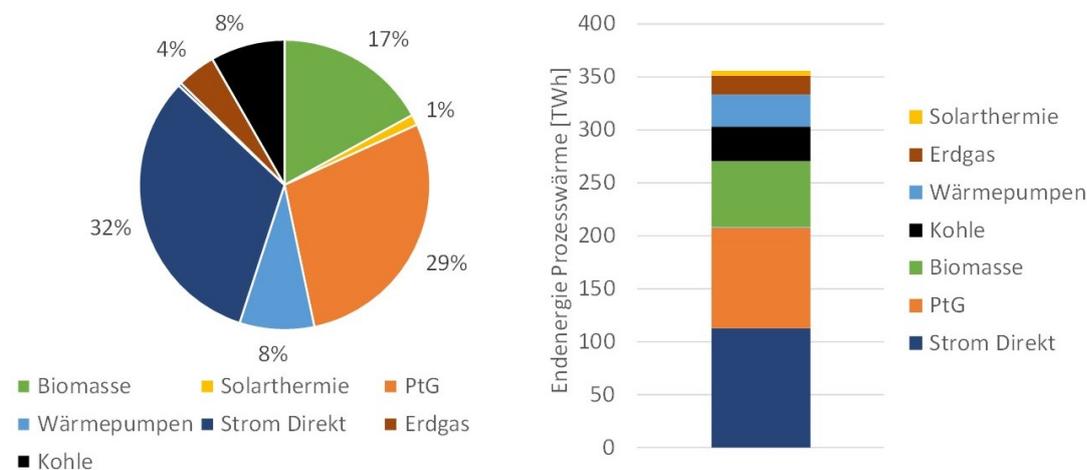


Abb. 12: Prozesswärme 2050, Durchschnitt aller Szenarien mit angegebenen Werten für das Jahr 2050.

4.3.4. Biogene Energieträger

Unter dem Oberbegriff biogene Energieträger werden sowohl Anbaubiomasse als auch Reststoffe gefasst, die in fester, flüssiger oder gasförmiger Form eingesetzt werden können. Im Wärmesektor werden als Brennstoffe häufig feste biogene Energieträger in Form von Pellets oder Hackschnitzeln aus Holz verwendet. Biomethan kommt als gasförmiger Brennstoff als Ersatz für fossiles Erdgas in Frage. Biomethan wird aus Biogas bereitet, das in Biogasanlagen durch die Vergärung von z. B. Maissilage, Rüben, Gülle und Mist sowie weiterer landwirtschaftlicher Rest- oder Anbaubiomasse entsteht.

In Abb. 13 werden die Mittel- und Streuungswerte von der auf Basis biogener Brennstoffe erzeugten Gebäude- und Prozesswärme in den Jahren 2030 und 2050 gezeigt. Abb. 14 und Abb. 15 zeigen den zeitlichen Verlauf der mittels Biomasse erzeugten Wärme im Gebäude- und Industriesektor. Die Menge der eingesetzten Biomasse hängt in den Szenarien in hohem Maße von den getroffenen Annahmen bezüglich des verfügbaren Biomassepotenzials ab, in Tab. 6 werden diese im Überblick dargestellt.

Der Einsatz von Biomasse im Wärmebereich wird in den Studien in unterschiedlichen Detaillierungsgraden abgebildet. Die detailreichste Darstellung bietet die DBFZ-Modellierung. Dort wird der zeitliche Verlauf der Anteile verschiedener Biomassesortimente in den Szenarien von 2015 bis 2050 dargestellt. Zunächst dominieren Restholz-Pellets, zudem Miscanthus-Chips, Restholz-Chips und Scheitholz relevant (vgl. Jordan et al. 2019).

Die Informationen zu den eingesetzten Biomassesortimenten und zu den Anwendungen, in denen Biomasse eingesetzt wird, sind in Tab. 6 und Tab. 7 beschrieben.

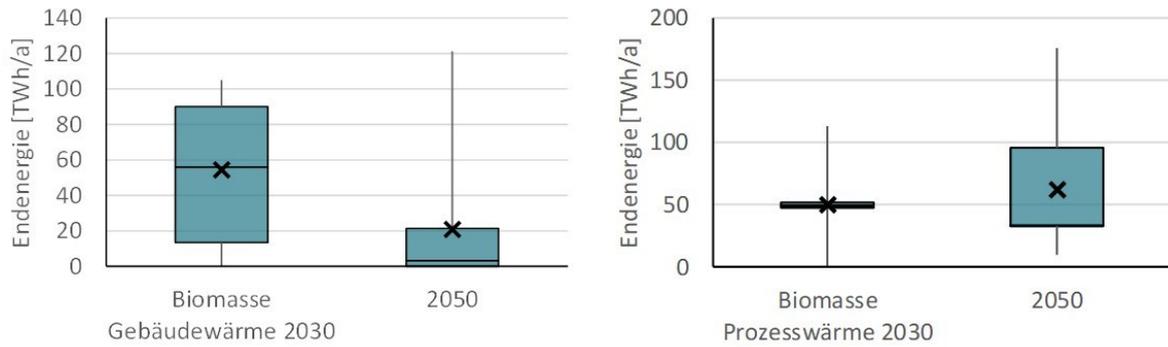


Abb. 13: Bandbreite der Szenarienergebnisse: Wärmeerzeugung aus Biomasse in den Jahren 2030 und 2050.

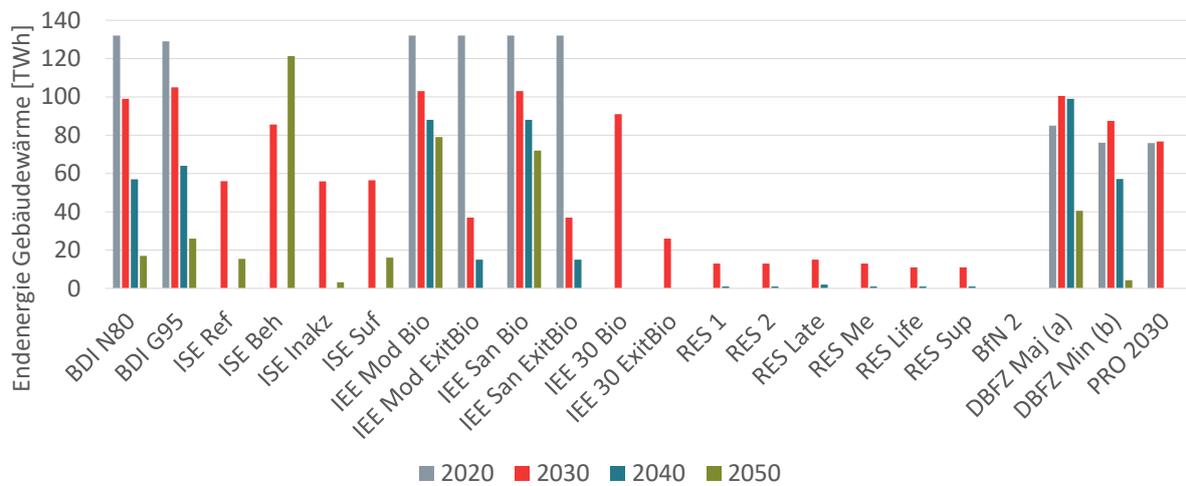


Abb. 14: Biogene Brennstoffe im Gebäudewärmesektor.

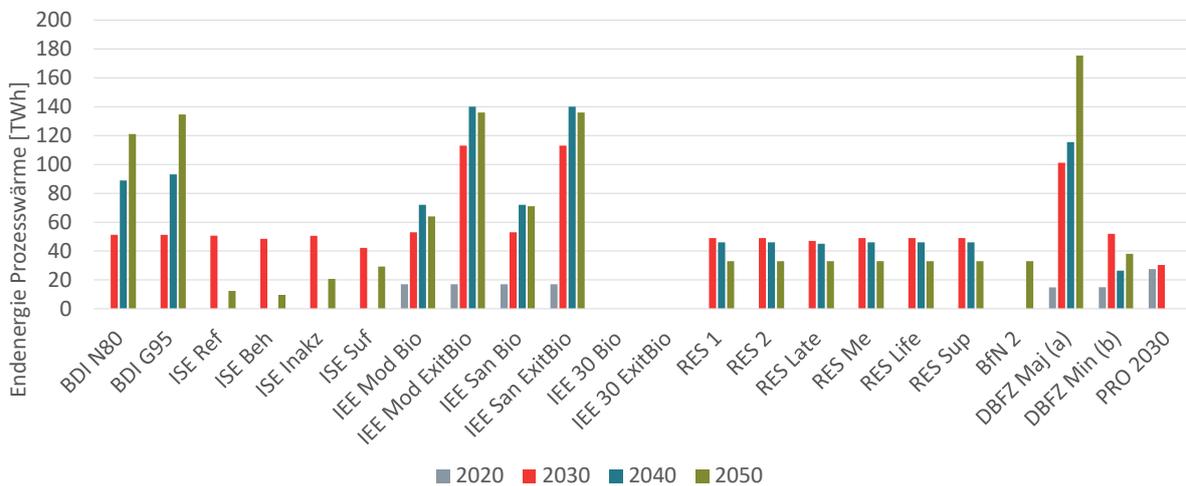


Abb. 15: Biogene Brennstoffe in der Prozesswärmeerzeugung.

Tab. 6: Menge, Herkunft und Art der Biomasse in den untersuchten Szenarien. Zur Verfügung stehende Potenziale: Primärenergie, tatsächlich genutzte Biomasse im Wärmesektor: Endenergie.

	Menge	Herkunft	Art
BDI	Maximales nachhaltig verfügbares Potenzial ca. 333 TWh; dieses wird vollständig genutzt	Inländische Biomasse (keine Importe zulässig)	Anbau- sowie Restbiomasse: größtenteils feste biogene Stoffe (z. B. feste Biomasse aus der Landwirtschaft wie Stroh, Kurzumtriebsplantagen); geringe Anteile an weiteren Rest-, Wald und Industrieböhlzern ca. 2 % Gülle in Biogasanlagen
ISE	max. Potenzial: ca. 290 TWh (heutiger Stand) tatsächliche Nutzung im Wärmesektor 2050: <ul style="list-style-type: none"> • Ref – 28 TWh • Beh – 131 TWh • Inakz – 24 TWh • Suf – 35 TWh 	k. A. zur Herkunft oder zu einer möglichen Importbeschränkung von Biomasse	Potenziale: feste Biomasse (z. B. in Form von Holz, Stroh) ca. 131 TWh; Biogas: Reststoffe/feuchte Biomasse: 42 TWh Rohbiogas; angebaute Biomasse (Raps/Mais): 120 TWh
IEE	max. nationales Potenzial ca. 315 TWh; Reduktion der Anbaufläche von 2 Mio. ha (Status Quo) auf 1,5 Mio. ha im Jahr 2050 tatsächliche Nutzung im Wärmesektor 2050: Mod/San Bio – 143 TWh Mod/San ExitBio – 136 TWh	k. A.	Waldrestholz, Industriebholz und andere Restbölzler: 119 TWh; KUP: 15 TWh; feste biogene Reststoffe: 56 TWh; vergärbare Reststoffe: 47 TWh; vergärbare Nawaro: 78 TWh
RES	Ab 2030: keine Anbaubiomasse; ab 2050: keine Nutzung von Waldrestholz tatsächliche Nutzung im Wärmesektor 2050: ca. 33 TWh	Keine Biomasseimporte; Ausstieg aus Biomassenutzung	Mittel- und langfristig ausschließlich Waldrest- und Altholz; biogene Abfall- und Reststoffe, insbesondere die gesamte anfallende Gülle als THG-Minderungsmaßnahme zur Erzeugung von Biogas und Biomethan; energetische Nutzung von Stroh

	Menge	Herkunft	Art
BfN	Unbedenkliches Gesamt-Potenzial: 60 TWh, unter naturschutzfachlichen Auflagen nutzbares Potenzial von 56 TWh; dieses wird vollständig im Gesamtsystem genutzt	inländisch	<p>Ausschließlich Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe.</p> <p>Nawaro werden vor allem in der stofflichen Produktion eingesetzt und erst nach Durchlaufen der Nutzungskaskade (zunächst stoffliche Nutzung und Recycling) energetisch genutzt.</p> <p>Aus Naturschutzsicht unbedenklich einsetzbare Biomasse:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Abfälle aus Gewerbe, Industrie und Siedlung – 8 TWh • Reststoffe aus Holznutzung – 40 TWh • Klärschlamm, Klärgas – 12 TWh <p>Zusätzliche unter naturschutzfachlichen Auflagen nutzbare Reststoffe:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reststoffe aus Biotoppflege – 15 TWh • Ernterückstände aus der Landwirtschaft – 17 TWh • Tierische Exkremente und Einstreu – 24 TWh
DBFZ Maj	Gesamte Anbaufläche für energetische und stoffliche Nutzung: max. 2 Mio. ha 2050. Durchschnittlich stehen für die Nutzung im Wärmesektor ca. 180 TWh (1,5 Mio. ha) zur Verfügung; das Potenzial wird vollständig genutzt	Inländisch; keine Importe oder Exporte	<p>Schneller Ausstieg aus Biogaserzeugung bis ca. 2022 (nicht wettbewerbsfähig ohne Subventionen);</p> <p>Scheitholznutzung: konstant;</p> <p>Holzreststoffe sind am kosteneffizientesten: insbesondere in Form von Pellets, ab ca. 2045 wieder vermehrt in Form von Restholzchips;</p> <p>Anbaubiomasse/KUP: Miscanthus nimmt ab ca. 2022 stark zu, Nutzung in Form von Miscanthus-Chips</p>
DBFZ Min	Durchschnittlich steht dem Wärmesektor ein sehr geringes Potenzial von ca. 30 TWh/a zur Verfügung, das Potenzial wird vollständig genutzt. Die Flächennutzung sinkt kontinuierlich auf 0 ha im Jahr 2050.	Inländisch; keine Importe oder Exporte	<p>Sehr schneller Ausstieg aus Biogaserzeugung (nicht wettbewerbsfähig ohne Subventionen);</p> <p>Scheitholznutzung: nicht wettbewerbsfähig im Vergleich zu anderen Stoffen, ab 2030 kaum noch genutzt;</p> <p>Holzreststoffe sehr kosteneffizient: zunächst als Chips, ab 2020 vermehrt in Form von Pellets, 2050 wieder in Form von Holzchips;</p> <p>Anbaubiomasse/KUP: Miscanthus nimmt ab ca. 2022 zu, Nutzung in Form von Miscanthus-Chips am kosteneffizientesten, Nutzung ab 2030 rückläufig;</p> <p>Im Jahr 2050: ausschließlich Restholzchips genutzt</p>
PRO 2030	Die Gesamt-Potenzialgrenze liegt bei 333 TWh (Inland) und 83 TWh (Import); tatsächliche Nutzung (Primärenergieverbrauch) verbleibt auf heutigem Niveau von ca. 305 TWh ⁵	inländische Biomasse deckt den Bedarf, Import wird jedoch nicht ausgeschlossen	k. A.

⁵ Ebd. S. 71

Tab. 7: Nutzung der Biomasse zur Wärmeerzeugung nach Sektoren und Anwendungen.

Studie	Energetische Biomassenutzung im Wärmebereich
BDI	Biomasse wird verstärkt in der industriellen Prozesswärme eingesetzt. Für Hochtemperaturanwendungen bestehen bei der Substitution von fossilen Brennstoffen nur wenige meist strombasierte Alternativen (Strom Direkt oder synthetische Brennstoffe). Biomasse ist beim Ersatz dieser Brennstoffe wettbewerbsfähiger als in der dezentralen Gebäudewärme. Biogas soll überwiegend in das zentrale Gasnetz eingespeist werden.
ISE	Biomasse wird zur Erzeugung von Gebäudewärme und Prozesswärme eingesetzt, sowie in Anlagen zur Umwandlung von Biomasse zu Energieträgern (Biogasanlagen, Vergaser-Anlagen mit anschließender Synthetisierung in Wasserstoff, Methan oder flüssige Brennstoffe). Die Nutzung von fester Biomasse in Holzkesseln im niedrigen Temperaturbereich der Wärmeerzeugung, also für die Gebäudewärme (Raumwärme und Trinkwarmwasser), spielt im Jahr 2050 kaum noch eine Rolle. Aus systemischer Sicht ist es kostengünstiger, die Biomasse im Wärmesektor für die Bereitstellung von industrieller Prozesswärme oder für die Herstellung von Biogas einzusetzen. Insbesondere im ISE Beh-Szenario sorgt allerdings der hohe Anteil von Biomethan im Gasnetz für einen starken Biomasseinsatz in der Gebäudewärme.
IEE Bio	Nutzung der festen Biomasse (Holz) zur Gebäudewärmeerzeugung in dezentralen Biomassekesseln (monovalenter Einsatz): ermöglicht leichtere Erreichbarkeit des Sektorziels für Gebäude 2030; bedeutet jedoch aufgrund des monovalenten Einsatzes des begrenzten Brennstoffes langfristig eine geringere Systemeffizienz. Zudem Nutzung von Holz im ETS-Bereich (Industrie, Fernwärme). Geringere Anteile machen die Nutzung in Bio-KWK und Biomethan ETS aus.
IEE ExitBio	Im Jahr 2050 findet keine monovalente Nutzung von Biomasse in dezentraler Gebäudewärmeerzeugung statt. Stattdessen konzentriert sich die zur energetischen Nutzung verfügbare Biomasse auf die Nutzung in flexiblen Hybridsystemen, zum größten Teil in der Industrie und Fernwärme (ETS-Bereich; hocheffiziente Nutzung) sowie in geringerem Maß in Holzheizwerken in Nahwärmenetzen (Nicht-ETS-Bereich; effiziente Nutzung).
RES	<p>Einsatz der Biomasse dort, wo für gesamtes Energiesystem der größte Nutzen entsteht und negative Umweltauswirkungen vermieden werden bzw. positive Effekte zu erwarten sind (z. B. Güllevergärung). Der Einsatz von landwirtschaftlichen Reststoffen findet präferiert in Biogasanlagen zur Stromproduktion statt. Abfallvergärung geschieht in größeren Anlagen mit anschließender Aufbereitung zu Biomethan.</p> <p>Zur Verfügung stehende Holzbiomasse wird für die Wärmeversorgung in Industrie, privaten Haushalten und GHD verwendet. Ein Ausstieg der dezentralen Biomassenutzung in der Gebäudewärme erfolgt in allen Szenarien, im RES Late-Szenario geschieht dies am langsamsten. Im Jahr 2050 werden alle verfügbaren Waldrest- und Altholzpoteztiale in der Industrie eingesetzt, um 34 TWh Wärme auf einem Temperaturniveau von 500°C bereitzustellen.</p> <p>Stroh wird in allen Szenarien ausschließlich zur Produktion von Ethanol genutzt.</p>
BfN	Die verfügbare Biomasse wird im Industriesektor zur Erzeugung von Prozesswärme sowie im Verkehrssektor für mobile Anwendungen eingesetzt. (Modellfestlegung, kein Modellierungsergebnis)
DBFZ Maj	<p>Biomasse wird sowohl im Industriesektor als auch im Gebäudewärmesektor eingesetzt. Bis ca. 2040/2045 ist der Einsatz von Biomasse in der dezentralen Gebäudewärmeerzeugung am kosteneffizientesten.</p> <p>Im Wohngebäudesektor werden Scheitholzöfen in Kombination mit Gaskesseln und Solarthermie eingesetzt, ab ca. 2030 vermehrt Scheitholzöfen in Kombination mit Wärmepumpen. In MFH werden Holz-BHKWs mit Wärmepumpen kombiniert.</p> <p>Ab ca. 2045 verschiebt sich die Biomassenutzung von der dezentralen Gebäudewärmeerzeugung zur Prozesswärmeerzeugung. Im Jahr 2050 wird die gesamte Prozesswärme auf Basis von Biomasse bereitgestellt wird.</p>
DBFZ Min	<p>Im Wohngebäudesektor stellen Scheitholzöfen nur einen sehr geringen Marktanteil dar. Die verfügbare Biomasse wird eher in MFH in Holz-BHKWs eingesetzt. Bis 2030 steigt die in der Gebäudewärme eingesetzte Biomasse an, ab 2030 sinkt der Anteil bis 2050 die im Gebäudesektor eingesetzte Biomassemenge vernachlässigbar ist.</p> <p>Im Industriesektor steigt die eingesetzte Biomassemenge bis 2030 und bleibt bis 2050 relativ konstant.</p>
PRO 2030	k. A.

Exkurs: Import von Biomasse zur energetischen Nutzung

Den vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von Biomasse in energetischen Anwendungen steht ein begrenztes (nachhaltiges) Biomassepotenzial gegenüber. Die Studien nehmen maximale Obergrenzen für das energetisch verwertbare bzw. das dem Wärmesektor zugewiesene Biomassepotenzial an. Häufig werden in den Modellierungen die Biomasseimporte aus dem Ausland jedoch nicht berücksichtigt. Diese Annahme bildet die Realität nur unzureichend ab, da Biomasse auf internationalen Märkten gehandelt wird. In der Realität setzt sich das Biomassepotenzial aus der inländisch produzierten und der importierten Biomasse zusammen. Je nach Nachfrage und Zahlungsbereitschaft kann das Biomassepotenzial also größer sein als in vielen Studien angenommen. Verschiedene Studien rechnen mit Importpotenzialen für Deutschland von 100 TWh/a (DBFZ 2019) oder 40 TWh/a bis 2030 und 110 TWh/a bis 2050 (DBFZ 2015).

Die in Deutschland produzierte Biomasse deckt nicht den gesamten energetischen Biomassebedarf ab, Deutschland ist daher ein Netto-Importeur von energetischer Biomasse. Zwar ist Deutschland Netto-Exporteur von Holz-Pellets (Deutsches Pelletinstitut 2017), die aus Holz- und Sägeabfällen hergestellt werden, doch vor allem Biodiesel und Bioethanol sowie pflanzliche Öle werden in großen Mengen zur energetischen Nutzung importiert: Die Importquote von Biokraftstoffen liegt bei 75 % (Ifeu 2019). Der Außenhandel mit Holz (stoffliche und energetische Nutzung) weist insgesamt ebenfalls Nettoimporte auf (Thünen-Institut 2018).

Tendenziell wird Biomasse in den kommenden Jahren global gesehen ein knappes Gut sein, da auch andere Länder zur Erreichung der (internationalen) Klimaschutzziele Bioenergie zur Substitution fossiler Energieträger einsetzen werden. In manchen europäischen Ländern planen Kraftwerksbetreiber bereits, einige ihrer Kohlekraftwerke umzurüsten und mit fester Biomasse zu betreiben (Sandbag 2019).

Je nachdem, in welchem Maß zukünftig nationale oder internationale Nachhaltigkeitskriterien für Biomasse angewendet werden, kann sich das verfügbare Importpotenzial verändern. Beim Biomasseimport ist es bislang eine Herausforderung, Nachhaltigkeitskriterien uneingeschränkt global geltend zu machen, da es keine internationalen Abkommen mit allgemeingültigen Standards gibt, die beispielsweise eine Ausweitung von Ackerflächen in Feuchtgebiete oder Primärwälder verhindern. Schreibt sich die aktuelle Entwicklung fort, ist mit einer starken Ausdehnung von Ackerlandfläche insbesondere in Brasilien, im Südwesten von Russland sowie in Südostasien zu rechnen (Meilensteine 2030 BAU-Szenario (DBFZ 2015)). Es ist davon auszugehen, dass für den internationalen Handel mit Bioenergieträgern mittelfristig (bis 2030) verbindliche Nachhaltigkeitsanforderungen gestellt werden, wie sie für Biokraftstoffe bereits entwickelt wurden (DBFZ 2015).

4.3.5. Solarthermie

Die Wärmeerzeugung auf Basis von Solarthermie wird in den Abbildungen Abb. 16, Abb. 17 und Abb. 18 dargestellt.

Unter Solarthermie werden an dieser Stelle die großflächige, zentrale Solarthermie für Wärmenetze, der Einsatz von Solarthermie in der Prozesswärme sowie dezentrale Aufdach-Solarthermieanlagen begrifflich zusammengefasst, da nicht alle Studien diese Kategorien abbilden bzw. entsprechend differenzieren.

Großflächige Freiflächensolarthermieanlagen werden zur Fernwärmeversorgung genutzt, der Einsatz dieser Anlagen hängt in hohem Maß von der Entwicklung des Fernwärmeanteils, von den erreichbaren solaren Deckungsgraden innerhalb der Fernwärmenetze und von der verfügbaren Fläche ab. Durch den Einsatz von saisonalen Wärmespeichern können solare Deckungsgrade innerhalb der Wärmenetze von über 50 % erreicht werden.

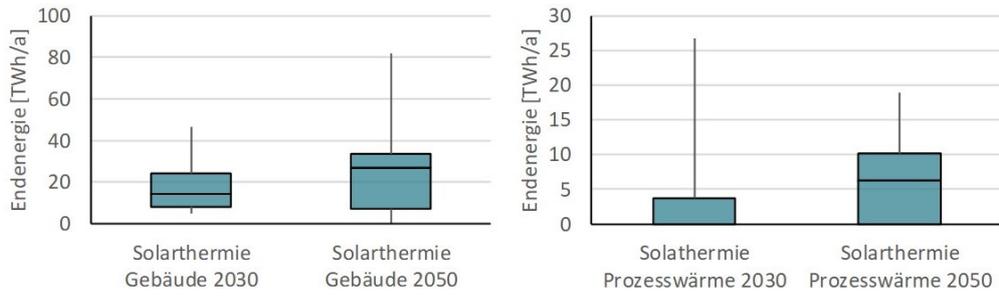


Abb. 16: Bandbreite Szenarienergebnisse: Wärmeerzeugung aus Solarthermie in den Jahren 2030 und 2050.

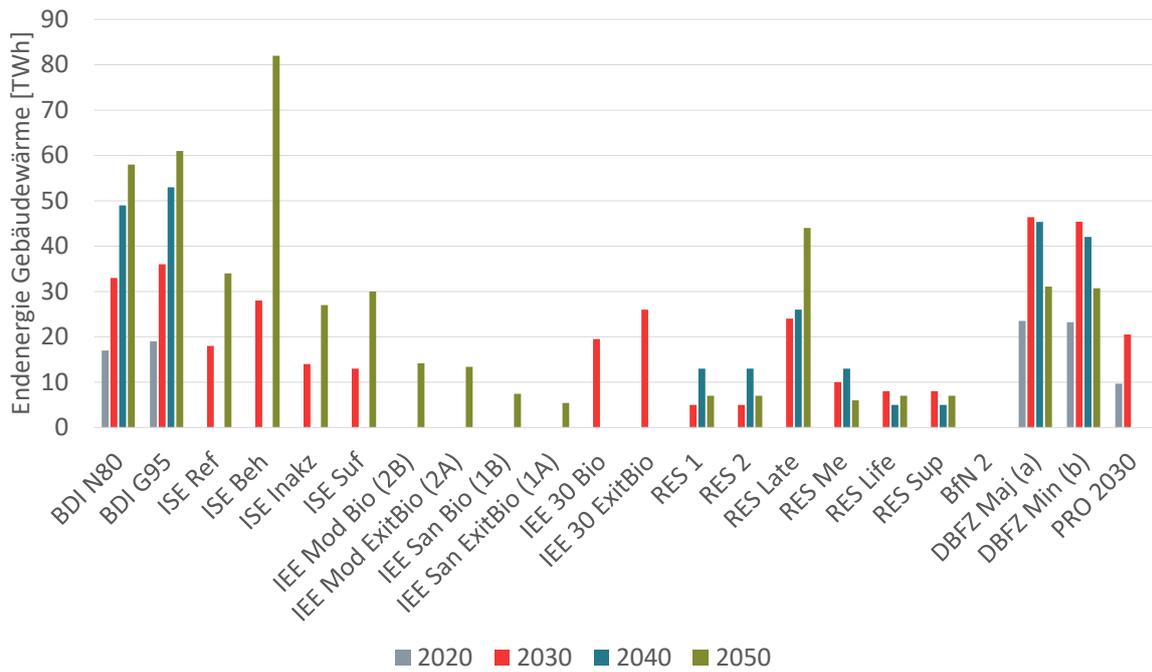


Abb. 17: Solarthermische Erzeugung in der Gebäudewärme.

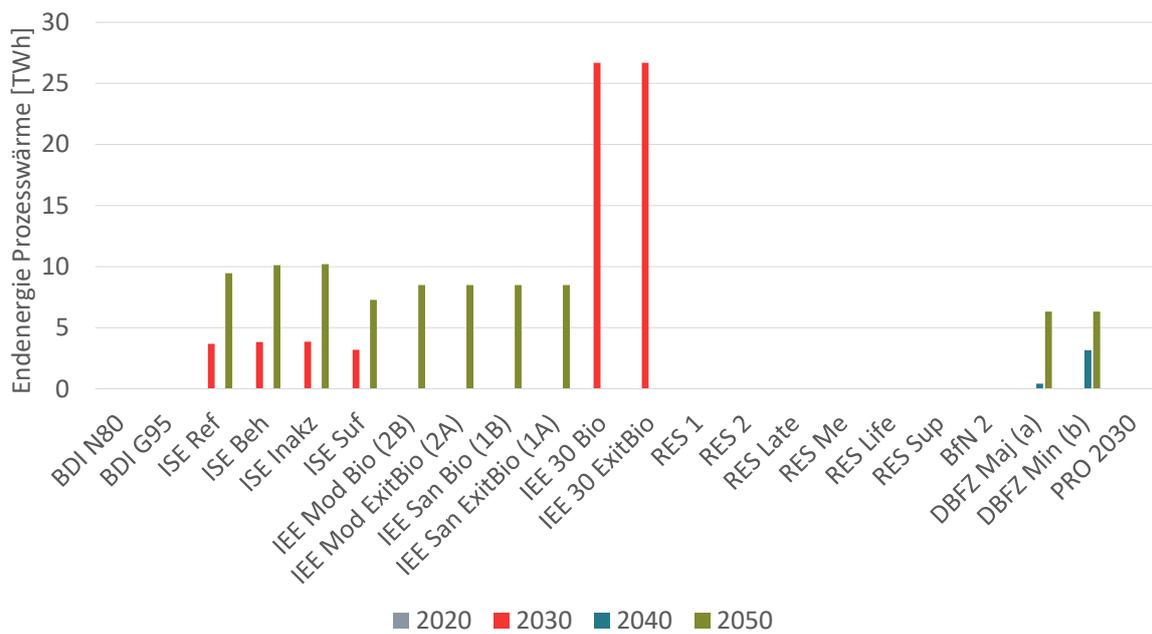


Abb. 18: Solarthermische Erzeugung in der Prozesswärme.

4.3.6. Wärmepumpen

Die Wärmeerzeugung im Gebäude- und Industriesektor mittels Wärmepumpen ist in den Abbildungen Abb. 19, Abb. 20 und Abb. 21 dargestellt.

Als Wärmequelle wird bei der Wärmepumpentechnologie die Umgebungswärme (z. B. Luft, oberflächennahe Geothermie, Gewässer) genutzt und mit Strom auf ein höheres Temperaturniveau gebracht. Das Verhältnis von eingesetzter Umweltwärme zu eingesetztem Strom liegt je nach Wärmequelle, Wärmepumpe und Betriebsweise bei circa 3:1 bis 5:1.

In den abgebildeten Daten wird die Endenergie, die mittels Wärmepumpen erzeugt wird, dargestellt. Primärseitig kommen also sowohl Umweltwärme als auch Strom zum Einsatz, um die dargestellten Wärmemengen zu produzieren.

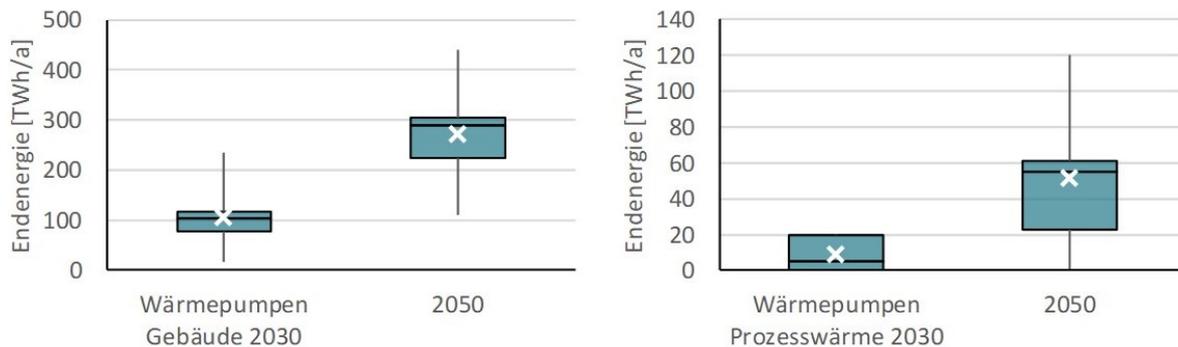


Abb. 19: Bandbreite Szenarienergebnisse: Wärmeerzeugung mittels Umweltwärme/Wärmepumpen.

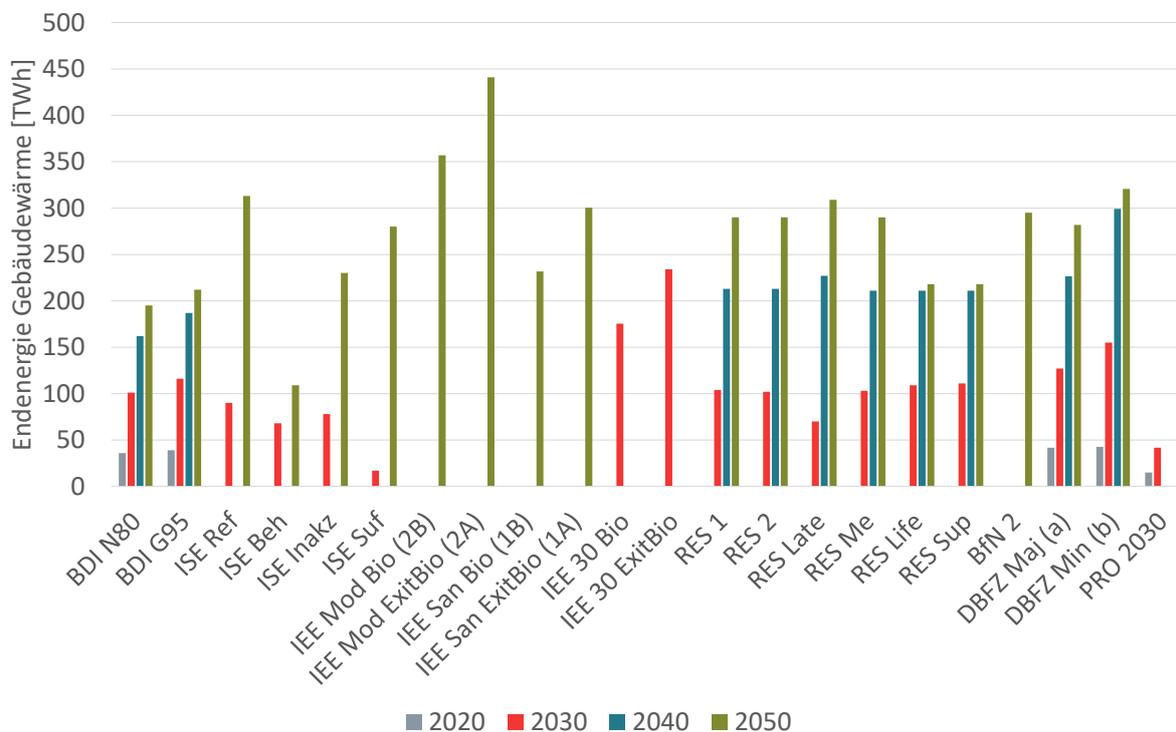


Abb. 20: Gebäudewärme aus Umweltwärme mittels Wärmepumpen.

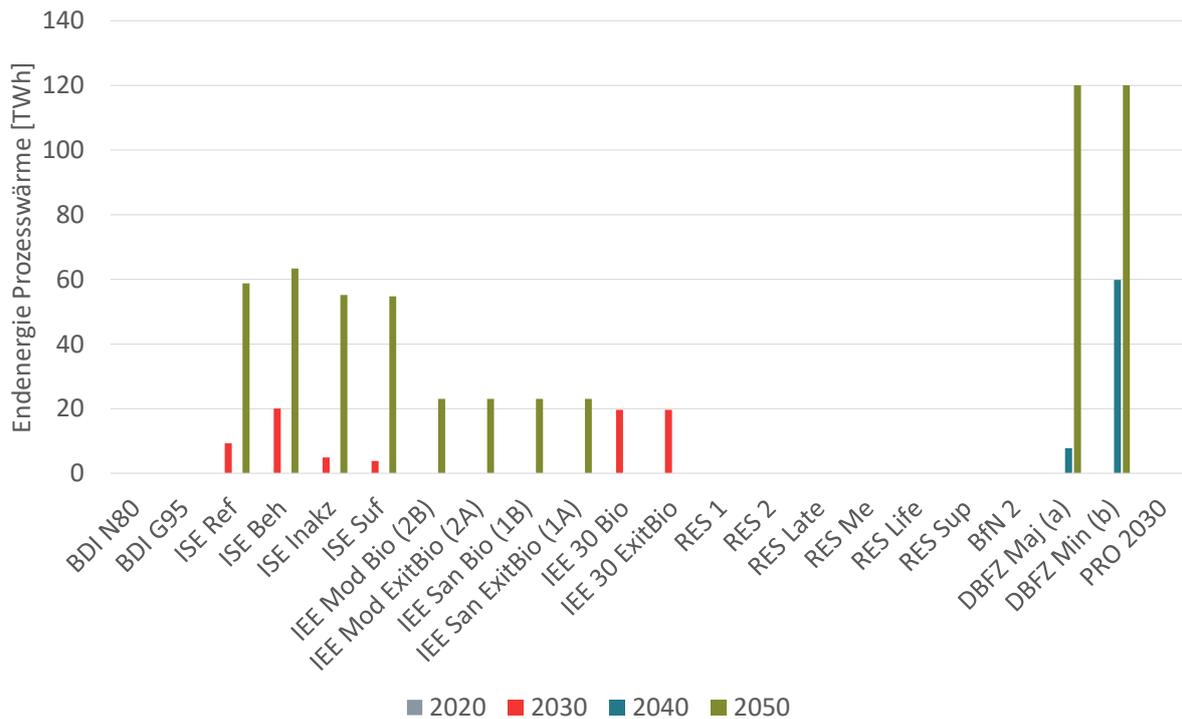


Abb. 21: Prozesswärme aus Umweltwärme mittels Wärmepumpen.

4.3.7. Tiefe Geothermie

Ausschließlich in der BDI- sowie in der Rescue-Studie wird die Tiefe Geothermie als Erzeugungsoption zur Wärmeversorgung bis 2050 berücksichtigt. Die Mittelwerte und Streuung der tiefengeothermischen Wärmeerzeugung dieser beiden Studien sind in Abb. 22 dargestellt. Den zeitlichen Verlauf zeigt Abb. 23.

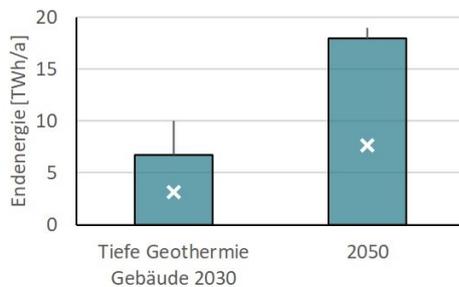


Abb. 22: Bandbreite der Szenarienergebnisse: Wärmeerzeugung aus Tiefengeothermie in den Jahren 2030 und 2050.

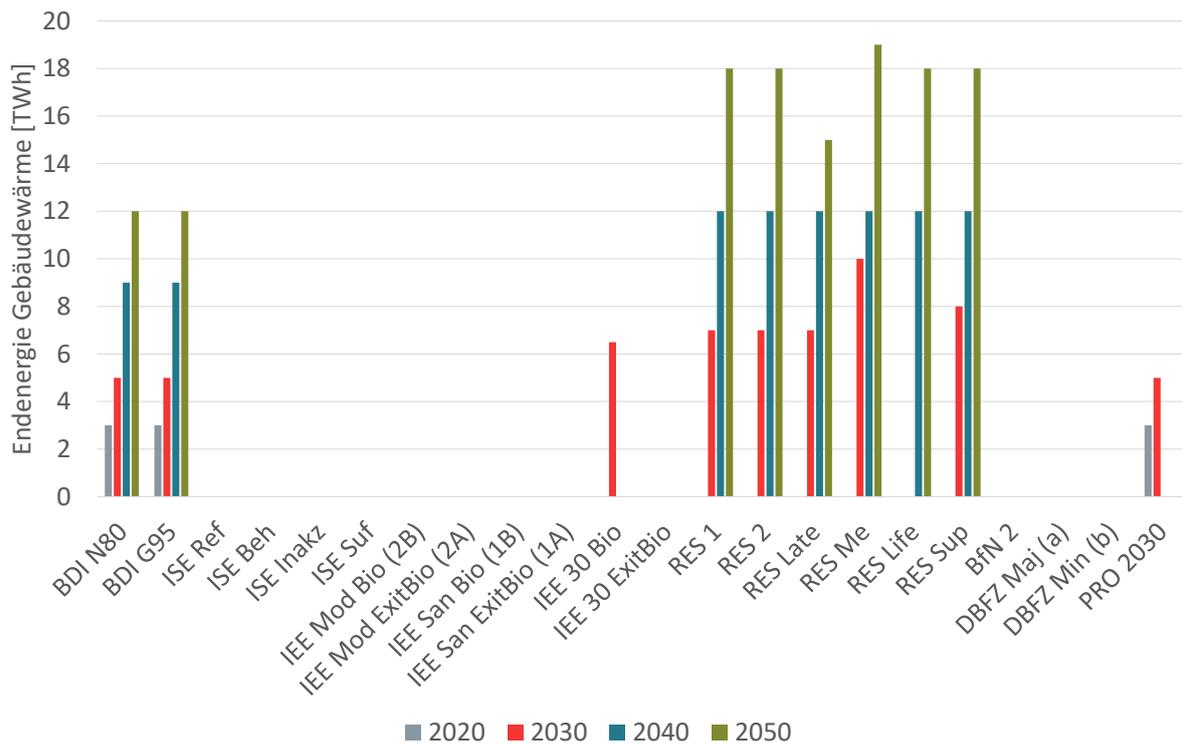


Abb. 23: Gebäudewärme aus Tiefengeothermie.

4.3.8. Strom (direktelektrische Wärmeerzeugung)

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Studien zur Entwicklung der Stromnutzung zur direkten Wärmeerzeugung dargestellt. In den Studien wird diese Technologie als Nutzung von Heizstäben, Power-to-Heat (PtH), Elektrokesseln oder Strom (Direktnutzung) bezeichnet.

In der Gebäudewärme unterscheiden sich die Szenarien in ihren Projektionen der direkt aus Strom erzeugten Wärme im Jahr 2050 eindeutig (s. Abb. 25). In den Szenarien der IEE-, Rescue-, BfN- und DBFZ-Studien ist die erzeugte Wärme basierend auf direkter Stromnutzung sehr gering. In der ISE-Studie tragen Heizstäbe vor allem zur dezentralen Versorgung im Gebäudesektor bei. In der BDI-Studie werden in der Kategorie „Strom“ sowohl PtH (direkte Stromnutzung) als auch Wärmepumpen zusammengefasst. Die Werte sind in der Kategorie Strom Direkt abgebildet. Die aus Strom direkt erzeugte Prozesswärme ist in Abb. 26 dargestellt.

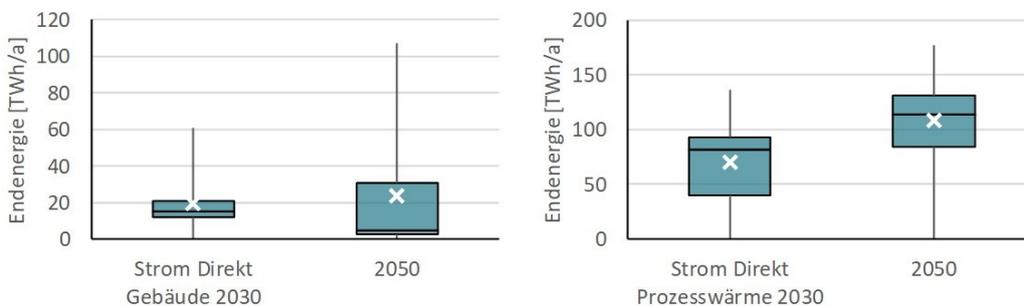


Abb. 24: Bandbreite der Szenarienergebnisse: Wärmeerzeugung aus Strom (Direktnutzung) in den Jahren 2030 und 2050.

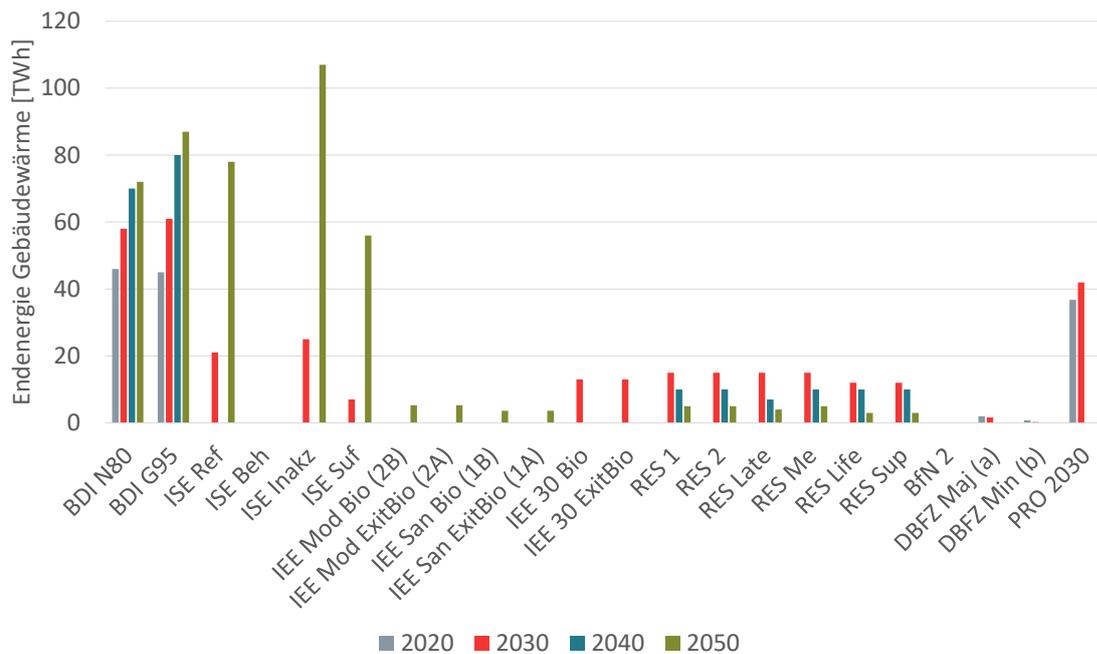


Abb. 25: Gebäudewärme aus direkter Stromnutzung.

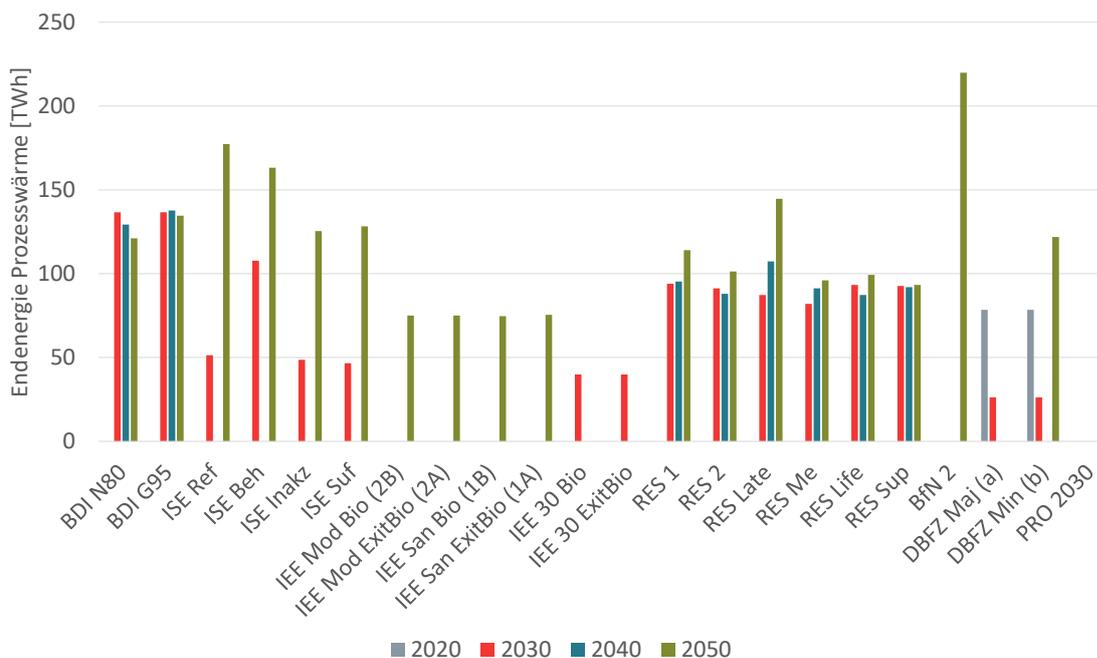


Abb. 26: Prozesswärme aus direkter Stromnutzung.

4.3.9. Synthetische Brennstoffe

Synthetische Brennstoffe zur Wärmeerzeugung wie synthetisches Methan oder Wasserstoff werden nicht in allen Szenarienmodellierungen mit dem gleichen Detaillierungsgrad berücksichtigt.

In der BDI-Studie werden im G95-Szenario alle noch bestehenden dezentralen Gasanschlüsse mit synthetischem Methan versorgt.

Im ISE-Szenario sind die Anteile von PtG im Erdgasnetz für 2030 und 2050 gegeben.

In anderen Studien wird angenommen, dass der Wechsel von Erdgas auf synthetisches Methan bis 2050 vollzogen wird, die genauen Anteile für jedes Jahr sind jedoch nicht modelliert

worden (z. B. Rescue, IEE). In diesen Fällen wird methodisch so vorgegangen, dass der Gasverbrauch 2050 als rein synthetisch angenommen wird.

In der DBFZ-Studie wird nicht definiert, ob gasbetriebene Wärmeerzeugungseinheiten mit fossilem oder synthetischem Erdgas gespeist werden. Hier wird angenommen, dass es sich dabei um fossiles Erdgas handelt.

Die Mittelwerte und Streumaße der PtG-Wärme sind für Gebäude und Industrie 2030 und 2050 in Abb. 27 dargestellt. Der Vergleich zeigt, dass PtG-basierte Wärme im Jahr 2050 in industriellen Anwendungen eine größere Rolle spielt als in der Gebäudewärme.

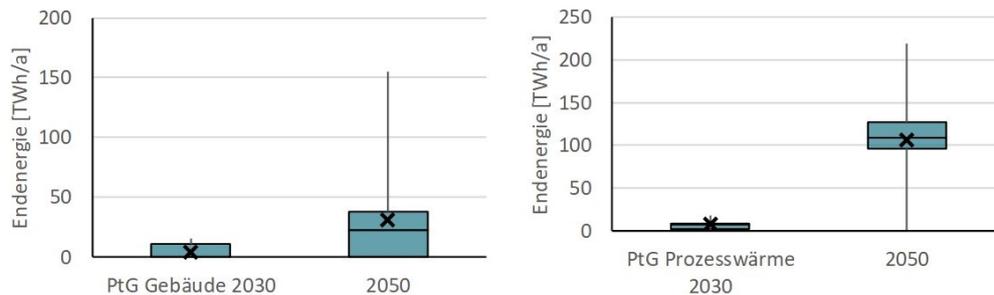


Abb. 27: Bandbreite der Szenarienergebnisse: Wärmeerzeugung aus synthetischen Brennstoffen in den Jahren 2030 und 2050.

Der Verlauf der zeitlichen Entwicklung für PtG-Wärme im Gebäudebereich wird in Abb. 28 gezeigt. Insbesondere im Szenario ISE Beh ist ein hoher Anteil an synthetischen Brennstoffen in der Gebäudewärme 2050 zu verzeichnen. Das RES Sup-Szenario weist ebenfalls eine hohe PtG-Wärmeerzeugung auf (2040), da in diesem Szenario bereits bis 2040 die Umstellung auf synthetische Gase in der allgemeinen Gasversorgung erfolgt.

Die hier untersuchten Studien berücksichtigen teilweise auch die Nutzung von Wasserstoff und definieren bzw. modellieren in einigen Fällen die Bereitstellungs- oder Erzeugungsmethoden.

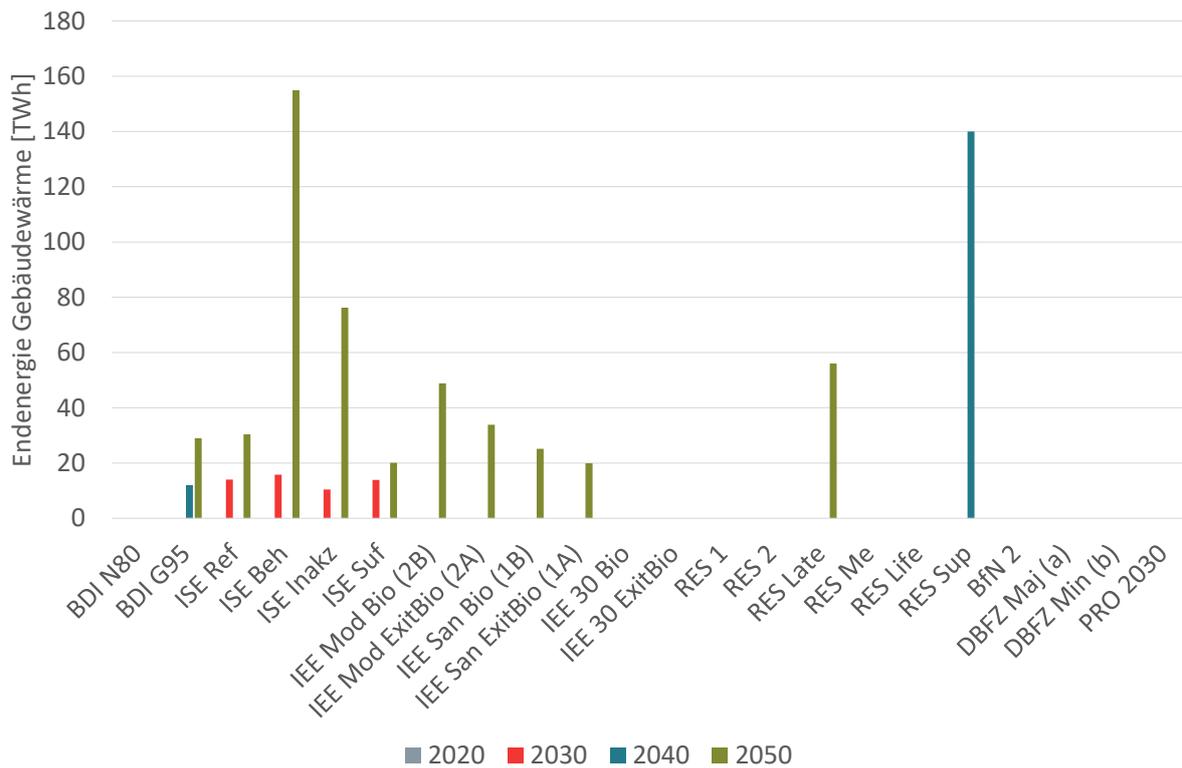


Abb. 28: Gebäudewärmeerzeugung aus synthetischen Brennstoffen.

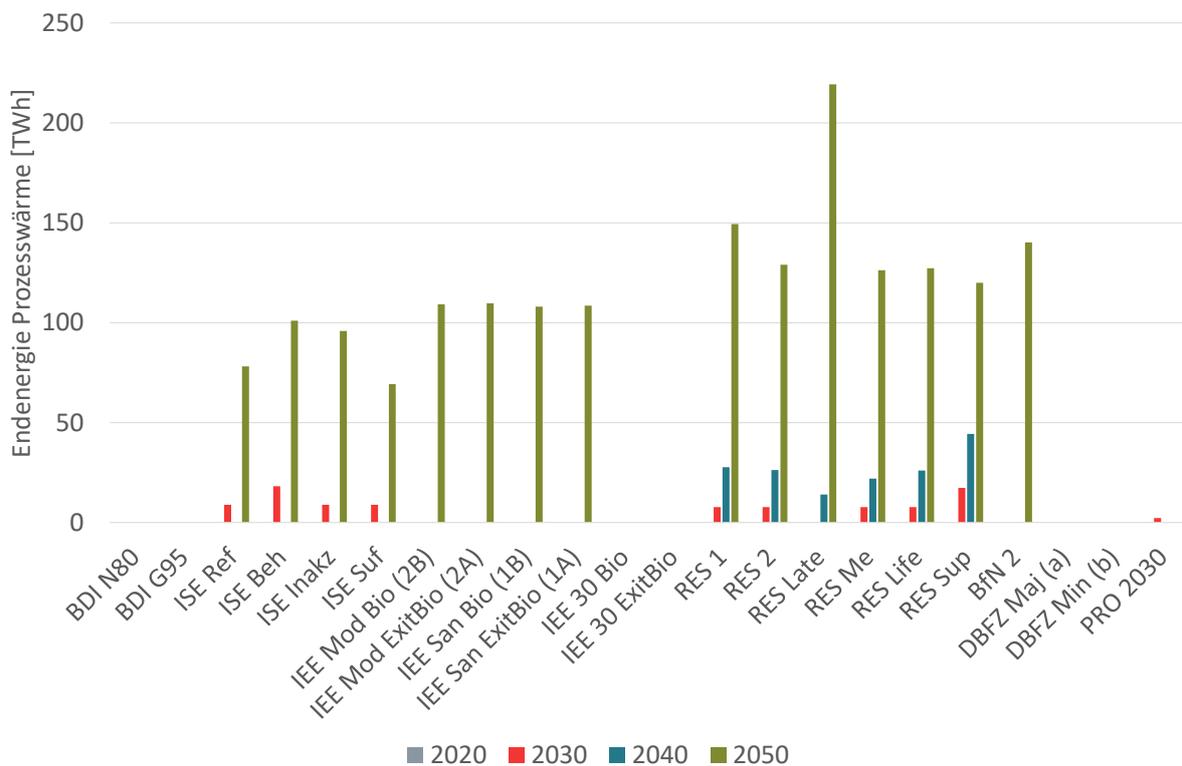


Abb. 29: Prozesswärmeerzeugung aus synthetischen Brennstoffen.

Exkurs: Farbenlehre Wasserstoff

Die Erzeugung von Wasserstoff kann mittels verschiedener Herstellungsverfahren geschehen. Heutzutage wird der Großteil von Wasserstoff (weltweit 48 %) auf konventionelle Weise mittels Dampfreformierung von Erdgas erzeugt. Die zweitrelevanteste Herstellungsmethode (30 %) ist die auf Basis von Erdöl. Bei Raffinerieprozessen fällt Wasserstoff als Nebenprodukt an. Auch aus Kohle kann mittels Vergasung Wasserstoff erzeugt werden (18 % des weltweiten Wasserstoffs werden so erzeugt). Der auf Basis fossiler Brennstoffe hergestellte Wasserstoff wird auch als grauer Wasserstoff (ohne CO₂-Abscheidung) bzw. blauer Wasserstoff (mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung bzw. -Nutzung) bezeichnet.

Türkiser Wasserstoff wird über die thermische Spaltung von Methan (Methanpyrolyse) hergestellt, wobei fester Kohlenstoff entsteht, der dauerhaft gebunden werden kann.

Grüner Wasserstoff ist das Produkt der Herstellung in Elektrolyseverfahren, die erneuerbar erzeugten Strom zur Spaltung von Wasser nutzen.

Der Tenor der untersuchten Studien ist größtenteils, dass in Zukunft grüner Wasserstoff strombasiert mittels Elektrolyse hergestellt wird.

In der Rescue-Studie wird Wasserstoff nur im RES Late-Szenario in der Gebäudewärme, ansonsten in der Prozesswärme durchgehend in allen Szenarien eingesetzt. Wasserstoff wird dort ausschließlich durch Elektrolyseverfahren auf Basis erneuerbaren Stroms hergestellt.

Auch in der BfN-Studie wird definiert, dass ausschließlich grüner Wasserstoff zum Einsatz kommt.

In der BDI-Studie wird Wasserstoff als „Game-Changer“ im G95-Szenario mit einer geringen Beimischquote im Gasnetz von bis zu 3 % berücksichtigt. Um die Erzeugung des Wasserstoffs mittels Elektrolyseuren zu leisten, müssen deren Kosten vermindert werden sowie Wirkungsgrade verbessert werden. Zudem wird die Möglichkeit erwähnt, Wasserstoff mittels Biomasse durch Photosynthese von Bakterien und Algen herzustellen. Eine quantitative Aufschlüsselung der Wasserstoffherzeugung erfolgt nicht.

Die Bereitstellung von Wasserstoff erfolgt im ISE Referenz-Szenario größtenteils durch inländische Elektrolyseanlagen: rund 62 % werden so hergestellt. 35 % des bereitgestellten Wasserstoffs werden importiert, für den Import-Wasserstoff erfolgt keine Aufschlüsselung der Herstellungsverfahren. Etwa 3 % macht der Biowasserstoff aus. Darunter werden Verfahren der Herstellung aus Biomasse (z. B. thermochemische Konversion) und mittels Biomasse (photosynthetische Prozesse) gefasst.

In den Prognos-Szenarien wird Wasserstoff (für die Nutzung in Industrie und Verkehr) zum Teil konventionell über Dampfreformierung von Erdgas hergestellt (keine Angabe zur CO₂-Abscheidung, d. h. entweder grauer bzw. blauer Wasserstoff) und zum Teil importiert. Zudem wird Wasserstoff strombasiert mittels Elektrolyse hergestellt, dieser wird jedoch ausschließlich in Mineralölraffinerien eingesetzt. Die Wasserstoffstrategie der Bundesregierung (2020) findet in der Erstellung der Prognos-Studie noch keine Berücksichtigung.

In den übrigen Studien werden keine Angaben zu den Wasserstoff-Herstellungsverfahren gemacht.

4.3.10. Abwärme und Abfallverbrennung

Die Wärmeerzeugung auf Basis von industrieller Abwärme und thermischer Abfallverwertung wird in Abb. 30, Abb. 31 und Abb. 32 dargestellt.

Durch unterschiedliche Annahmen zur verfügbaren Abfallmenge für die thermische Verwertung ergeben sich abweichende Wärmemengen in der Gebäudewärme aus Abfall (s. Abb. 31).

Bei der Erzeugung von industrieller Prozesswärme wird Abfall oder Abwärme nur in einigen Studien berücksichtigt bzw. ist häufig vernachlässigbar gering.

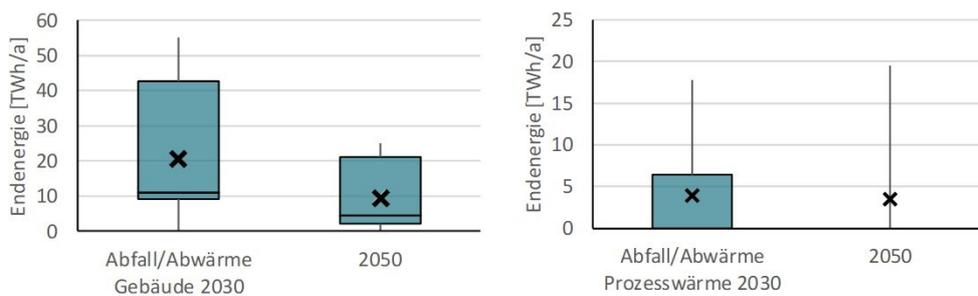


Abb. 30: Bandbreite Szenarienergebnisse: Wärmeerzeugung aus Abfall/Abwärme 2030 und 2050.

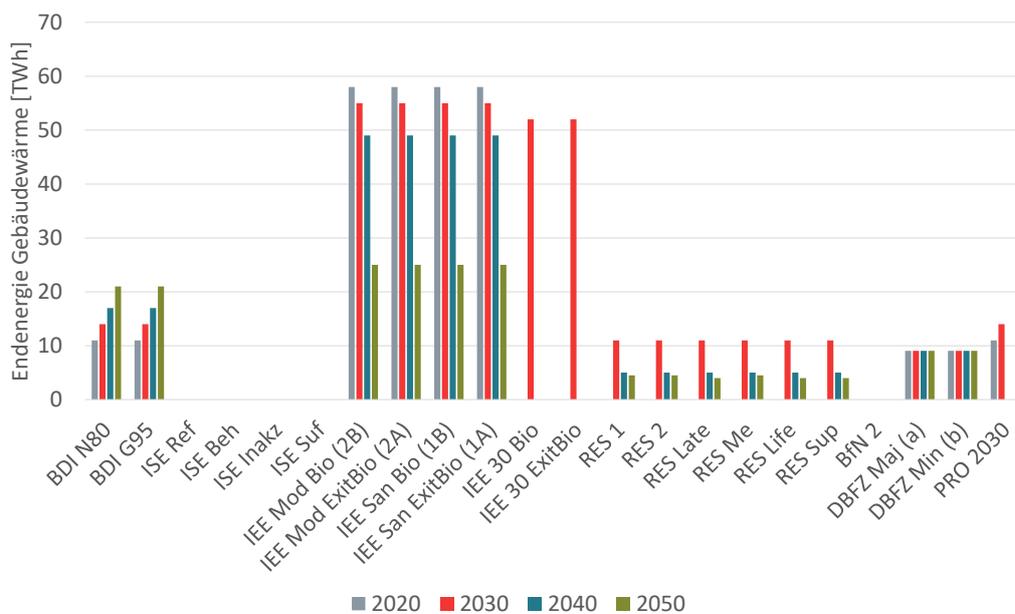


Abb. 31: Gebäudewärmeerzeugung aus thermischer Abfallverwertung und industrieller Abwärme.

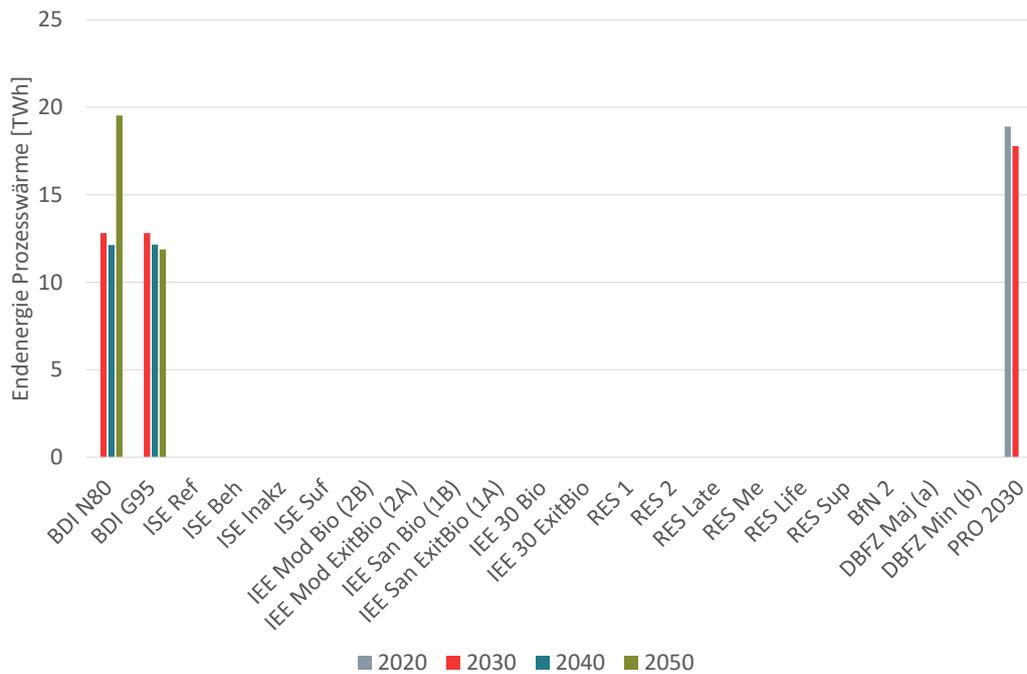


Abb. 32: Prozesswärmeerzeugung aus thermischer Abfallverwertung und industrieller Abwärme.

4.3.11. Fossile Energieträger

Im Jahr 2050 spielen fossile Energieträger in den meisten der untersuchten Zielszenarien im Gebäude- und Prozesswärmebereich keine Rolle. Die erzeugten Wärmemengen 2050 auf Basis von Erdgas, Kohle und Erdöl (Mittelwerte aller Szenarien) sind gering (vgl. Abb. 33, Abb. 36 und Abb. 39).

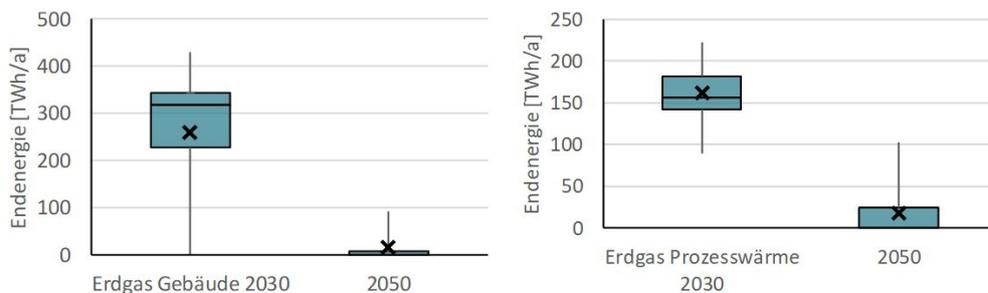


Abb. 33: Bandbreite der Szenarienergebnisse: Wärmeezeugung aus Erdgas in den Jahren 2030 und 2050.

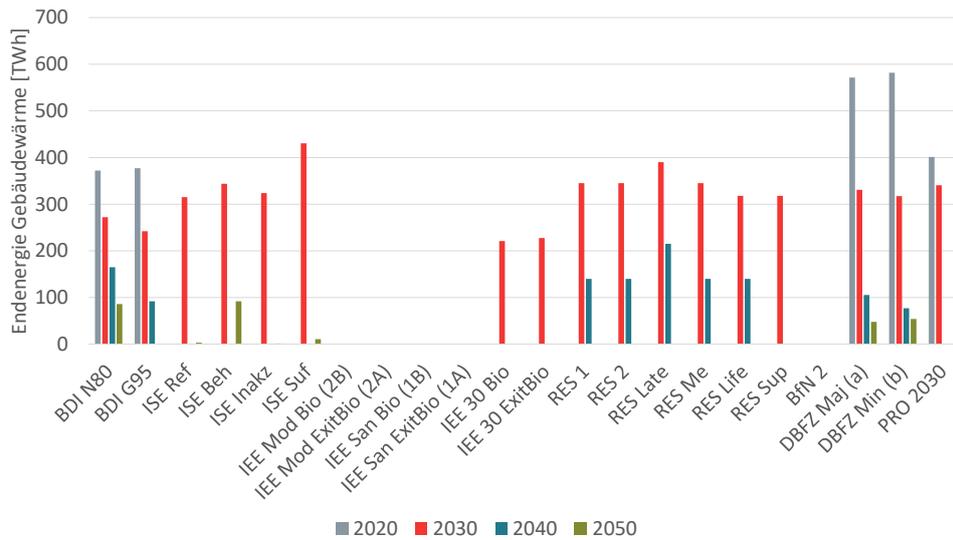


Abb. 34: Gebäudewärmeerzeugung aus Erdgas.

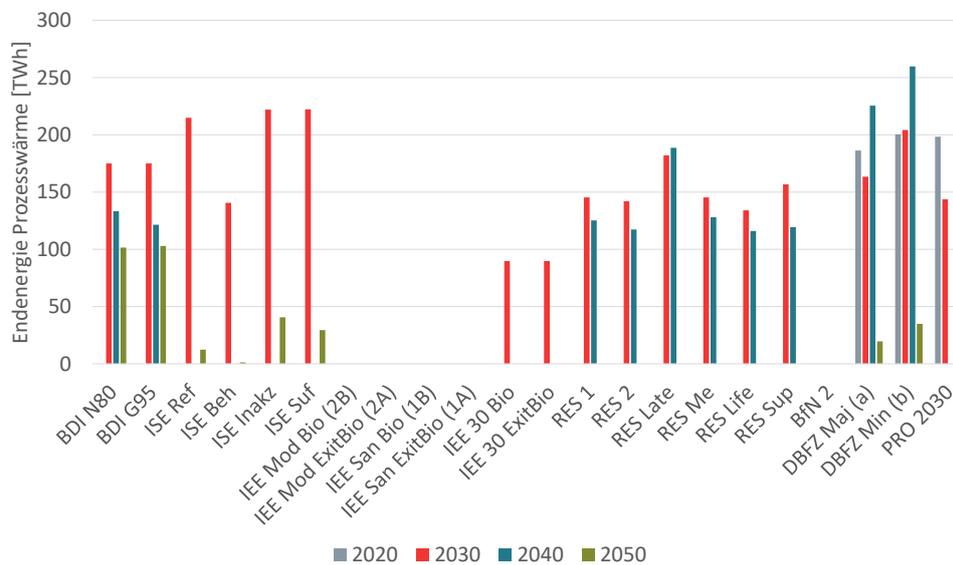


Abb. 35: Prozesswärmeerzeugung aus Erdgas, Erdölgas und sonstigen fossilen Gasen.

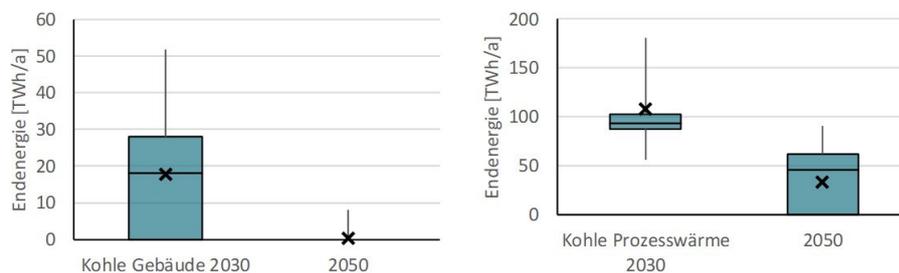


Abb. 36: Bandbreite der Szenarienergebnisse: Wärmeerzeugung aus Kohle in den Jahren 2030 und 2050.

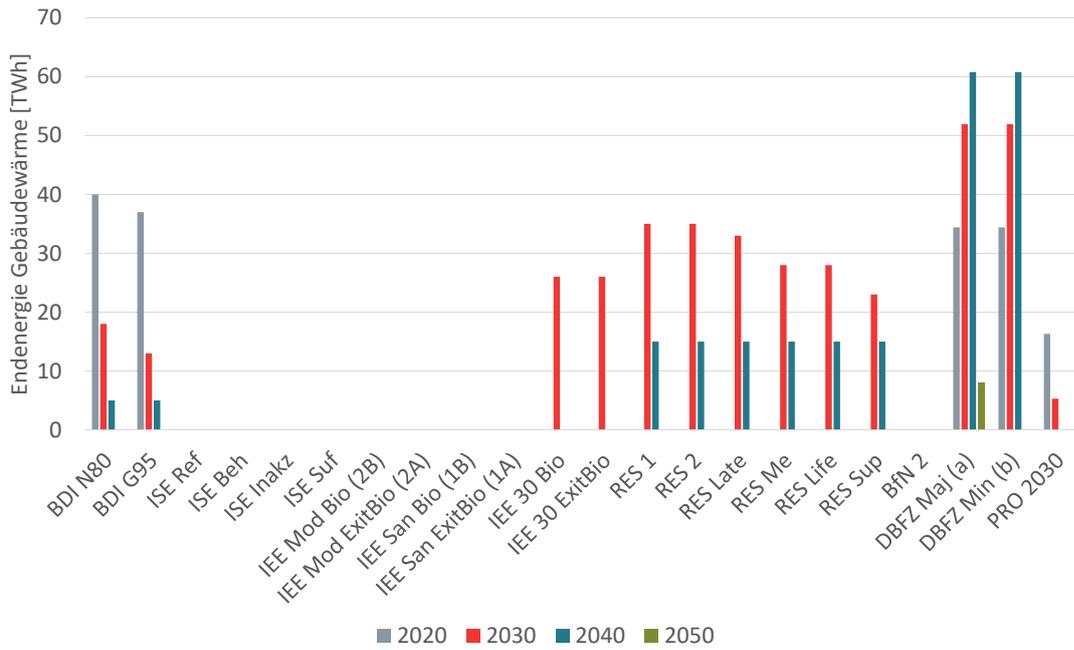


Abb. 37: Gebäudewärmeerzeugung aus Kohle.

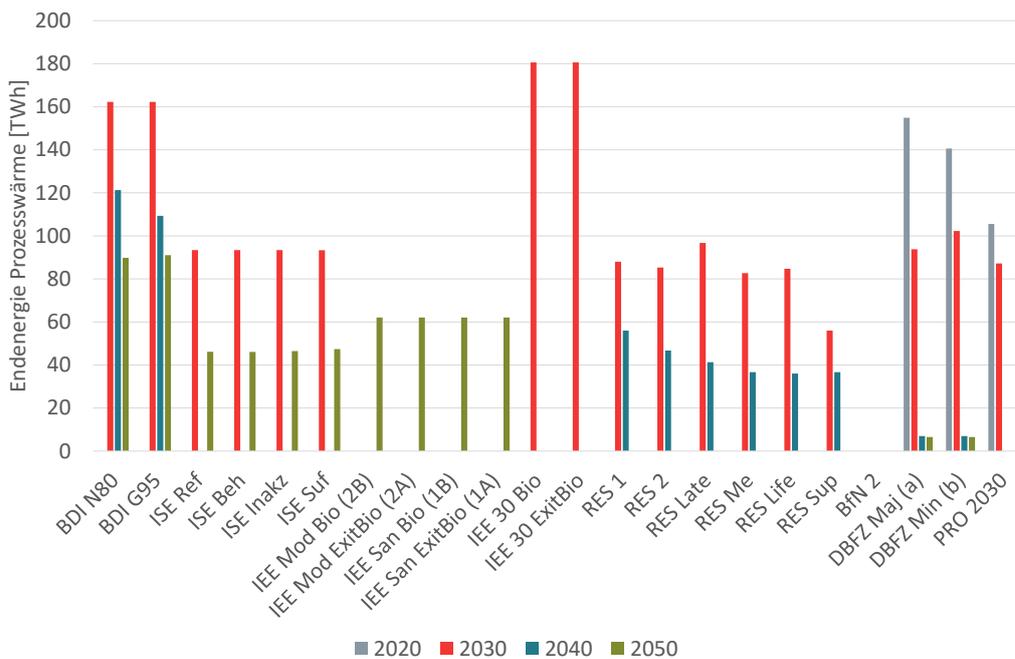


Abb. 38: Prozesswärme aus Kohle.

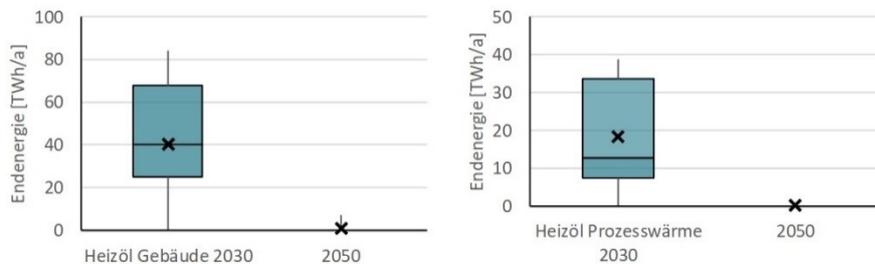


Abb. 39: Bandbreite der Szenarienergebnisse: Wärmeerzeugung aus Erdöl in den Jahren 2030 und 2050.

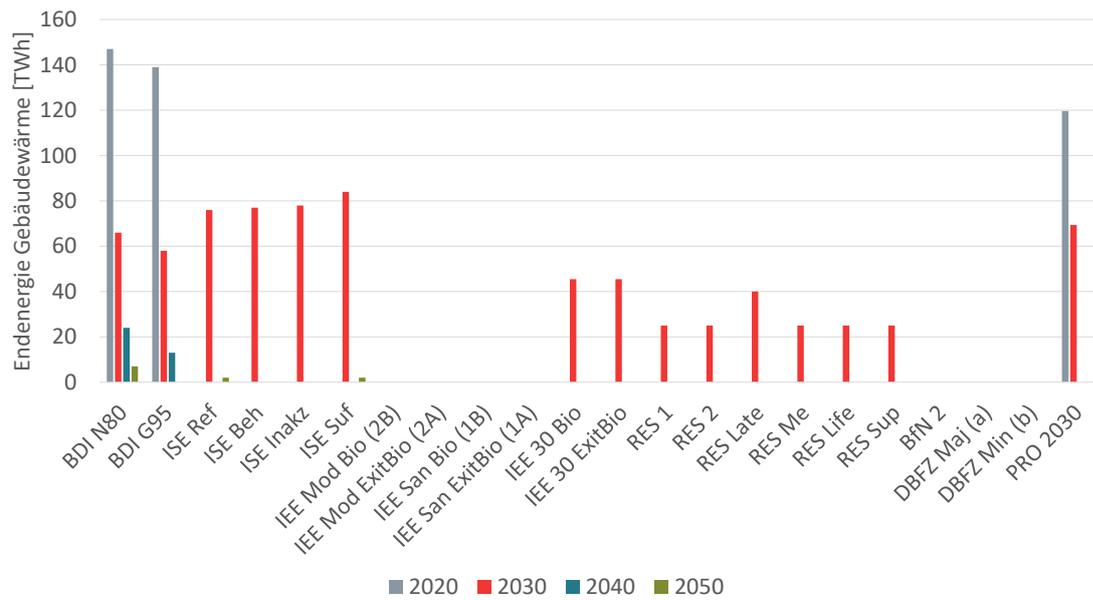


Abb. 40: Gebäudewärmeerzeugung aus Erdöl.

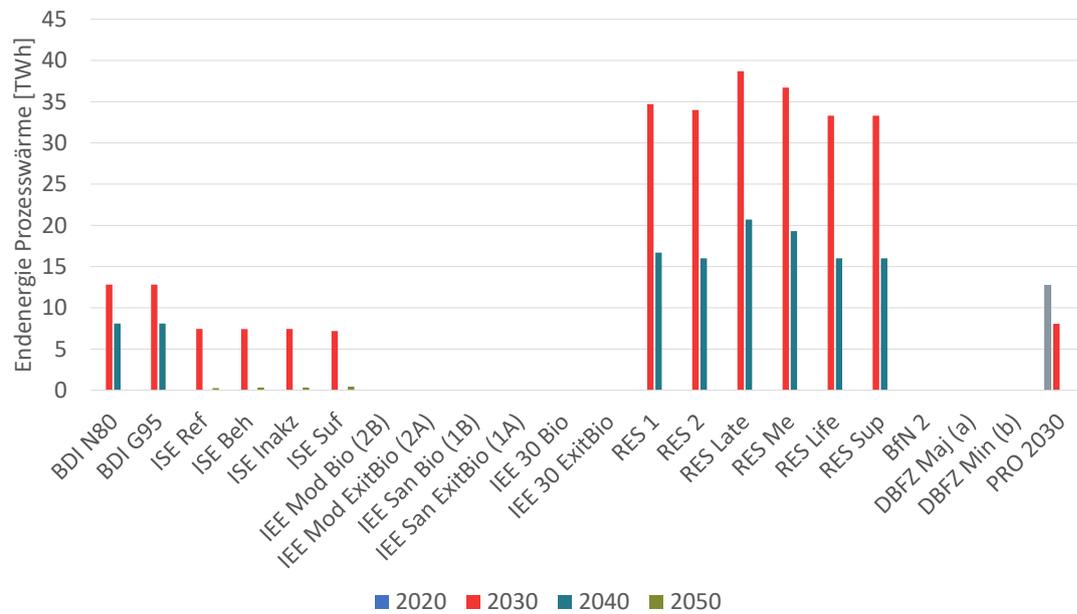


Abb. 41: Prozesswärmeezeugung aus Erdöl.

4.4. Bewertung und Vergleich der Szenarien

In diesem Abschnitt wird ein Vergleich der Szenarien untereinander nach Effizienzkriterien dargestellt, sofern eine volkswirtschaftliche, ressourcen- oder flächenorientierte Bewertung im Rahmen der Studie durchgeführt wurde.

Zudem werden die wichtigsten Schlussfolgerungen für Stellgrößen des Wärmemarktes erläutert, die sich anhand der Modellierungen erschließen.

Volkswirtschaftlicher Vergleich und Systemsicht

Die beiden Zielszenarien BDI N80 und G95 (Gerbert et al. 2018) lassen sich anhand volkswirtschaftlicher Kriterien sowie der Vermeidungskosten miteinander vergleichen. Die Aussagekraft des Vergleichs ist jedoch begrenzt, da die Szenarien unterschiedliche Zielvorgaben haben. Es ist naheliegend, dass die CO₂-Vermeidungskosten und die volkswirtschaftlichen Mehrkosten für letzteres Szenario mit der angewendeten Berechnungsmethode (Vergleich der Investitionen) höher liegen.

Im Sektor Haushalte und GHD werden in BDI N80 rund 57 Mio. t CO₂e eingespart mit Vermeidungskosten von minus 105 €/t CO₂e bis plus 98 €/t CO₂e. BDI G95 spart zusätzliche 7 Mio. t CO₂e ein, die Maßnahmen für die zusätzlichen 15 Prozentpunkte sind allerdings Vermeidungskosten von 150 €/t CO₂e bis 370 €/t CO₂e anzusetzen. Die volkswirtschaftlichen Mehrinvestitionen betragen 480 Mrd. € (BDI N80) bzw. 690 Mrd. € (BDI G95).

Im Industriesektor wird die Kostenanalyse für den Bereich Prozesswärmeerzeugung nicht gesondert durchgeführt. Die gesamten Mehrinvestitionen in diesem Sektor betragen im BDI N80-Klimapfad etwa 120 Mrd. Euro, im BDI G95-Szenario 230 Mrd. Euro.

Die Szenarien der ISE-Studie (Sterchele et al. 2020) werden im Vergleich zum Business-as-usual (BAU)-Szenario anhand der Mehraufwendungen bewertet. Die geringsten Nettomehraufwendungen weist das Szenario ISE Suf mit 440 Mrd. € auf, gefolgt vom Szenario ISE Ref mit 1.580 Mrd. € und vom Szenario ISE Inakz mit 1.590 Mrd. €. Für die Entwicklung im Szenario ISE Beh sind mit 2.330 Mrd. €. Als Grund für die hohen Mehraufwendungen im Szenario ISE Beh wird mitunter angeführt, dass in diesem Szenario hohe Importe an synthetischen Brennstoffen vor allem in den Jahren 2040 bis 2050 nötig sind, da die Hälfte aller Heizungsanschlüsse weiterhin Gaskessel sind.

Unter den vier Szenarien der IEE-Studie (Gerhardt et al. 2019), die jeweils die Quoten für Gebäudesanierung und dezentrale Biomassenutzung variieren, ist das San ExitBio-Szenario mit hoher Sanierung und dem Ausstieg aus der dezentralen Nutzung das effizienteste. Der gesamtwirtschaftliche Kostenunterschied zum Mod ExitBio-Szenario ist gering. Die fehlende Effizienz einer dezentralen monovalenten Biomassenutzung führt bei den Bio-Szenarien zu höheren PtX-Importen von 60 bis 70 TWh gegenüber einer Verlagerung der Biomasse in zentrale Heizwerke effizienter Hybridsysteme im Fern- und Industrierwärmebereich.

In den Modellierungen der Rescue-Studie (Purr et al. 2019) erfolgt keine Kostenoptimierung unter Berücksichtigung der volkswirtschaftlichen Kosten, Umwelt- und Gesundheitskosten. Stattdessen erfolgt die Bewertung und der Vergleich der Szenarienergebnisse untereinander u. a. auf Basis der Rohstoffinanspruchnahme der verschiedenen Szenarien. Der Rückgang des Primärrohstoffkonsums (RMC) ist beim Szenario RES Sup am deutlichsten. Im Vergleich zum Primärrohstoffkonsum im Basisjahr 2010 von 1,37 Mrd. t werden bei der Entwicklung nach RES Sup 2050 70 % eingespart. Es folgen in der Reihenfolge absteigender Effizienz: RES Me (RMC -68 % 2050 im Vergleich zu 2010), RES Life (-63 %), RES 2 (-62 %), RES 1 (-61%) und RES Late (-56 %).

In der BfN-Studie (Walter et al. 2018) werden keine volkswirtschaftlichen Kriterien evaluiert, stattdessen werden die Szenarien u. a. anhand der Flächeninanspruchnahme von Wind- und PV-Anlagen miteinander verglichen und bewertet. Das dargestellte Szenario BfN 2 nimmt eine Fläche von insgesamt ca. 4.700 km² also 1,32 % der deutschen Landfläche für die Errichtung dieser Anlagen ein.

In der DBFZ-Studie (Jordan et al. 2019) findet kein Vergleich der Szenarien auf Basis von volkswirtschaftlichen Kriterien statt. Die Szenarien DBFZ Maj und Min werden lediglich in Hinblick auf die Biomassenutzung miteinander verglichen.

In der Prognos-Studie wird das Szenario PRO 30 anhand der Energieverbrauchswerte und der THG-Emissionsreduktion bewertet. Im Referenz-Szenario werden die THG-Emissionen aller Sektoren von 1.251 Mio. t CO₂e (1990) auf 731 Mio. t CO₂e (2030) gesenkt (-41,6 %). Mit Wirkung des KSPr 2030 ist es möglich, die Emissionen im Jahr 2030 auf 598 Mio. t CO₂e zu senken (-52,2 %).

Energieeffizienz

Effizienzmaßnahmen in den Bereichen Gebäudewärme und industrielle Prozesswärme werden in den Studien als zentrale Maßnahmen für die Wärmewende beschrieben.

Die BDI-Studie erläutert: „Zur Begrenzung der Kosten im Energiesystem wären auch in den nächsten Jahrzehnten weitere Steigerungen der Energieeffizienzgewinne bei Gebäuden (Sanierung), [...] [und] in der Industrie [...] nötig. Viele der dafür erforderlichen Investitionen sind zwar volkswirtschaftlich lohnenswert, aber durch höhere Kapitalkosten und abweichende Energieträgerpreise nicht zwangsläufig auch für betriebswirtschaftliche Entscheider. Außerdem gibt es in vielen Fällen praktische Hürden wie einen Mangel an Transparenz über Einsparmöglichkeiten, unübersichtliche Fördersysteme, wirtschaftliche alternative Investitionsmöglichkeiten, bis hin zu Investor-Nutzer-Dilemmata.“ (Gerbert et al. 2018).

Die IEE-Studie beschreibt den Kostenunterschied zwischen den ExitBio-Szenarien mit hoher oder moderater Sanierung hingegen als eher gering. Der höhere Wärmebedarf im IEE Mod ExitBio-Szenario könne durch EE-Wärme effizient bereitgestellt werden.

Effizienzmaßnahmen wie die energetische Gebäudesanierung nehmen in allen Szenarien der Rescue-Studie eine zentrale Rolle ein: „Es wird in allen Green-Szenarien daher unterstellt, dass die ordnungsrechtlichen Rahmenbedingungen und finanziellen Anreizmechanismen so ausgestaltet werden, dass bis spätestens 2030 keine Renovierungen oder Modernisierungen an der Gebäudehülle und Gebäudebauteilen mehr ohne gleichzeitige energetische Sanierung erfolgen“ (Purr et al. 2019). Die Sanierungsrate sei schnell auf mindestens das Zweieinhalbfache des heutigen Niveaus von 1 % zu erhöhen. Dafür müssten zeitnah wirksame politische Instrumente integriert werden. Beispiele sind, die Klimakosten von fossilem CO₂ bei den Brennstoffpreisen zu integrieren oder eine „Gebäude-Klimaabgabe mit Förderanspruch“, speziell um auch dem Mieter-Vermieter-Dilemma entgegenzuwirken. Als Dämmmaterialien werden in den RES-Szenarien hauptsächlich kunststoffbasierte und mineralische Stoffe berücksichtigt, in den Szenarien RES Me und RES Sup wird von einem erhöhten Anteil holzbasierter Dämmmaterialien ausgegangen. Der zunächst erhöhte Bedarf an Dämmmaterialien würde später durch Einsparungen von Rohstoffen zur Energieversorgung überkompensiert werden.

Bei verspäteter Umsetzung der hohen energetischen Effizienzstandards seien zur Erreichung des Zielzustands zu einem späteren Zeitpunkt viele rein energetische Sanierungen nötig, die unwirtschaftlicher als energetische Sanierungen im Zuge von Sanierungen, die ohnehin getätigt werden, sind.

Fernwärme

Der Ausbau neuer sowie die Verdichtung bestehender leitungsgebundener Wärmeversorgungsstrukturen werden in den Studien als wichtige Stellgrößen beschrieben.

Wärmenetze ermöglichen die Einbindung von Wärmeerzeugungstechnologien, die dezentral nicht effizient nutzbar sind. So wird durch die Nutzung von Skaleneffekten beispielsweise die Einbindung erneuerbarer Wärmequellen wie der Tiefengeothermie und der Umweltwärme erleichtert. Auch industrielle Abwärme kann in Fernwärmenetzen effizient transportiert und verteilt werden.

Laut BDI-Studie ist der Ausbau und die Verdichtung der Fernwärmeinfrastrukturen in Ballungsräumen erforderlich, zudem sollte Fernwärme möglichst aus emissionsfreien Quellen erzeugt werden.

Die IEE-Studie betont, dass für ein effizientes Gesamtsystem bei den ExitBio-Szenarien ein Hochlauf der Fernwärme nötig sei. Um das Wärmenetzpotenzial zu erschließen, sei der Ausbau eines Großteils der Netzinfrastruktur bereits bis zum Jahr 2030 nötig. Auch bei einer hohen Sanierungsrate im ambitionierten Dämmszenario IEE San ExitBio beträgt der angestrebte wirtschaftlichste Fernwärmeanschlussgrad 30 %. Bei einem heutigen Anschlussgrad von knapp 14 % bedeutet dies eine Verdopplung des Fernwärmebestands und eine Steigerung des aktuellen Netzausbaus um den Faktor 6 bis 7.

In der Rescue-Studie wird empfohlen, die leitungsgebundene Wärmeversorgung in urbanen Räumen wirtschaftlich attraktiv und treibhausgasneutral zu gestalten: „Zukunftsfähig sind moderne und flexible Strom-Wärme-Systeme, bspw. in Kombination mit Großwärmepumpen. Bisher ist der Förderrahmen für Großwärmepumpen sehr beschränkt, so dass diese effiziente Technik im Vergleich zur gut geförderten fossilen KWK sehr unattraktiv ist.“ (Purr et al. 2019). Hier bestehe dringender politischer Handlungsbedarf. Die Temperatur in Wärmenetzen solle zudem abgesenkt werden, um erneuerbare Wärmequellen besser nutzbar machen zu können.

Biomasseeinsatz

Durch ihre vielfältigen Einsatzmöglichkeiten stellt die Biomasse eine wichtige Option zur Reduktion der THG in allen Energiesektoren dar. Biomasse kann im Wärmesektor in verschiedenen Subsektoren bzw. Anwendungen eingesetzt werden. Dazu gehören die dezentrale Gebäudewärme (Nicht-ETS-Bereich), die Nah- und Fernwärmeerzeugung (ETS- sowie Nicht-ETS-Bereich) und die industrielle Prozesswärmeerzeugung (meist ETS-Bereich).

Der effizienteste Wärmemarkt besteht, wenn ein Ausstieg aus der dezentralen Biomassenutzung erfolgt. Zu diesem Ergebnis kommen unter anderem die ISE-Studie sowie die BDI-, IEE- und DBFZ-Studien, die diese Sensitivitäten untersuchen.

Das langfristig effizienteste Szenario der IEE-Studie beispielsweise ist das Szenario IEE San ExitBio, in dem der Ausstieg aus der dezentralen Biomassenutzung simuliert wird. Wird in den kommenden Jahren die dezentrale Biomassenutzung fortgeführt (entsprechend den IEE Bio-Szenarien), so wird zunächst das Sektorziel für Gebäudewärme 2030 leichter erreicht. Langfristig reduziert diese Transformation den notwendigen Markthochlauf von Alternativen (z. B. Wärmenetze und Wärmepumpen). Die weitere Nutzung von Biomasse bis 2030 stellt daher ein Hemmnis für die Verwirklichung eines effizienten Gesamtsystems im Jahr 2050 dar. Die IEE Bio-Szenarien führen durch den Fortgang der dezentralen monovalenten Biomassenutzung zu höheren PtX-Importen und einer geringeren Systemeffizienz. Um das Sektorziel 2030 zu erreichen, ohne Lock-In-Effekte zu erzeugen, kann Biomasse z. B. auch in Heizwerken im Nicht-ETS-Bereich in Wärmenetzen eingesetzt werden.

Eine zentrale Wärmeversorgung besteht zumeist aus mehreren Erzeugern, die im Hybridsystem in einer optimierten Regelung Grundlast, Mittellast und Spitzenlast abdecken. Biomasseheizwerke können in diesen Systemen andere EE-Wärmeerzeuger ergänzen. Dezentrale Systeme hingegen sind häufiger monovalent: Wird nur mit Biomasse der gesamte Wärmebedarf gedeckt, so wird diese Ressource an einer Stelle genutzt, an der auch alternative Lösungen kosteneffizient zur Verfügung stehen.

Die Modellierungen der DBFZ-Studie erfolgen sehr detailreich sowohl im zeitlichen Verlauf (jährliche Zeitschritte) als auch in Bezug auf die Biomasetechnologien im Wärmesektor. Anders als beispielsweise in der IEE-Studie, in der keine biomassebasierten Hybridsysteme in der dezentralen Gebäudewärme berücksichtigt werden, bezieht die DBFZ-Studie hybride Biomassensysteme für EFH und MFH ein, wie z. B. die Kombination aus Scheitholzofen und Solarthermieanlage. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass in den Jahren bis 2040/2045 Biomasse in Hybridsystemen im dezentralen Gebäudewärmesektor am wettbewerbsfähigsten ist (Szenario DBFZ Maj). Der Zeitpunkt um 2040/2045 stellt einen Wendepunkt dar, nach dem Biomasse in der dezentralen Wärmeerzeugung an Bedeutung verliert und zunehmend in industriellen Hochtemperaturanwendungen eingesetzt wird.

Auch beide BDI-Szenarien verzeichnen eine Transformation der Biomassenutzung vom dezentralen Gebäudewärmebereich hin zur Prozesswärmeerzeugung. Die Studie betont außerdem, dass für eine kostenoptimale Senkung der industriellen Energieemissionen eine aktive Lenkung der Biomasse aus den weniger effizienten Einsatzfeldern (z. B. Strom und Gebäudewärme) in die Industrie erforderlich sei. Daher sollten die aktuellen Anreiz- und Förderstrukturen des Einsatzes von Biomasse für Gebäudewärme, wie z. B. die Förderung von Pelletheizungen abgebaut werden. Damit Biomasse in effiziente Anwendungen gelenkt wird, bedarf es laut BDI-Studie auch gezielter Informationskampagnen, um Akzeptanz für den Rückgang der Biomassenutzung zu schaffen. Dies betreffe insbesondere Landwirte (Biogasanlagen als Geschäftsmodell) und Besitzer von Kaminöfen.

Die Prognos-Studie bietet einen interessanten Abgleich mit den Zielszenarien der anderen Studien, da im PRO 2030-Szenario die Entwicklung bis 2030 unter den aktuellen Maßnahmen des KSPR 2030 dargestellt werden. Auch die Auswirkung des BEHG wird in dieser Studie bereits berücksichtigt in Form von höheren Preisen für fossile Brennstoffe aufgrund der CO₂-Steuer.

Die Biomassenutzung in der dezentralen Wärmeerzeugung ist im Jahr 2030 vergleichbar mit der in den IEE Bio-Szenarien.

Bleibt das aktuelle System mit den bestehenden Anreiz- und Fördermechanismen bestehen, ist daher bis 2030 kein Rückgang der dezentralen Biomassenutzung zu erwarten.

Power-to-Gas

In den Studien werden der erforderliche Markthochlauf und der Aufbau heimischer Märkte für PtG-Anlagen als wichtiger Aspekt angeführt.

Insbesondere der Ersatz fossilen Erdgases mit synthetischem Methan im BDI G95-Szenario mache ein zentrale politische Richtungsentscheidungen nötig, um ab 2030 mit dem Bau von PtG-Anlagen zu beginnen. Untrennbar verbunden mit dieser Strategie sind auch der Ausbau der EE-Stromerzeugung sowie des Stromnetzes.

Die ISE-Studie kommt zu dem Ergebnis, dass die kontinuierliche Weiterentwicklung relevanter Technologien sowie der Aufbau von Heimatmärkten für bestimmte zukunftsrelevante Bereiche zur Kostenoptimierung beitragen. Beispielsweise sollten die inländische Produktion, Weiterverarbeitung und Nutzung von Wasserstoff in vielfältigen Anwendungsbereichen vorangetrieben werden.

Auch in der Rescue-Studie erfolgt ein Hochlauf der Erzeugung von synthetischen Brennstoffen in der Prozesswärmeerzeugung. Dabei wird betont, dass in der dezentralen Raumwärmeversorgung vor dem Hintergrund vielzähliger erneuerbarer Alternativen keine Integration von PtG erfolgen sollte. Dementsprechend wird von einer Förderung von PtG im dezentralen Wärmesektor abgeraten. Auch in der Prozesswärmeerzeugung sollten strombasierte Brennstoffe aufgrund der erheblichen Umwandlungsverluste nur dort zum Einsatz kommen, wo die direkte Nutzung von Strom aus technischen Gründen nicht möglich ist.

Wärmepumpen

Insbesondere in der dezentralen Wärmeversorgung wird dem Markthochlauf von Wärmepumpen eine wirksame Rolle in der Wärmewende zugewiesen.

In der IEE-Studie wird beschrieben, dass für Wärmepumpen insbesondere im dezentralen Bereich ein Markthochlauf nötig sei, um ein möglichst effizientes Gesamtsystem (IEE ExitBio) zu erreichen. Wärmepumpen sollten beim ersten oder beim zweiten Kesseltausch bis 2050 installiert werden. Ansätze zur Förderung für (Groß-)Wärmepumpen könnten arbeitspreisbezogene Förderungen oder Ausnahmen in der Netzgeldinfrastruktur für unterbrechbare oder atypische Stromverbraucher sein, sodass neben der Nutzung von KWK-Eigenstrom auch ein Fremdstrombezug für den Wärmepumpenbetrieb wirtschaftlich ist.

Die BDI-Studie fordert Anreize, um ab 2025 bei fast jedem Heizungsaustausch eine niedrigemittierende Wärmelösung einzusetzen.

Elektrische Wärmepumpen sind laut ISE-Studie wichtig für die kostengünstige Umsetzung der Energiewende im Wärmesektor, allerdings bestehen gerade im städtischen Raum Restriktionen hinsichtlich der Erschließung von Wärmequellen. Außerdem können Schallemissionen zu Akzeptanzproblemen führen. Es wird daher empfohlen, angepasste Lösungskonzepte zu entwickeln.

Wärmepumpen, die z. B. die Erdwärme oder die Umgebungsluft als Wärmequelle nutzen, sind laut Rescue-Studie als sehr effiziente dezentrale Heiztechniken besonders zu fördern.

Übergreifende Faktoren

Neben den genannten thematischen Bereichen wird in den Studien die Bedeutung von übergreifenden Stellgrößen hervorgehoben, die sich in allen Themen wiederfinden. Darunter werden hier Forschung und Innovation, Ausbildung und Qualifizierung sowie Öffentlichkeit und Akzeptanz gefasst.

In der BDI-Studie wird die Rolle von Innovation und Forschung hervorgehoben, um Zukunftstechnologien und Game-Changer zur Anwendungsreife in den Markt zu begleiten. Bedarf bestehe vor allem in den Bereichen Erneuerbare Energien, Werkstoffe für Effizienztechnologien, digitale Systemlösungen und Optimierung im Rahmen der Sektorenkopplung, systemrelevante Zukunftstechnologien wie PtG, CCU und CCS. Auch zukünftig werden weiterhin Restemissionen verbleiben, u. a. bei der Abfallverbrennung und bei der Verbrennung von synthetischem Methan. Mittelfristig sei die CCS-Technologie daher unverzichtbar und Instrumente nötig, um ab 2030 mit dem Bau von CCS-Anlagen zu beginnen.

Die ISE-Studie hebt die Bedeutung von angewandter Forschung hervor, die zu einer Akzeptanzsteigerung von neuen Technologien beitragen kann. Die Forschung solle nicht nur Komponenten entwickeln, sondern auch Beiträge zur größeren Marktintegration liefern, wie dies beispielsweise beim Konzept der integrierten PV-Technologie geschehen ist und für weitere Technologien und deren Systemintegration, wie z. B. Wärmepumpen möglich ist.

Um Kapazitäten zur Umsetzung zu schaffen, ist laut BDI-Studie eine Ausbildungs- und Qualifizierungsinitiative für die Umsetzung der Klimapfade flankierend unabdingbar. Fachkräfte sind u. a. nötig zur Installation von Wärmepumpen, für die Gebäudeautomation und -sanierung für den Ausbau von Erneuerbaren Erzeugungstechnologien und Netzen.

Menschen gestalten mit ihren Investitionsentscheidungen und ihrem Verhalten die Energie- und Wärmewende. Das öffentliche Meinungsbild und die Akzeptanz, die Einstellung jeder Einzelperson und die Bereitschaft, zur Wärmewende beizutragen sind daher relevante Faktoren. In der ISE-Studie wird dies besonders deutlich: Im ISE Suf-Szenario führen Verhaltensänderungen in weiten Teilen der Gesellschaft zu einem sparsamen Umgang mit Energie. Dieses Szenario ist das mit Abstand günstigste Szenario der ISE-Studie. Beispielsweise ist die Bereitschaft, von der Nutzung konventioneller verbrennungs-basierter Techniken zur Wärmeversorgung abzusehen ein wichtiger Baustein in der Energiewende, der das Potenzial hat, die Gesamtkosten für die Energiewende zu senken.

5. Wirkung der Technologien, Effizienzmaßnahmen und Infrastrukturen im Wärmesektor auf Natur, Landschaft und Fläche

Die erforderliche Steigerung der Erzeugung von Wärme und Kälte aus erneuerbaren Energien setzt die Etablierung von in Deutschland bisher nicht oder wenig verbreiteten Technologien voraus. Sie ist stärker als die fossilen Energiequellen in die lokalen Wirkungsgefüge eingebettet und von diesen abhängig. Für viele erneuerbare Wärmequellen sind die lokalen Rohstoff- oder Umweltwärme-Potenziale ausschlaggebend.

Durch diese Technologien und ihre Infrastrukturen ergeben sich Veränderungen der Natur und Landschaft mit positiven und negativen Auswirkungen auf die lokalen Naturräume. Dies hängt insbesondere von der verwendeten Technologie, den lokalen Akteuren, der spezifischen Ausführung und den gültigen Rechtsnormen ab.

In diesem Kapitel werden die Technologien zur erneuerbaren Wärme- und Kälteerzeugung, Effizienzmaßnahmen an Gebäuden und Wärmenetzen sowie Infrastrukturanpassungen (Wärmenetzausbau/-verdichtung) in Hinblick auf ihre Wirkung auf Naturschutz, Landschaft und Fläche beschrieben.

Dafür werden die Technologien zur Erzeugung und Speicherung von erneuerbarer Wärme zunächst in Hinblick auf ihre Wirkung auf Natur und Landschaft beschrieben und ihre Flächeninanspruchnahme miteinander verglichen. Ergebnisse dieser Arbeitsschritte sind Steckbriefe (Natur- und Landschaftswirkung der TEIs) sowie die Flächenbedarfe der jeweiligen Technologien zur Erzeugung einer Wärmeeinheit in m^2/MWh . In den jeweiligen Abschnitten innerhalb des Kapitels werden die getroffenen Annahmen zur Ermittlung des Flächenbedarfs dargestellt.

Für potenziell negative Auswirkungen werden ggf. Maßnahmen vorgeschlagen, deren Berücksichtigung zu einer Vermeidung oder Verminderung der negativen Auswirkungen auf Natur und Landschaft führen kann. Ausgleichsmaßnahmen werden, da sie in der Regel technologieübergreifend angewendet werden, nicht aufgeführt.

Für die Bewertung der Auswirkungen auf den Naturschutz werden die Kategorien „Tiere, Pflanzen, biologische Vielfalt“, „Boden/Fläche“, „Wasser“, „Klima/Luft“ und „Landschaft“ unterschieden.

In Hinblick auf den Landschaftsschutz werden folgende Aspekte einbezogen: Landschaftsbild, Sicherung der Vielfalt und Eigenart der Landschaft und Verhinderung von Landschaftszerstörungen.

5.1. Wirkung auf Natur und Landschaft

In diesem Abschnitt werden die Technologien, Effizienzmaßnahmen und Infrastrukturen im Hinblick auf ihre Wirkung auf Natur und Landschaft untersucht, bevor sie im nächsten Kapitel gesondert auf ihre Flächenwirkung untersucht werden.

Für folgende Technologien werden ausführliche Steckbriefe erstellt, in denen die potenziellen Auswirkungen auf Naturschutz und Landschaft dargestellt sind, sowie mögliche Vermeidungs- und Verminderungsmaßnahmen beschrieben werden:

- Wärmepumpe,
- Solarthermie,
- Verbrennung von Anbaubiomasse (KUP),
- Verbrennung von holziger Biomasse (Waldholz inkl. Reststoffe),
- Vergärung von Anbaubiomasse (NawaRo),
- Vergärung von Rest- und Abfallstoffen (Gülle),
- Gebäudeeffizienz: Dämmung und Dach- bzw. Fassadenbegrünung.

Die Steckbriefe sind gegliedert in die Kategorien:

- Tiere, Pflanzen, biologische Vielfalt,
- Boden/Fläche,
- Wasser,
- Klima/Luft,
- Landschaft.

Den jeweiligen Kategorien sind konkrete Ziele des Naturschutzes untergeordnet.

Für die weiteren TEIs werden relevante Forschungsergebnisse zusammengeführt und entwickelt sowie in einigen Fällen auf weiterführende Literatur verwiesen.

5.1.1. Erneuerbarer Strom

Die Energiewende im Strombereich führt zu größeren Flächenbedarfen als die bisherige auf fossilen Energieträgern basierende Stromerzeugung. Da die Wärmebereitstellung zunehmend strombasiert erfolgt, führt der damit verbundene Strommehrbedarf zu einer weiteren Zunahme des Flächenbedarfs für Erneuerbare Energien.

Mit den steigenden Raumansprüchen wächst auch der Druck auf den Naturschutz, beispielsweise in Hinblick auf den Artenschutz und die biologische Vielfalt. Das Landschaftsbild wird nachhaltig beeinflusst und verändert.

So sind Onshore-WEA beispielsweise aufgrund ihrer Größe (Gesamthöhe von bis zu 230 m) weithin sichtbar und beeinflussen damit das Landschaftsbild erheblich. Zudem stellen sie ein Risiko für windenergiesensible Arten dar, wie beispielsweise einige Vogelarten und Fledermäuse (LAG SV 2014). Im Rahmen der Genehmigung von WEA wird das Ausmaß des Eingriffs bestimmt und ggf. entsprechende Vermeidungs-, Ausgleichs- oder Ersatzmaßnahmen festgelegt.

Offshore-WEA haben ebenfalls erhebliche Auswirkungen auf die Natur. In der Bauphase stellt das Rammen der Fundamente eine erhebliche Lärmbelästigung für die Meeresumwelt, insbesondere für Meeressäuger (z. B. Schweinswale) dar. Auch der Betrieb und die Wartung der Anlagen stellen Risiken dar. Die Migrationsrouten von See- und Zugvögeln können zerschnitten werden, zudem gehen Rast- und Nahrungsgebiete verloren und Kollisionen mit den Rotoren sind möglich (Garthe et al. 2018). Es gilt daher, neue Techniken zur Minimierung des Schalls oder neue Konzepte für die Installation von Fundamenten einzusetzen, sowie die Auswirkungen auf Zugvögel, Seevögel und Fledermäuse zu minimieren. Durch den Wegfall der

fischereilichen Nutzung in Offshore-Windparks können einige Fischarten diese als Rückzugsorte nutzen, sodass sich Fischbestände während des Betriebs dieser Anlagen teilweise wieder erholen. Der Lebensraum für Seevögel bleibt hingegen durch den Betrieb der Anlagen gestört.

Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) können ebenfalls Auswirkungen auf die Lebensräume von Tierarten haben und die Vegetation verändern, indem es zu punktuellen Versiegelungen (max. 5 % der Gesamtfläche) und zur Überschattung sowie Überschirmung von Flächen kommt. Aus naturschutzfachlicher Sicht können positive Effekte erzielt werden, wenn die Module auf zuvor intensiv bewirtschafteten Flächen installiert sind. Ackerland kann im Zuge der Anlagenrealisierung umgewidmet werden in extensiv bewirtschaftetes Grünland, wodurch auch nach der Nutzungsdauer der positive Wandel fortgeführt wird. Werden hingegen bereits bestehende Grünlandflächen (z. B. Konversionsflächen) für PV-Anlagen genutzt, ist dies aus naturschutzfachlicher Sicht eher problematisch.

Die Auswirkungen der erneuerbaren Stromerzeugung auf den Naturschutz und auf das Landschaftsbild wurden bereits umfassender untersucht als jene erneuerbarer Wärmeherzeugung. Die Projekte des Forschungsschwerpunkts Erneuerbare Energien und Naturschutz des Bundesamtes für Naturschutz bilden eine wichtige Erkenntnisbasis zu den Auswirkungen von Windenergie (Onshore und Offshore), Bioenergie, Photovoltaik und Wasserkraft⁶.

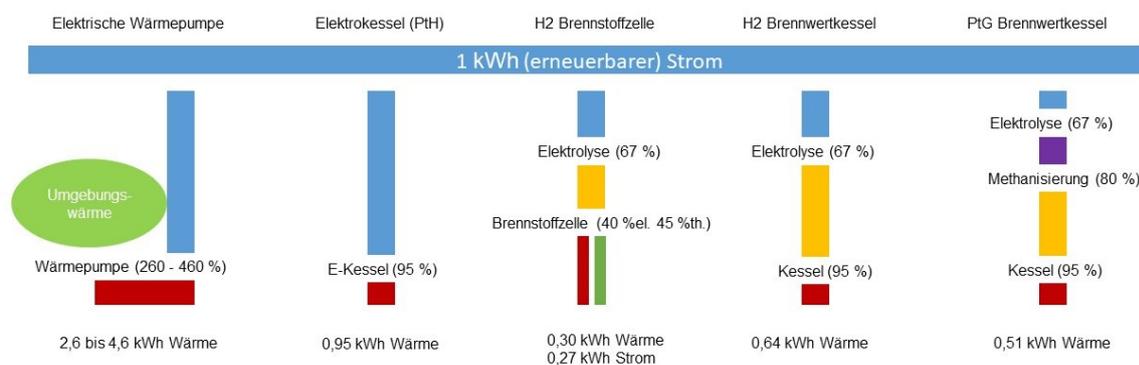


Abb. 42: Umwandlungseffizienzen von Strom in Wärme mittels Wärmepumpe, Elektrokessel (PtH) und synthetischen Brennstoffen (Wasserstoff und Methan). Quelle: Hamburg Institut auf Basis von BMWi (2021): Dialog Klimaneutrale Wärme.

5.1.2. Power-to-Heat

In PtH-Anlagen wird aus erneuerbarem Strom in einem Verhältnis von etwa 1:1 Wärme erzeugt (vgl. Elektrokessel Abb. 42). Für die Umwandlung werden Elektrodenkessel oder Elektroheizkessel betrieben. Diese Kessel selbst haben eine geringe Naturschutz- und Landschaftswirkung. Bedeutsamer ist die Erzeugung von erneuerbarem Strom und die damit einhergehenden Auswirkungen auf Natur und Landschaft.

Der Betrieb von PtH-Anlagen ist in vielen Fällen effizienter in Kombination mit Wärmespeichern, da die Anlagen bei einer strommarktorientierten Fahrweise wirtschaftlicher sind und somit auch in Zeiten geringer Nachfrage Wärme erzeugen.

Neben der Bereitstellung des EE-Stroms und den damit verbundenen Auswirkungen auf Naturschutz und Landschaft sind daher auch die Auswirkungen der Wärmespeicher in Verbindung mit PtH zu berücksichtigen.

⁶ Mögliche Auswirkungen des EE-Strom-Ausbaus werden beispielsweise im „Erneuerbare Energien Report“ des Bundesamtes für Naturschutz (Bosch et al. 2020) detailliert beschrieben.

5.1.3. Power-to-Gas

In Anlagen zur Erzeugung von synthetischen erneuerbaren Gasen wird mittels Strom Wasserstoffelektrolyse und ggf. Methanisierung betrieben. Zur Wärmeerzeugung werden die Brennstoffe in Brennstoffzellen oder Gas-KWK bzw. Kesseln eingesetzt. Zur Speicherung und zum Transport sind (mobile) Gasspeicher und/oder eine leitungsgebundene Gasinfrastruktur erforderlich.

Die Sicherheit der PtG-Erzeugungs- sowie Speicheranlagen, beispielsweise im Hinblick auf Immissions- und Explosionsschutz, ist für den Naturschutz relevant. Bei sachgemäßer Planung, Bau- und Betriebsweise der Anlagen sind i. d. R. keine relevanten Auswirkungen auf Naturschutz und Landschaft feststellbar.

PtG-Anlagen sind in vielen Fällen nicht an bestimmte Standortbedingungen gebunden und können auch an Standorten realisiert werden, die keinen besonderen ökologischen Wert aufweisen. Dazu gehören beispielsweise Gewerbe- und Industriegebiete. Werden entsprechende Standorte gewählt, so ist auch eine negative Beeinflussung des Landschaftsbildes vermeidbar.

5.1.4. Wärmepumpe

Die erneuerbare Wärmeerzeugung mittels Wärmepumpen (WP) setzt die Erschließung einer Umgebungswärmequelle sowie die Installation der Anlagenkomponenten der Wärmepumpe und die Nutzung von erneuerbarem Strom voraus.

Diese Aspekte können Auswirkungen auf den Naturschutz und die Landschaft haben. Je nach verwendeter Wärmequelle und Art der Erschließung sowie Ausgestaltung des Systems können sehr unterschiedliche Naturschutzbelange betroffen sein. In dem Steckbrief in Tab. 8 werden die Auswirkungen auf Naturschutzziele und Landschaftsschutz für Großwärmepumpen beschrieben. Es werden Auswirkungen von Luftwärmepumpen, Erdsonden- und Grundwasserwärmepumpen sowie Oberflächenwasserwärmepumpen beschrieben. In einem Exkurs werden die möglichen Auswirkungen von kleineren dezentralen Wärmepumpen (LuftWP und Erdkollektoren) auf die Natur beschrieben.

Tab. 8: Steckbrief Natur- und Landschaftswirkung von Wärmepumpen.

Technologie: Großwärmepumpe		
Kategorie/Ziel	Erläuterung potenzieller Auswirkungen	Mögliche Vermeidungs-/ Verminderungsmaßnahmen
Tiere, Pflanzen, biologische Vielfalt		
Schutz von Tieren, Pflanzen und deren Lebensräumen	Beeinträchtigung von Tieren durch Fließwasserentnahme, z. B. Einsaugen von Fischen (OberflächenwasserWP mit offenem System)	Auswahl passender Entnahmestellen Filteraufsätze und ggf. Fischscheuchanlagen für Entnahmeverrichtung
	Leichte lokale Abkühlung des Gewässers (OberflächenwasserWP): Auswirkung auf Lebensraum der Fische artenabhängig: Karpfenartige und Exoten werden eher beeinträchtigt Lachsartige profitieren eher (Küttel et al. 2002)	Vermeiden von Cold Spots durch Jet-Aufsätze für Verwirbelung und homogenere Temperaturverteilung geeignete Entnahmestellen (Abkühlung sehr gering, lokaler Effekt, vermischt sich später wieder)
	Durch Bohrungen Beeinträchtigung im Boden lebender Tier- und Pflanzenarten (GrundwasserWP, ErdsondenWP)	Sachgemäße Durchführung der Bohrungen und geeignete Standortwahl
	Beeinträchtigung von Lebensräumen durch Schallemissionen von LuftWP	Beachtung der nach TA Lärm zulässigen Emissionen Einhausung und aktiver Lärmschutz durch bauliche Maßnahmen (WP vom Baukörper entkoppelt installieren, Betonfundament setzen, Gummimatte unterlegen, Geräuschdämmung)
Schutzgebiete und Biotopverbundsystem	Keine direkte Auswirkung	/
Regionstypische Biodiversität sichern	Keine direkte Auswirkung	/
Boden/Fläche		
Sicherung oder Wiederherstellung der Bodenfunktion und -struktur	Bohrungen für die Installation von Erdsonden und zu Grundwasserleitern können lokal die Bodenstruktur verändern (ErdsondenWP, GrundwasserWP)	Sachgemäße Durchführung der Bohrungen, ggf. Qualitätsvoraussetzungen erforderlich machen (Zertifikatprüfung durch Genehmigungsbehörden)
	Kühlung und ggf. Vereisung des Erdreichs (beim Heizbetrieb) bzw. Erwärmung (beim Kühlbetrieb) in Umgebung der Erdsonden von WP	WP entsprechend technisch auslegen
Senkung der Schadstoffbelastung im Boden	Belastung des Bodens durch Austritt von Kältemittel bei Leckage (ErdsondenWP)	Sachgemäßer Betrieb und regelmäßige Instandhaltung der WP; Verwendung natürlicher Kältemittel

Technologie: Großwärmepumpe		
Kategorie/Ziel	Erläuterung potenzieller Auswirkungen	Mögliche Vermeidungs-/ Verminderungsmaßnahmen
Wasser		
Gute ökologische und chemische Qualität der Oberflächengewässer	Leichte lokale Abkühlung des Gewässers (OberflächenwasserWP): Nährstoffprozesse und Eutrophierung stehender Gewässer können positiv beeinflusst werden	/
	Lokale Veränderung des Durchflusses bzw. der Morphologie von Fließgewässern durch Wasserentnahme und Wiedereinleitung (OberflächenwasserWP mit offenem System)	Geringe Entnahmemengen geeignete Entnahmestellen Verwendung von Jet-Aufsätzen zur Verwirbelung und Wiederherstellung der Durchflussmorphologie
Gute ökologische und chemische Qualität der Oberflächengewässer	Verunreinigung des Wassers mit Kältemittel bei Leckage von Rohrleitungen des Kältemittelkreislaufs (OberflächenwasserWP mit geschlossenem System)	Geeignete Konzeption, Trennung mehrerer Kreisläufe Sachgemäßer Betrieb Regelmäßige Instandhaltung und Wartung
Guter chemischer und mengenmäßiger Zustand des Grundwassers	Verunreinigungen durch Schadensfälle bei unsachgemäßen Bohrungen zu Grundwasserleitern oder für Erdsonden (GrundwasserWP, ErdsondenWP)	Sachgemäße Durchführung der Bohrungen
	Entnahme des Grundwassers, daher lokal reduzierte Grundwassermenge (GrundwasserWP)	Bei Standortwahl Grundwasserstandsmessungen und -durchfluss berücksichtigen
Klima/Luft		
Minderung der Treibhausgasemissionen	Verdrängung von Wärmeerzeugung durch fossile Energieträger (v.a. Erdgas und Öl) Austritt klimarelevanter Kältemittel bei Leckage, Inbetriebnahme oder Wartung	Verwendung natürlicher anstatt synthetischer Kältemittel Reduktion der Kältemittelmenge
Erhalt/Entwicklung klimarelevanter Räume und Verbesserung des urbanen Mikroklimas	Keine direkte Auswirkung	/
Minderung der Luftschadstoffe mit schädlicher Auswirkung auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt	Verdrängung von Wärmeerzeugung durch fossile Energieträger (v.a. Erdgas und Öl) sowie wenig effizienter Scheitholzöfen, dadurch weniger Luftschadstoffe und Feinstaub	/
Landschaft		
Sicherung und Weiterentwicklung der Landschaft in ihrer Vielfalt und Eigenart	Beeinflussung des Landschaftsbildes durch Installation von WP in industriellem Maßstab in ober- oder unterirdischen Gebäuden	Geeignete Standortwahl Möglichkeit der unterirdischen Installation von WP prüfen Einbindung in das Landschaftsbild durch gestalterische Maßnahmen

Technologie: Großwärmepumpe		
Kategorie/Ziel	Erläuterung potenzieller Auswirkungen	Mögliche Vermeidungs-/ Verminderungsmaßnahmen
		Überbauung oder Gestaltung der Fläche oberhalb von Erdsondenfeldern

Bei der Wärmeerzeugung mit industriellen Großwärmepumpen gibt es Schnittstellen mit verschiedenen Umweltschutzgütern. Nachteilige Auswirkungen sind größtenteils durch die bauliche Auslegung sowie den sachgemäßen Betrieb der Wärmepumpenanlagen vermeidbar bzw. stark reduzierbar.

Wärmepumpen mit Schnittstellen zu Oberflächengewässern haben vielseitige Auswirkungen auf den Natur- und Landschaftsschutz. Von einer temporären leichten lokalen Abkühlung von Oberflächengewässern beim Heizbetrieb der Wärmepumpe profitieren vor allem heimische lachsartige Fischarten (z. B. Forellen). Fischarten wie z. B. karpfenartige oder Exoten hingegen werden von einer reduzierten Wassertemperatur eher beeinträchtigt. In bestimmten Fällen kann die Eutrophierung von Gewässern sowie das Wachstum von Phytoplankton verlangsamt werden.

Bei der Nutzung von Oberflächengewässern zur Wärmeauskopplung werden naturschutzfachliche Belange im Rahmen der Genehmigung geprüft. Wichtige Maßnahmen im Hinblick auf Naturschutzaspekte sind die Standortwahl, die Trennung des Kältemittelkreislaufs vom Gewässer durch die Verwendung mehrstufiger Prozesse und das Verwenden von Jet-Aufsätzen zur Verwirbelung und Wiederherstellung der Durchflussmorphologie im Gewässer.

Bei der oberflächennahen Geothermie werden Erdwärmesonden über Erschließungsbohrungen in den Untergrund eingelassen. Ökologisch sensible Gebiete (z. B. Wasserschutzgebiete) gelten als Restriktionszonen für die oberflächennahe Geothermie. In zulässigen oder bedingt zulässigen Gebieten werden die geophysikalischen und hydrogeologischen Bodenparameter berücksichtigt sowie Bodennutzungsbeschränkungen befolgt, um Auswirkungen auf den Naturschutz zu vermeiden. Detaillierte Vorschriften und vielfältige Schutzvorschriften sind darauf ausgelegt, bei Planung, Genehmigung und Ausführung, beim Ausbau von Bohrungen und beim Bau der Wärmepumpenanlage die Umweltbelastungen zu reduzieren (Purr et al. 2019).

Grundwasserwärmepumpen können je nach Standort und Ausführung nachteilige Auswirkungen auf die Grundwassermenge sowie -qualität haben und sind daher nur unter bestimmten wasserwirtschaftlichen und hydrogeologischen Voraussetzungen und entsprechenden Genehmigungen möglich. Für Erdsonden- und Grundwasserwärmepumpen sind Bohrungen erforderlich, die bei sachgemäßer Durchführung entsprechend aktuell gültigen Qualitätsanforderungen üblicherweise wenig relevante Naturschutzauswirkungen haben. Mögliche Beeinträchtigungen der Bodenstruktur durch bestehende Georisiken (z. B. Zonen mit starker tektonischer Auflockerung) sind im Vorfeld der Planung bei den Behörden zu erfragen und auszuschließen. Durch die technische Auslegung der Wärmepumpe wird in der Regel eine Vereisung in der Umgebung der Erdsonden ausgeschlossen. Nachteilige Auswirkungen durch die lokale Abkühlung des Erdreichs auf im Boden lebende Tiere oder Pflanzen sind in der üblichen Verlegungstiefe der Erdsonden nicht zu erwarten.

In einigen Wärmepumpen werden synthetische Kältemittel wie Fluorkohlenwasserstoffe oder teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe verwendet, die klimaaktiv sind und bei Entweichen aus dem Kältemittelkreislauf durch Leckage oder bei unsachgemäßer Inbetriebnahme oder Wartung der Wärmepumpe zum Treibhauseffekt beitragen. Mit der Verwendung natürlicher Kältemittel im Wärmepumpenkreislauf sowie durch sachgemäße Durchführung der

Inbetriebnahme- und Wartungsaktivitäten durch entsprechend ausgebildetes Fachpersonal werden nachteilige Auswirkungen vermieden.

Demzufolge kann der Einsatz von Großwärmepumpen zur Wärmeerzeugung als eher natur-schutzfreundliche Technologie mit geringen und größtenteils vermeidbaren bzw. kompensierbaren Umweltauswirkungen bezeichnet werden.

Exkurs: Dezentrale Kleinwärmepumpen

Als Wärmepumpen im unteren Leistungsbereich für Direktverbraucher in Privathaushalten kommen z. B. Luftwärmepumpen und Erdkollektorwärmepumpen in Frage.

Bei Luftwärmepumpen entstehen Schallemissionen durch das Gebläse. Diese sind durch die Wahl eines geeigneten Aufstellungsortes und durch fachgerechte Installation weitestgehend vermeidbar oder zumindest reduzierbar. Die Emissionsgrenzen der TA Lärm müssen eingehalten werden, um nachteilige Auswirkungen zu vermeiden. Zur Senkung der tieffrequenten Schallemissionen stehen zahlreiche technische und bauliche Maßnahmen zur Verfügung.

Erdwärmekollektoren sind oberflächennahe Systeme, die großflächig angelegte Wärmeübertrager im Boden in bis zu 5 m Tiefe nutzen. Daher ist der Flächenbedarf größer als für andere Wärmepumpentechnologien, zumal eine Bebauung der genutzten Fläche meistens nicht möglich ist. In der Regel werden die Erdkollektoren in privaten Gärten verlegt, wo die obere Bodenschicht vor dem Einbau abgenommen und anschließend wieder verfüllt wird. Dies kann temporär Lebensräume von Tieren und Pflanzen beeinträchtigen. Im Betrieb kann die Abkühlung des Erdreichs je nach verlegter Tiefe zu Beeinträchtigungen des Pflanzenwachstums führen.

Der Betrieb von Erdkollektoren ist als Direktverdampfersystem mit nicht wassergefährdenden Kältemitteln möglich, daher sind nachteilige Umweltauswirkungen auf Boden und Wasser auch baulich-konzeptionell durch Planung vermeidbar.

5.1.5. Biogene Brennstoffe

Die energetische Nutzung von Biomasse in Deutschland umfasst unterschiedliche Biomassearten. Aus naturschutzfachlicher Sicht ist die Unterscheidung zwischen Anbaubiomasse, Waldholz und biogenen Rest- bzw. Abfallstoffen wichtig. Nachwachsende Rohstoffe (Nawaro), die für die energetische Nutzung angebaut werden, sind beispielsweise Kurzumtriebsplantagen (KUP; meist Pappeln oder Weiden), Miscanthus, Raps, Mais, Getreide, Ackergras, Grünland, Zuckerrübe, Blümmischungen, Algen und Ölpalmen. Abfall- und Reststoffe umfassen z. B. Industrierestholz, Altholz, Stroh, Gülle und Mist, Bioabfall und Klärschlamm. Energetisch den größten Anteil hat jedoch das Waldholz.

Ebenso entscheidend ist die Art der Biomassenutzung, da bei Verbrennung und Vergärung jeweils sehr unterschiedliche Biomassen zum Einsatz kommen und sich die Beschaffungswege sowie Auswirkungen auf Natur und Landschaft deutlich unterscheiden.

In den Steckbriefen werden daher vier unterschiedliche Kombinationen separat betrachtet:

- Vergärung von Anbaubiomasse (NawaRo) Tab. 9,
- Vergärung von Rest- und Abfallstoffen (Gülle) Tab. 10,
- Verbrennung von holziger Anbaubiomasse (KUP) Tab. 11,
- Verbrennung von holziger Biomasse (Waldholz inkl. Reststoffe), Tab. 12.

Die Auswirkungen von Biogasanlagen teilen sich auf in den Substratanbau/-gewinnung, die Anlage selbst sowie die anschließende Ausbringung der Gärreste.

Gerade beim Substratanbau können zahlreiche Umweltschutzgüter nachteilig beeinflusst werden. Für die Produktion von energetisch genutzten Nawaro wurde im Jahr 2016 in Deutschland eine Anbaufläche von rund 2,4 Mio. Hektar genutzt (FNR 2018), dies entspricht rund 20 % der gesamten inländischen Ackerfläche. Insbesondere der massive Ausbau des Maisanbaus bringt unerwünschte Auswirkungen auf Bodenleben, Insekten, Wasserqualität sowie

Landschaftsbild mit sich. Diesen negativen Auswirkungen kann insbesondere durch mehrjährige Kulturen wie der durchwachsenen Silphie, Blümmischungen oder einem vielfältigen Substratmix begegnet werden.

Die enorme Flächeninanspruchnahme durch die Nachfrage nach Biomasse zur Energieerzeugung verstärkt die ohnehin zunehmend intensive Erzeugung aller landwirtschaftlichen Anbauprodukte. Die Intensivierung der Flächennutzung in der Landwirtschaft sowie die Umwandlung von biologisch wertvollem Grünland in Ackerfläche (häufig Monokulturen) führen zu Verlusten von wichtigen Lebensräumen und Nahrungsangeboten. So werden u. a. Biodiversität, Wasser und Boden durch den Anbau von NawaRo und die damit verbundenen Landnutzungsänderungen gefährdet.

Der massive Einsatz von Anbaubiomasse zur Biogaserzeugung ist aufgrund der vielfältigen negativen Auswirkungen sowie der geringen Flächeneffizienz durchaus kritisch zu betrachten.

Beim Betrieb der Anlage ist auf die Sicherheit der Substrat- und Gärrestlagerung zu achten. Hier ist vor allem das Schutzgut Wasser gefährdet. Weiterhin muss die Anlage regelmäßig auf sogenannte Methan-Leckagen überprüft werden, um ein unbeabsichtigtes Entweichen des Klimagases zu verhindern.

Die Ausbringung der Gärreste wiederum kann sich je nach gewählter Methode und Umsetzung auf die Luft- sowie Wasserqualität auswirken. Eine moderne Ausbringtonik sowie eine am Pflanzenwachstum ausgerichtete und bedarfsgerechte Düngung reduzieren mögliche negative Auswirkung weitestgehend.

Die Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe, insbesondere von Gülle in Biogasanlagen ist aus Klimaschutzsicht sehr zu begrüßen. Wird Gülle in Biogasanlagen genutzt, entstehen Klimavorteile, da THG-Emissionen (Methan und Lachgas) aus der Wirtschaftsdüngerlagerung reduziert werden. Die so erzielten THG-Einsparungen können ein Vielfaches der THG-Einsparungen durch die Vermeidung der fossilen Energieträger betragen.

Die Nutzung sonstiger Reststoffe aus Gewerbe und Industrie wie Biertreber oder Obstmaische kann zu einer Konzentration der Nährstoffe auf der betrieblichen landwirtschaftlichen Nutzfläche führen. Hier sollte auf eine bedarfsgerechte Ausbringung geachtet werden. Neben der bedarfsgerechten Düngung der Flächen mit dem Gärrest ist die strikte Einhaltung von Gewässerschutzstreifen und Grundwasserschutzgebieten notwendig, um negative Auswirkungen zu verhindern.

Auswirkungen auf das Landschaftsbild gehen lediglich von den Gärbehältern und den Gashauben aus. Diese können gestalterisch jedoch so in die Landschaft eingepasst werden, dass der Einfluss eher als gering zu bewerten ist.

Bei fachgerechtem Betrieb der Anlage und starker Forcierung tierischer Exkreme (z. B. Gülle) im Substratmix überwiegen naturschutzfachlich die positiven Auswirkungen einer Biogasanlage. Die energetische Verwertung der Reststoffe ist aus Naturschutzsicht problemlos möglich bzw. sogar wünschenswert, da diese ohnehin anfallen, am Ende der Nutzungskaskade stehen und deren Verwertung daher keine zusätzlichen Risiken für Biodiversität bzw. andere Schutzgüter darstellt.

Die Verbrennung von Anbaubiomasse aus KUPs findet derzeit in Deutschland noch nicht in großem Stil statt. Scheitholz (entnommen aus Wald und Garten, vgl. Tab. 12) ist der meistgenutzte biogene Festbrennstoff zur Wärmeherzeugung in Haushalten mit knapp 65 % Anteil am Brennholzverbrauch. Es folgen Altholz, Holzbriketts und Holzpellets. Der Pellet-Anteil am Brennholzverbrauch steigt seit einigen Jahren, während der Anteil von Scheitholz tendenziell rückläufig ist.

Bei der Anlage von diesen Kulturlflächen ist die Vornutzung entscheidend für die naturschutzfachliche Bewertung der Maßnahme. Eine Nutzung von Ackerstandorten ist beispielsweise deutlich unproblematischer als der Umbruch von Grünland. Je nach vorheriger Nutzung ist sogar eine naturschutzfachliche Aufwertung der Fläche zu erreichen. Im Vergleich zu einer einjährigen Kultur sorgen die mehrjährigen KUP für eine längere Bodenruhe, einen geringeren Einsatz von Düngemitteln sowie zusätzliche Strukturen in ausgeräumten Landschaften (NABU 2015).

Durch gestalterische Maßnahmen wie einer Umrandung mit heimischen Heckengehölzen, sind die negativen Auswirkungen auf das Landschaftsbild deutlich reduzierbar. Zudem entstehen durch solche Übergangszonen zwischen Offenland und Baumkultur wertvolle Lebensräume für Heckenbewohner. Insekten, Vögel und Kleinsäuger profitieren gleichermaßen von solchen Strukturen.

Häufig werden bei der Erstanlage noch Totalherbizide eingesetzt, um den Unkrautdruck auf der Fläche zu reduzieren. Dies ist jedoch aus Naturschutzsicht abzulehnen. In den Folgejahren bedarf es jedoch keines Pestizid- oder Düngereinsatzes mehr.

Unter folgenden Bedingungen ist der Anbau von KUP als Dauerkulturen aus naturschutzfachlicher Sicht positiv (BUND 2012):

- Naturverträglicher Standort: insbesondere Berücksichtigung von Arten- und Biotopschutzaspekten und Vermeidung von artenreichem Grünland
- Bepflanzung: Mischung mit idealerweise heimischer Herkunft, in Naturschutzgebieten ausschließlich mit Gehölzen heimischer Herkunft; keine invasiven Arten
- Größe: möglichst kleine zusammenhängende Fläche (nach Möglichkeit schmal und langgezogen), ab gewisser Größe sollte die Fläche nicht auf einmal beerntet werden
- Sollte sich ins Landschaftsbild einfügen (z. B. Angrenzung an Waldbestand)
- Weitere Maßnahmen zur Steigerung der Naturverträglichkeit: Ernten möglichst bei gefrorenem Boden, bewachsener Streifen um die KUP herum, Blühstreifen

Die energetische Nutzung von Holz aus dem forstlich genutzten Wald spielt seit Jahrhunderten eine große Rolle. Stammt das Holz aus nachhaltiger Forstwirtschaft, wie sie in weiten Teilen Mitteleuropas praktiziert wird, gehen nur geringe negative Auswirkungen für Natur und Umwelt damit einher.

Bei der Biomasseverbrennung spielt also die Herkunft der Materialien eine große Rolle für die Auswirkungen auf Natur und Landschaft. In Deutschland wird ein Viertel bis die Hälfte der Holzernte aus Wäldern energetisch genutzt. Die Holzentnahme erfolgt dabei unter strengen Nachhaltigkeitskriterien, und es konnte trotz Nutzungsintensivierung im Rahmen der Bundeswaldinventur keine Verschlechterung des Zustandes festgestellt werden (Ewald et al. 2017). Weiterhin könnte die Funktion des Waldes als CO₂-Senke gemindert werden, wenn nicht genügend Totholz in Wald und Boden verbleibt.

In Deutschland wird aber nicht nur inländisch produzierte Biomasse energetisch genutzt. Biogene Brennstoffe werden international gehandelt, und auch Deutschland bezieht einen Teil der im Inland energetisch genutzten Biomasse aus dem Ausland. Insgesamt betrachtet weist der deutsche Außenhandel deutliche Importüberschüsse von energetisch genutzter Biomasse auf.

Die stoffliche und energetische Verwendung von Holz liegt seit 2010 auf gleichhohem Niveau zwischen 60 und 70 Mio. m³. Der Anteil am gesamten Aufkommen an Waldderholz das ausschließlich für energetische Zwecke genutzt wird, betrug im Jahr 2016 26 %. Der größte Anteil wurde in Privathaushalten genutzt und liegt bei knapp 30 Mio. m³, gefolgt von

Biomasseverbrennungsanlagen größer 1 MW mit knapp 25 Mio. m³ und Großanlagen, die knapp 5 Mio. m³ Holz genutzt haben (FNR 2018b).

Im Idealfall sollte Holz in einer Kaskadennutzung mehrfach genutzt werden. Dabei kann Holz nach der stofflichen Nutzung als Baumaterial oder als Möbel, später (Altholz) einer energetischen Nutzung zugeführt werden.

Rest- und Abfallstoffe sind im Allgemeinen wesentlich konfliktärmer, da die Primärrohstoffe für die Kreislaufführung erhalten bleiben und vor der energetischen Verwertung die gesamte Nutzungskaskade durchlaufen. Die Nutzung von Industrierestholz und Altholz sowie von biogenen Abfällen und Klärschlamm ist naturschutzfachlich unproblematisch. Ähnlich zu bewerten ist Holz aus Straßen- oder Landschaftspflege welches im Rahmen von notwendigen Pflegemaßnahmen anfällt.

Die bei der Verbrennung von Biomasse entstehenden Feinstaubemissionen wirken sich nachteilig auf Schutzgüter aus. Vor allem dezentrale Verbrennungsanlagen in privaten Haushalten wie Kamine und Holzöfen sorgen für Feinstaubbelastungen. Während der Heizperiode tragen Holzfeuerungen zu ca. 10 % bis 20 % der Feinstaubkonzentration bei.

Tab. 9: Steckbrief Natur- und Landschaftswirkung bei Vergärung von Anbaubiomasse

Technologie: Vergärung von Anbaubiomasse		
Kategorie/Ziel	Erläuterung potenzieller Auswirkungen	Mögliche Vermeidungs-/ Verminderungsmaßnahmen
Tiere, Pflanzen, biologische Vielfalt		
Schutz von Tieren, Pflanzen und deren Lebensräumen	Beeinträchtigung von Tieren und Pflanzen durch: Einsatz von Pestiziden Intensive Bodenbearbeitung Nitrat (N)-Düngung mit Auswaschung (Eutrophierung von Gewässern) Sickerwasseraustritt aus Silage (Eutrophierung von Gewässern)	Reduzierter Einsatz von Pestiziden fördern (Verbot?) Anbau von robusten, mehrjährigen Kulturen (Silphie, Blümmischungen) Reduzierte Bodenbearbeitung (Direktsaat, mehrjährige Kulturen) Bedarfsgerechte N-Düngung, Einsatz von Leguminosen statt synth. N-Dünger sachgerechte Silos mit Sickerwasserauffangereinheit und regelmäßiger Überprüfung/Wartung
Schutzgebiete und Biotopverbundsystem	Durch große Ackerschläge Zerschneidung von Biotopverbundsystemen Indirekt durch N-Auswaschungen und Pestizide	Ackerrandstreifen und Trittsteinbiotop anlegen Bedarfsgerechte Düngung
Regionstypische Biodiversität Sichern	Bei Monokulturen und intensivem großflächigem Maisanbau Reduktion der Agrobiodiversität	Einsatz von Blümmischungen und vielfältigen Substratmischungen
Boden/Fläche		
Sicherung oder Wiederherstellung der Bodenfunktion und -struktur	Kurze/fehlende Fruchtfolgen können den Boden aushagern (Bsp. Mais auf Mais) Intensive Bodenbearbeitung führt zu Humusabbau und Verdichtung	Einsatz von mehrjährigen Kulturen Einsatz vielgliedriger Fruchtfolgen mit Leguminosen Reduzierte Bodenbearbeitung/Direktsaat

Technologie: Vergärung von Anbaubiomasse		
Kategorie/Ziel	Erläuterung potenzieller Auswirkungen	Mögliche Vermeidungs-/ Verminderungsmaßnahmen
Senkung der Schadstoffbelastung im Boden	Pestizide können sich im Boden anreichern	Reduzierter Pestizideinsatz
Wasser		
Gute ökologische und chemische Qualität der Oberflächengewässer	Indirekt durch Auswaschung/Abfluss	Bedarfsgerechte Düngung Gewässerschutzstreifen einhalten
Guter chemischer und mengenmäßiger Zustand des Grundwassers	Auswaschung von N Reduktion von Grundwasser durch intensiven Wasserbedarf von Mais-Monokulturen	Bedarfsgerechte Düngung
Klima/Luft		
Minderung der Treibhausgasemissionen	Verdrängung von Wärmeerzeugung durch fossile Energieträger (v.a. Erdgas und Öl) Austritt von Methan bei Leckage, Inbetriebnahme oder Wartung CO ₂ -Emissionen durch Dieserverbrauch bei Flächenbearbeitung	Regelmäßige Wartung/Kontrolle der Biogasanlage auf Methanleckagen
Erhalt/Entwicklung klimarelevanter Räume und Verbesserung des urbanen Mikroklimas	Keine direkte Auswirkung	/
Minderung der Luftschadstoffe mit schädlicher Auswirkung auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt	Verdrängung von Wärmeerzeugung durch fossile Energieträger (v.a. Erdgas und Öl) sowie wenig effizienter Scheitholzöfen, dadurch weniger Luftschadstoffe und Feinstaub	/
Landschaft		
Sicherung und Weiterentwicklung der Landschaft in ihrer Vielfalt und Eigenart	Beeinflussung des Landschaftsbildes durch Installation von Biogasanlagen mit Gasspeichern Beeinflussung des Landschaftsbildes durch großflächigen Substratanbau (Mais)	Geeignete Standortwahl Einbindung in das Landschaftsbild durch gestalterische Maßnahmen Anbau von Blühstreifen Anbau von Blümmischungen und Silphie statt Mais Vielfältiger Substratmix Verstärkte Nutzung von Reststoffen

Tab. 10: Steckbrief Natur- und Landschaftswirkung bei Vergärung von Rest- und Abfallstoffen.

Technologie: Vergärung von Rest- und Abfallstoffen		
Kategorie/Ziel	Erläuterung potenzieller Auswirkungen	Mögliche Vermeidungs-/ Vermin- derungsmaßnahmen
Tiere, Pflanzen, biologische Vielfalt		
Schutz von Tieren, Pflanzen und deren Lebensräumen	Bodenlebewesen: Durch Biogasanlagen kommt es häufig zu einer Konzentrierung der Nährstoffe in bestimmten Regionen.	Bedarfsgerechte Gülleausbringung und Düngung
Schutzgebiete und Biotopeverbundsystem	Keine direkte Auswirkung Indirekt durch Nitratauswaschungen	/
Regionstypische Biodiversität Sichern	Nährstoffanreicherung kann Pflanzengemeinschaften auf Dauergrünland verändern	Bedarfsgerechte Gülleausbringung und Düngung
Boden/Fläche		
Sicherung oder Wiederherstellung der Bodenfunktion und -struktur	Keine direkte Auswirkung	/
Senkung der Schadstoffbelastung im Boden	Keine direkte Auswirkung	/
Wasser		
Gute ökologische und chemische Qualität der Oberflächengewässer	Indirekt durch Auswaschung/Abfluss, wenn es durch die Nutzung von nicht landwirtschaftlichen Reststoffen wie Biertreber oder Obstmaische zur Anreicherung von Nährstoffen kommt.	Bedarfsgerechte Düngung Gewässerschutzstreifen einhalten
Guter chemischer und mengenmäßiger Zustand des Grundwassers	Auswaschung von Nitrat	Bedarfsgerechte Düngung
Klima/Luft		
Minderung der Treibhausgasemissionen	Großes Potenzial der Reduktion von Methanemissionen aus der Gülle Reduktion der Lachgasemissionen aus der Gülle Verdrängung von Wärmeenergie durch fossile Energieträger (v.a. Erdgas und Öl)	Regelmäßige Wartung/Kontrolle der Biogasanlage auf Methanleckagen
Erhalt/Entwicklung klimarelevanter Räume und Verbesserung des urbanen Mikroklimas	Keine direkte Auswirkung	/
Minderung der Luftschadstoffe mit schädlicher Auswirkung auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt	Reduktion der Ammoniakemissionen insbesondere bei sachgerechter Ausbringung der Gärreste (Schleppschlauch, Schleppschuh)	Anwendung von moderner Ausbringtechnik und sachgerechter Ausbringung

Technologie: Vergärung von Rest- und Abfallstoffen		
Kategorie/Ziel	Erläuterung potenzieller Auswirkungen	Mögliche Vermeidungs-/ Verminderungsmaßnahmen
Landschaft		
Sicherung und Weiterentwicklung der Landschaft in ihrer Vielfalt und Eigenart	Keine direkte Auswirkung	/

Tab. 11: Steckbrief Natur- und Landschaftswirkung bei Verbrennung von holziger Anbaubiomasse

Technologie: Verbrennung von holziger Anbaubiomasse		
Kategorie/Ziel	Erläuterung potenzieller Auswirkungen	Mögliche Vermeidungs-/ Verminderungsmaßnahmen
Tiere, Pflanzen, biologische Vielfalt		
Schutz von Tieren, Pflanzen und deren Lebensräumen	Die KUPs werden zumeist in Reinbeständen angebaut und bieten wenig pflanzliche Vielfalt, die Plantagenbäume selbst weisen nur geringe genetische Vielfalt auf Roundup wird teilweise zur Kulturanlage eingesetzt	Ergänzung durch vielfältige Hecken als Umrandung Verzicht auf Totalherbizide
	Tiere finden in den KUPs Schutz und Nistmöglichkeiten	/
	KUP auf ehemaligen Grünlandstandorte zerstören funktionierende Ökosysteme	KUP Anlagen nur auf Ackerland
Schutzgebiete und Biotopverbundsystem	Können in intensiven Kulturlandschaften als Trittsteinbiotope oder Wildtierkorridore dienen	In Biotopverbundplanung einbinden und diese berücksichtigen
Regionstypische Biodiversität sichern	Bei klassischer Anlage kein Beitrag zur Sicherung	Ergänzung durch vielfältige Hecken mit heimischen Gehölzen als Umrandung
Boden/Fläche		
Sicherung oder Wiederherstellung der Bodenfunktion und -struktur	Extensivierung von intensiv genutzten und bearbeiteten Ackerflächen trägt zur Bodenregeneration bei Die tief wurzelnden Bäume lockern verdichteten Boden auf	/
Senkung der Schadstoffbelastung im Boden	Teilweise Einsatz von Totalherbiziden bei Kulturanlage Während der 20-jährigen Standzeit kein Pestizideinsatz Nutzung von KUP zur Phytoremediation	Verzicht auf Totalherbizid
Wasser		
Gute ökologische und chemische Qualität der Oberflächengewässer	Verbesserung der Wasserrückhaltefähigkeit des Bodens	/

Technologie: Verbrennung von holziger Anbaubiomasse		
Kategorie/Ziel	Erläuterung potenzieller Auswirkungen	Mögliche Vermeidungs-/ Verminderungsmaßnahmen
Guter chemischer und mengenmäßiger Zustand des Grundwassers	Keine direkte Auswirkung	/
Klima/Luft		
Minderung der Treibhausgasemissionen	Verdrängung von Wärmeerzeugung durch fossile Energieträger (v.a. Erdgas und Öl) C-Speicherung im Holz (temporär) und dauerhaft im Boden	/
Erhalt/Entwicklung klimarelevanter Räume und Verbesserung des urbanen Mikroklimas	Positive Auswirkung auf das Mikroklima	/
Minderung der Luftschadstoffe mit schädlicher Auswirkung auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt	Verdrängung von Wärmeerzeugung durch fossile Energieträger (v.a. Erdgas und Öl) Einsatz der Holzhackschnitze I in großen und effizienten Heizwerken mit moderner Filtertechnologie: dadurch Verdrängung wenig effizienter Scheitholzöfen und der damit verbundenen Luftschadstoffe und Feinstaub	Nutzung nur in effizienten Heizwerken mit moderner Filtertechnologie
Landschaft		
Sicherung und Weiterentwicklung der Landschaft in ihrer Vielfalt und Eigenart	Beeinflussung des Landschaftsbildes durch hohe Gehölzstrukturen ohne Übergang zum Umland	Geeignete Standortwahl Einbindung in das Landschaftsbild durch gestalterische Maßnahmen Ergänzung durch vielfältige Hecken mit heimischen Gehölzen als Umrandung

Tab. 12: Steckbrief Natur- und Landschaftswirkung Verbrennung von holziger Biomasse: Wald, Landschaftspflege

Technologie: Verbrennung von holziger Biomasse (Wald, Landschaftspflege)		
Kategorie/Ziel	Erläuterung potenzieller Auswirkungen	Mögliche Vermeidungs-/ Verminderungsmaßnahmen
Tiere, Pflanzen, biologische Vielfalt		
Schutz von Tieren, Pflanzen und deren Lebensräumen	Nachhaltige Forstwirtschaft wie in Deutschland bietet zahlreiche Lebensräume für diverse Pflanze und Tiere Künstliche Reinbestände (insbesondere Fichten) sind ökologisch wenig wertvoll Fremdländische Baumarten sind oft nicht an die heimische Fauna angepasst	FSC Zertifizierung anstreben Mischbestände und natürliche Verjüngung fördern

Technologie: Verbrennung von holziger Biomasse (Wald, Landschaftspflege)		
Kategorie/Ziel	Erläuterung potenzieller Auswirkungen	Mögliche Vermeidungs-/ Verminderungsmaßnahmen
	Totholz (auch stehendes) bietet wichtige Habitats Laub/Nadeln und Astwerk haben viele Nährstoffe, die im Wald verbleiben sollten	Totholz Konzepte entwickeln und umsetzen Bei Brennholznutzung die Derbholtzgrenze von 7 cm beachten und Material unter der Derbholtzgrenze im Wald belassen Primär Restholz aus Sägewerken nutzen
Schutzgebiete und Biotopverbundsystem	Zahlreiche Schutzgebiete liegen im Wald	Zusätzliche Schutzgebiete ausweisen (Bannwald etc.)
Regionstypische Biodiversität sichern	Keine direkte Auswirkung	/
Boden/Fläche		
Sicherung oder Wiederherstellung der Bodenfunktion und -struktur	Keine direkte Auswirkung	/
Senkung der Schadstoffbelastung im Boden	Keine direkte Auswirkung	/
Wasser		
Gute ökologische und chemische Qualität der Oberflächengewässer	Keine direkte Auswirkung	/
Guter chemischer und mengenmäßiger Zustand des Grundwassers	Keine direkte Auswirkung	/
Klima/Luft		
Minderung der Treibhausgasemissionen	Verdrängung von Wärmeenergie durch fossile Energieträger (v.a. Erdgas und Öl) Das im Holz gespeicherte C wird bei der Verbrennung direkt wieder freigegeben	Stoffliche Nutzung von Holz bevorzugen Kaskadennutzung anstreben
Erhalt/Entwicklung klimarelevanter Räume und Verbesserung des urbanen Mikroklimas	Keine direkte Auswirkung	/
Minderung der Luftschadstoffe mit schädlicher Auswirkung auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt	Einsatz der Holzhackschnitzel in großen und effizienten Heizwerken mit moderner Filtertechnologie: dadurch Verdrängung wenig effizienter Scheitholzöfen und der damit verbundenen Luftschadstoffe und Feinstaub	Nutzung primär in effizienten Heizwerken mit moderner Filtertechnologie Scheitholznutzung primär im ländlichen Raum bei Eigenversorgung Alte Scheitholzöfen auswechseln

Technologie: Verbrennung von holziger Biomasse (Wald, Landschaftspflege)		
Kategorie/Ziel	Erläuterung potenzieller Auswirkungen	Mögliche Vermeidungs-/ Verminderungsmaßnahmen
	Nutzung in Scheitholzöfen oft ineffizient und mit hohen Feinstaubwerten	
Landschaft		
Sicherung und Weiterentwicklung der Landschaft in ihrer Vielfalt und Eigenart	Keine direkten Auswirkungen	/

5.1.6. Solarthermie

Solarthermische (ST) Wärmeerzeugung erfolgt mit Aufdach-Solarthermieanlagen sowie über Freiflächenanlagen (FFA).

Die auf Dächern von Gebäuden installierten Anlagen haben aufgrund ihres Installationsortes eine vernachlässigbar geringe Auswirkung auf Naturschutz und Landschaft. Die genutzte Fläche ist bereits durch das Gebäude versiegelt und weist einen geringen Wert für den Naturschutz auf. Der optische Eindruck verändert sich leicht, da anstelle der Dachfläche die ST-Module zu sehen sind. ST-Aufdachanlagen können in seltenen Fällen in Konkurrenz stehen mit Dachbegrünungen, es besteht jedoch auch die Möglichkeit einer kombinierten ST- und Gründachnutzung.

Großflächige ST auf freier Fläche (ST-FFA) hingegen können erhebliche Auswirkungen auf Natur und Landschaft haben. Die Umweltauswirkungen der solarthermischen FFA sind in einiger Hinsicht vergleichbar mit den Auswirkungen von Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA), zu denen bereits mehr Forschungsergebnisse verfügbar sind. Die Auswirkungen von ST können jedoch nicht gleichgesetzt werden mit Photovoltaikanlagen. Solarthermieanlagen sind jedoch auf die räumliche Nähe zur Wärmesenke (Anbindung ans Wärmenetz) angewiesen, sodass sie sich häufig in unmittelbarer Nähe von Ortschaften befinden.

Für die Wirkung auf Natur und Landschaft ist bei Anlagen auch entscheidend, auf welche Art die Fläche im Vorfeld genutzt wurde (KNE 2021b).

In dem Steckbrief in Tab. 13 werden die Auswirkungen in den jeweiligen Kategorien beschrieben.

Durch die Errichtung von Freiflächenanlagen kann das Landschaftsbild verändert werden, zudem können je nach Standort Arten und Lebensräume beeinträchtigt werden. Durch eine naturverträgliche Standortwahl sowie Ausgestaltung der Anlagen und eine naturangepasste Betriebsweise können viele dieser Faktoren ausgeglichen oder gemindert werden. Insbesondere für PV-FFA gibt es bereits zahlreiche Praxis-Leitfäden der Landesministerien mit Hinweisen für die ökologische und naturverträgliche Gestaltung von FFA, aus denen einige auch für die ST-FFA übernommen werden können. Auch für ST-FFA existieren bereits erste Leitfäden, die auch Naturschutzaspekte berücksichtigen, wie beispielsweise für Baden-Württemberg (Hamburg Institut 2016).

Freiflächenanlagen können in das Landschaftsbild integriert werden, indem ihre Geometrie den örtlichen Gegebenheiten angepasst wird oder sie durch seitliche Bepflanzungen

abgeschirmt werden⁷. Durch ihre geringe Höhe werden die ST-FFA in vielen Fällen nur in der unmittelbaren Nachbarschaft wahrgenommen.

Bei der Standortwahl sollten Eingriffe in Schutzgebiete vermieden werden. Idealerweise werden Flächen als Standorte ausgewählt, die bereits einen hohen Versiegelungsgrad bzw. eine hohe Bodenverdichtung aufweisen oder die zuvor landwirtschaftlich (intensiv) bewirtschaftet wurden. PV-FFA werden häufig auf Konversionsflächen, also ehemaligen Militär-, Industrie- oder Gewerbeflächen errichtet, die mitunter bereits einen ökologischen Wert haben (Bundesnetzagentur 2016). Da ST-FFA auf eine geringe Entfernung zu den an das Wärmenetz angeschlossenen Wärmeabnehmern angewiesen sind, befinden sich die Anlagenstandorte anders als bei der PV häufig in unmittelbarer Nähe zu Ortsstrukturen, sodass möglicherweise weniger Konversionsflächen als Standorte für ST-FFA-Anlagen in Frage kommen.

Die Planung der Anlagen lässt zudem Spielraum für eine naturverträgliche Ausgestaltung. Durch bauliche Maßnahmen wie beispielsweise den Verzicht auf Fundamente) ist es möglich, den Versiegelungsgrad sehr gering zu halten, sodass unter den Modulen extensiver Bewuchs und Pflege möglich sind. Die Einzäunung der Anlagen kann (falls erforderlich) durchlässig gestaltet werden, sodass sie für Kleinsäuger und Amphibien keine Barrierewirkung entfaltet.

In Hinblick auf den Boden- und Gewässerschutz muss sichergestellt werden, dass keine was-sergefährdenden Stoffe aus den Rohrleitungen zwischen den Kollektoren sowie von den Kollektoren zur Wärmeübergabestation austreten, die das Grundwasser nachteilig verändern können. Dies ist beispielsweise mithilfe von Leckagefrüherkennungs- und entsprechenden Warnsystemen sowie durch regelmäßige sachgerechte Wartungsintervalle vermeidbar.

Werden die Hinweise zur naturverträglichen Ausgestaltung beachtet und wird die Solarthermieanlage auf einer Fläche mit zuvor geringer naturschutzfachlicher Bedeutung errichtet, so kann sie mitunter sogar einen positiven Effekt auf einige Naturschutzziele wie beispielsweise die Sicherung der Artenvielfalt, die Verbesserung der Biotopvernetzung, die Reduzierung der Belastung durch Düngung und Pflanzenschutzmittel und die Reduzierung der Bodenbearbeitung haben (Bröer 2020).

Tab. 13: Steckbrief Natur- und Landschaftswirkung von Solarthermie- Freiflächenanlagen.

Technologie: Solarthermie-Freiflächenanlagen		
Kategorie/ Ziel	Erläuterung potenzieller Auswirkungen	Mögliche Vermeidungs-/ Verminderungs- maßnahmen
Tiere, Pflanzen, biologische Vielfalt		
Schutz von Tieren, Pflanzen und deren Lebensräumen	Für einige Vogelarten positive Wirkungen, da im Vergleich zum reinen Ackerland auf weniger intensiv bewirtschafteten FFA-Flächen bessere Lebensraumbedingungen vorherrschen (Nist-, Brut-, Nahrungssuch- oder Jagdzwecke) Verlust von Rast- und Nistflächen störungsempfindlicher Arten (Offenlandarten) (Demuth et al. 2019)	Vorausschauende Standortauswahl Schonende Beweidung/ Grünpflege und Berücksichtigung der Brutzeiten bei Mäharbeiten Extensive Flächennutzung und Bewirtschaftung
	Säugetiere: Beeinträchtigung durch Lärmemissionen (Bauphase)	Vorausschauende Standortauswahl Maschenauswahl bei der Umzäunung: auf Durchlässigkeit für kleinere / mittelgroße Säugetiere achten

⁷ s. beispielhafte Abbildungen von Anlagen: „Einbindung von PV-Anlagen in die Landschaft“ unter https://www.energieatlas.bayern.de/thema_sonne/photovoltaik/umweltaspekte.html

Technologie: Solarthermie-Freiflächenanlagen		
Kategorie/ Ziel	Erläuterung potenzieller Auswirkungen	Mögliche Vermeidungs-/ Verminderungs- maßnahmen
	später Gewöhnung und Anpassung an veränderten Lebensraum, soweit Eindringen möglich (Umzäunung)	Extensive Flächennutzung
	Insekten: Anstieg der Artenvielfalt und Populationsdichte im Vergleich zu intensiv bewirtschafteten Flächen (Bundesverband neue Energiewirtschaft e.V. 2019) Negative Effekte für einige Arten denkbar, wo ST-FFA auf vorher bereits extensiv genutztem Grünland oder Offenflächen errichtet werden (Demuth et al. 2019)	Vorausschauende Standortauswahl Extensive Flächennutzung Kompensation durch Integration entsprechender Elemente
	regelmäßige Veränderung des pflanzlichen Lebensraumes durch Freihaltung der Flächen zur Vermeidung von Verschattungseffekten (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2007) Vegetationsvielfalt gegenüber Vornutzung als Acker gesteigert Konversionsflächen: mögliche Beeinträchtigungen bei Nutzung von Biotopflächen für FFA (Demuth et al. 2019)	Vorausschauende Standortauswahl Bodenschonende Aufständering Extensive Flächennutzung
Schutzgebiete und Biotopverbundsystem	Bei entsprechender Standortwahl und Planung: FFA können Beitrag als Schutz- und Entwicklungsräume leisten sowie den Biotopverbund stärken Mögliche Barrierewirkung durch Umzäunung	Vorausschauende Standortauswahl Konzeptionelle Einbindung in Biotopverbundsystem Durchlässige Gestaltung
Regionstypische Biodiversität sichern	Möglichkeiten der Aufwertung oder Neuschaffung von Lebensräumen für regionale Pflanzen- und Tierarten (Bundesverband neue Energiewirtschaft e.V. 2019)	Vorausschauende Standortauswahl Naturverträgliche bzw. -unterstützende Bewirtschaftung
Boden/Fläche		
Sicherung oder Wiederherstellung der Bodenfunktion und -struktur	Stellenweise Versiegelungen, Verdichtungen, Veränderungen der Oberflächenstruktur möglich	Nutzung bereits versiegelter Flächen Belastungsarme Aufständeringssysteme, möglichst geringe Modullasten Vorausschauende Planung der Errichtungsphase im Hinblick auf geringe Bodendurchfeuchtung und schonenden Maschineneinsatz möglichst keine befestigten Wege innerhalb der Fläche
	Abtrag des Oberbodens bei Errichtung	oberirdische Installation Standortangepasste Ansaat nach Errichtungsphase
	Erosionsschutz durch Ausbildung einer Vegetationsdecke (Ansaat)	/
Senkung der Schadstoff-	Positive Auswirkungen auf zuvor landwirtschaftlich genutzte Flächen (Verzicht auf	/

Technologie: Solarthermie-Freiflächenanlagen		
Kategorie/ Ziel	Erläuterung potenzieller Auswirkungen	Mögliche Vermeidungs-/ Verminderungs- maßnahmen
belastung im Boden	Düngung bzw. Einsatz von chemischen Pflanzenschutzmitteln (Bundesverband neue Energiewirtschaft e.V. 2019)	
Wasser		
Gute ökologi- sche und chemische Qualität der Oberflächen- gewässer	bei Leckage Verunreinigung von Gewäs- sern möglich	Verwendung von nicht giftigen, reizenden o- der ätzenden sowie biologisch abbaubarer und umweltschonender Flüssigkeit (gemäß geltender Normen) Systeme zur Leckagefrüherkennung
Guter chemi- scher und mengenmä- ßiger Zu- stand des Grundwas- sers	Grundwasserneubildung wird trotz punktu- eller Versiegelung und teilweiser Boden- überdeckung nicht beeinträchtigt Niederschlagswasser versickert im Bereich der Anlagen nahezu ungehindert und voll- ständig (NABU 2005)	/
	bei größeren Veränderungen der Erdober- fläche sowie Umgang mit wassergefähr- denden Stoffen: Gefährdung des Grund- wassers nicht auszuschließen	Wahl eines geeigneten Transportmediums, Einzelfallbewertung von FFA in Wasser- schutzgebieten, Zulässigkeit nur unter be- stimmten Voraussetzungen (kein großflächiger Bodenabtrag, Dichtigkeit, Standsicher- heit, Leckageerkennung) (Hamburg Institut 2016)
Klima/Luft		
Minderung der Treib- haus- gasemissio- nen	Verdrängung von Wärmeerzeugung durch fossile Energieträger (v.a. Erdgas und Öl)	/
Erhalt/Ent- wicklung kli- marelevanter Räume und Verbesser- ung des ur- banen Mikro- klimas	Temperaturen unterhalb der Module ver- schattungsbedingt niedriger als Umgebung Temperaturen in naher Umgebung nachts höher aufgrund der durch die Module zu- rückgehaltenen Wärmestrahlung	/
	nachteilige lokalklimatische Effekte möglich bei Überbauung von Flächen mit klimati- scher Ausgleichsfunktion	Auswahl geeigneter Flächen Kompensation durch Bepflanzung o. ä.
Minderung der Luft- schadstoffe mit schädli- cher Auswir- kung auf die menschliche Gesundheit und die Um- welt	Verdrängung von Stromerzeugung durch fossile Energieträger, dadurch weniger Luft- schadstoffe (indirekt)	/

Technologie: Solarthermie-Freiflächenanlagen		
Kategorie/ Ziel	Erläuterung potenzieller Auswirkungen	Mögliche Vermeidungs-/ Verminderungs- maßnahmen
Landschaft		
Sicherung und Weiterentwicklung der Landschaft in ihrer Vielfalt und Eigenart	Zerschneidung der Landschaft, Eigenart des Landschaftsbilds verändert durch großflächige Anlagen Ggf. visuelle Beeinträchtigung der umgebenden Landschaft Landschaftsfremde Elemente (Module in Reihenbauweise mit reflektierender Oberfläche) Mögliche Beeinträchtigung des Erholungswertes einer Landschaft Bei der Flächenausweisung für PV bzw. ST können Kulturdenkmale (z. B. Bodendenkmale wie pflanzliche oder tierische Fossile, Flurdenkmale oder Kulturlandschaften) oder Naturdenkmale (natürliche Landschaftselemente wie z. B. Steinformationen, alte oder seltene Bäume) beeinträchtigt werden durch die Planung von Anlagen in ihrer unmittelbaren Nähe. (vgl. Umweltschutzziel Sicherung und Weiterentwicklung der Landschaft in ihrer Vielfalt und Eigenart – Schutzgut Landschaft)	Vorausschauende Standortwahl, beispielsweise Installation entlang von Verkehrswegen Gestalterische Einbindung in bestehende Landschaftselemente Steigerung der Artenvielfalt durch ökologische Ausgestaltung der FFA Bei der Regional- und Flächennutzungsplanung ist darauf zu achten, dass die Belange des Denkmalschutzes und der Denkmalpflege im Rahmen der Planverfahren berücksichtigt werden.

5.1.7. Gebäudeeffizienz

Ein sehr großer Teil der energetischen Gebäudesanierungen betrifft die Außenfassade. Durch zusätzliche Dämmung können meist die größten Effekte erzielt werden. Bei einer solchen Baumaßnahme werden eventuell bestehende Lebensräume an den Fassaden entfernt und zerstört. Zahlreiche gebäudebewohnende Arten sind also von einer zunehmenden energetischen Sanierung betroffen (s. Tab. 15) (Heiland et al. 2019).

Es zeigt sich, dass es bei der Gebäudedämmung naturschutzrelevante Auswirkungen gibt. Durch Gebäudesanierungen wird ein Teil gebäudebrütender Arten zunehmend bedroht und der Bestand wird dezimiert. Diese Effekte können ausgeglichen werden (Rosin et al. 2021) und sind bei einer ansteigenden Sanierungsrate unbedingt zu berücksichtigen. Gesetzliche Vorgaben zum Schutz von Habitaten sind ratsam.

Eine entscheidendere Rolle spielt die Auswahl der verwendeten Materialien und die dadurch verursachten Auswirkungen auf Natur- und Umwelt in der Vorkette.

Derzeit wird für die Dämmung von Fassaden hauptsächlich Dämmstoffe auf Basis fossiler und mineralischer Materialien eingesetzt. Ökologische Dämmprodukte aus Nawaro haben verschiedene Vorteile im Vergleich zu den üblichen Kunststoffmaterialien. Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen haben in der Regel eine gute Ökobilanz, schonen Ressourcen und sind oftmals regional verfügbar. Es geltend jedoch auch hier die Einschränkungen analog zum Biomasseanbau für energetische Zwecke.

Entscheidend für die Materialmengen und damit die Ressourcennutzung ist auch die Betrachtung der Dämmung von Bestandimmobilien versus energieeffiziente Neubauten. Bei der

nachträglichen Dämmung von Bestandsgebäuden (Sanierungen) ist ein deutlich geringerer Ressourcenverbrauch notwendig als bei der Errichtung von Neubauten. Dies wirkt sich positiv auf die Gesamtenergieeffizienz und insbesondere auf die Zerstörung von Landschaften und Naturräumen (Abbau und Gewinnung von Baumaterial) aus. In vielen Fällen kann bei Sanierungen fast gänzlich auf fossile Materialien, Steine und Erden verzichtet werden. Obwohl also oft nicht der gleiche Effizienzstandard erreicht werden kann wie bei Neubauten, sind die Einflüsse auf Natur und Umwelt oft geringer. Anstatt ein Gebäude durch einen energieeffizienten Neubau zu ersetzen, ist eine Sanierung in vielen Fällen ressourcenschonender.

Neben der klassischen Dämmung beschreiben wir daher in den folgenden Steckbriefen auch die Fassaden- und Dachbegrünung (s. Tab. 14), mit deren Hilfe neue Lebensräume für einige Arten geschaffen werden können.

Unter dem Begriff der Stadtnatur werden Lebensräume und Biotope zusammengefasst, die in urbanen Räumen entstehen. Gründächer und Fassadenbegrünungen sind Teil dieser neu geschaffenen Lebensräume an Gebäuden.

Dachbegrünungen und Fassadenbegrünungen übernehmen dabei unterschiedliche Funktionen, die sich unmittelbar positiv auf Lebensräume im urbanen Raum auswirken. Zugleich wirken die begrünten Gebäudeelemente auch auf Energieaspekte am Gebäude bzw. auf das Mikroklima um das Gebäude herum. Dies hat positiven Einfluss auf den Energiebedarf und die Effizienzleistung der Gebäude.

Tab. 14: Steckbrief Natur- und Landschaftswirkung von Gründächern und Fassadenbegrünung.

Technologie: Gebäudeeffizienz – energetische Sanierung		
Kategorie/Ziel	Erläuterung potenzieller Auswirkungen	Mögliche Vermeidungs-/ Verminderungsmaßnahmen
Tiere, Pflanzen, biologische Vielfalt		
Schutz von Tieren, Pflanzen und deren Lebensräumen	Durch die Dämmung und Sanierung von Bestandsbauten können Lebensräume in Fassaden und Dachstühlen für Vögel, Fledermäuse, Kleinsäuger oder Insekten verloren gehen	Brutzeiten beachten und geeignete Ersatznisthilfen bzw. Ausweichmöglichkeiten installieren
Schutzgebiete und Biotopverbundsystem	Keine direkte Auswirkung	/
Regionstypische Biodiversität sichern	Keine direkte Auswirkung	/
Boden/Fläche		
Sicherung oder Wiederherstellung der Bodenfunktion und -struktur	Keine direkte Auswirkung	/
	Durch den Abbau von fossilen oder mineralischen Rohstoffen für Dämmmaterialien können negative Auswirkungen auftreten.	Verstärkter Einsatz von ökologischen Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen
Senkung der Schadstoffbelastung im Boden	Keine direkte Auswirkung	/
Wasser		
Gute ökologische und chemische Qualität der Oberflächengewässer	Durch den Abbau von fossilen oder mineralischen Rohstoffen können negative Auswirkungen auftreten	Verstärkter Einsatz von ökologischen Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen

Technologie: Gebäudeeffizienz – energetische Sanierung		
Kategorie/Ziel	Erläuterung potenzieller Auswirkungen	Mögliche Vermeidungs-/ Verminderungsmaßnahmen
Guter chemischer und mengenmäßiger Zustand des Grundwassers	Durch den Abbau von fossilen oder mineralischen Rohstoffen sowie den Anbau nachwachsender Rohstoffe können negative Auswirkungen auftreten	Verstärkter Einsatz von ökologischen Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen
Klima/Luft		
Minderung der Treibhausgasemissionen	Dämmung reduziert den Energieverbrauch von Gebäuden. Vorteile ergeben sich insbesondere durch die Verdrängung von Wärmeerzeugung durch fossile Energieträger (v.a. Erdgas und Öl) Dauerhafte C-Speicherung in ökologischen Dämmstoffen	Verstärkter Einsatz von ökologischen Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen
Erhalt/Entwicklung klimarelevanter Räume und Verbesserung des urbanen Mikroklimas	Keine direkte Auswirkung	/
Minderung der Luftschadstoffe mit schädlicher Auswirkung auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt	Reduktion von Luftschadstoffen aus den Heizungen	/
Landschaft		
Sicherung und Weiterentwicklung der Landschaft in ihrer Vielfalt und Eigenart	Durch den Abbau von fossilen oder mineralischen Rohstoffen, sowie den Anbau nachwachsender Rohstoffe können negative Auswirkungen auftreten	Verstärkter Einsatz von ökologischen Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen

Tab. 15: Steckbrief Natur- und Landschaftswirkung von energetischer Sanierung.

Technologie: Gründächer und Fassadenbegrünung		
Kategorie/Ziel	Erläuterung potenzieller Auswirkungen	Mögliche Vermeidungs-/ Verminderungsmaßnahmen
Tiere, Pflanzen, biologische Vielfalt		
Schutz von Tieren, Pflanzen und deren Lebensräumen	Gründächer und Fassadenbegrünungen sind neu geschaffene Lebensräume an Gebäuden.	
	Die Lebensräume sind auf den Dächern und Fassaden stark witterungsexponiert. So können je nach Substratdecke Dachflächen im Winter z. B. ganz durchfrieren, was ein Überwintern im Boden nicht möglich macht oder bei Starkregenereignissen je nach Drainageleistung leicht überflutet werden.	

Technologie: Gründächer und Fassadenbegrünung		
Kategorie/Ziel	Erläuterung potenzieller Auswirkungen	Mögliche Vermeidungs-/ Verminderungsmaßnahmen
	Lebensräume können hochspezifisch sein und z. B. Trockenrasenstandorten ähneln sind aber in der urbanen Umgebung oftmals nicht vernetzt und somit für bodengebundene Tierarten trotz möglicher Eignung als Lebensraum schwer erreichbar.	
Schutzgebiete und Biotopeverbundsystem	Keine erheblichen Auswirkungen	/
Regionstypische Biodiversität sichern	Gründächer und Fassadenbegrünungen sind neu geschaffene Lebensräume an Gebäuden.	Bei der Planung auf regionstypische Pflanzengesellschaften achten.
Boden/Fläche		
Sicherung oder Wiederherstellung der Bodenfunktion und -struktur	Keine direkte Auswirkung	/
Senkung der Schadstoffbelastung im Boden	Keine direkte Auswirkung	/
Wasser		
Gute ökologische und chemische Qualität der Oberflächengewässer	Keine direkte Auswirkung	/
Guter chemischer und mengenmäßiger Zustand des Grundwassers	Gründächer bieten zusätzliche Wasserspeicherkapazitäten und wirken als Puffer bei Starkregenereignissen Bewässerungssysteme müssen bei wandgebundener Fassadenbegrünung zusätzlich geplant werden.	/
Klima/Luft		
Minderung der Treibhausgasemissionen	Gründächer und Fassadenbegrünungen reduzieren den Energiebedarf des Gebäudes und sparen (fossile) Energieträger ein. Die multifunktionale Nutzung von Flächenpotentialen durch die Kombination von Energieerzeugungsanlagen und Begrünung bietet ebenso Vorteile wie der entstehende Mehrwert einer Begrünung mit Dämmwirkung.	Kombination mit EE-Anlagen sollte gefördert werden
Erhalt/Entwicklung klimarelevanter Räume und Verbesserung des urbanen Mikroklimas	Wirkt sich positiv auf das Mikroklima um das Gebäude herum aus.	/

Technologie: Gründächer und Fassadenbegrünung		
Kategorie/Ziel	Erläuterung potenzieller Auswirkungen	Mögliche Vermeidungs-/ Verminderungsmaßnahmen
Minderung der Luftschadstoffe mit schädlicher Auswirkung auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt	Filterleistung der Pflanzen wirkt sich positiv aus.	/
Landschaft		
Sicherung und Weiterentwicklung der Landschaft in ihrer Vielfalt und Eigenart	Architektonisch können Gebäude mit Gründächern und Fassadenbegrünungen im urbanen Raum eine abmildernde Landschaftswirkung haben.	/

5.1.8. Wärmenetze

Die Integration erneuerbarer Wärmequellen erfordert auch einen Ausbau neuer Wärmenetze sowie die Verdichtung bestehender Netze. Des Weiteren gilt es, mit Effizienzmaßnahmen die Netztemperaturen abzusenken, damit Umgebungswärme und Solarthermie effizienter eingebunden werden können.

Der Bau neuer über- oder unterirdischer Wärmeleitungen geschieht vor allem an Standorten mit einem hohen flächenbezogenen Wärmebedarf. Dies sind eher urbane Gebiete, in denen der Boden zumeist bereits versiegelt ist. Größtenteils erfolgt die Verlegung der Fernwärmeleitungen im unterirdischen Straßenraum.

Der Straßenraum hat in den vergangenen Jahren vielfältige Veränderungen erfahren und bietet beispielsweise an den Seitenstreifen Raum für Stadtgrün, welches zur Lebensqualität der Anwohner beiträgt und das urbane Klima verbessert. Bäume benötigen den Untergrund für das Wurzelwachstum, somit kann es zu einer Konkurrenz zwischen Wurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen sowie zwischen Grünstreifen und oberirdischen Fernwärmeleitungen kommen.

Der Leitungsbau für Wärmenetze kann nachteilige Auswirkungen auf das bestehende Stadtgrün haben, beispielsweise können beim Bau oder bei Wartungsarbeiten Bodenstrukturen, Bäume und Wurzelwerke beschädigt oder zerstört werden. Lokal und temporär können somit die Lebensräume von Tieren und Pflanzen phasenweise beeinträchtigt werden, ggf. sind auch langfristige bzw. irreversible Auswirkungen möglich. Neubepflanzungen und andere Maßnahmen können diese Auswirkungen ausgleichen. Ist die Leitung verlegt, so stellt diese in der Regel kein Hindernis für die Bepflanzung des urbanen Raums dar.

Die Interaktion zwischen Bäumen und Fernwärmeleitungen wurde in einem mehrjährigen Forschungsprojekt des Instituts für Unterirdische Infrastruktur (IKT) und der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) im Auftrag des AGFW umfassend erforscht (Salomon et al. 2017). In ausführlichen Versuchen wurden In-situ-Aufgrabungen an Fernwärmeleitungen bei Baumstandorten durchgeführt, ergänzend wurden Temperatur- und Feuchtemessungen an erdverlegten Fernwärmeleitungen durchgeführt auf deren Basis Wärmefelder simuliert wurden. In Laborversuchen wurde dann der Einfluss von Wärmefeldern auf Wurzelwachstum untersucht. Die Forschungsergebnisse zeigen, dass die Wärmeabstrahlung von Kunststoffmantelverbundrohr (KMR)-Fernwärmeleitungen keinen erkennbaren Einfluss auf das Wurzelwachstum von Bäumen hat.

Fazit der Untersuchungen ist, dass der Bau und Betrieb von Fernwärmeleitungen an Baumstandorten oder Grünstreifen vergleichbar ist mit dem Bau von anderen (unterirdischen) Leitungen und Kanälen. Die Auswirkungen auf Natur und Landschaft sind minimal und insbesondere durch vorausschauende Trassenbauplanung stark reduzierbar, indem beispielsweise Fernwärmeleitungen verlegt werden, wenn ohnehin Tiefbauarbeiten anstehen, oder indem Umgehungsalternativen für Vegetationsschutz gefunden werden.

5.1.9. Saisonale Wärmespeicher

Bei saisonalen Wärmespeichern sind je nach Speichertechnologie unterschiedliche Auswirkungen auf Naturschutz und Landschaft feststellbar.

Auswirkungen auf das Landschaftsbild entstehen vor allem bei Behälterspeichern, da diese je nach Speichergeometrie aufgrund ihrer Bauhöhe weithin sichtbar sind. Es ist je nach Standort der Wärmezeugung möglich, die Speicher an Orten mit geringem landschaftlichem Wert (Industrie- und Gewerbegebiete) zu installieren. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, durch gestalterische und konzeptionelle Maßnahmen bei der Auslegung die Speicher städtebaulich in die Umgebung einzubinden. So soll in Heidelberg beispielsweise ein begehrter Wärmespeicher realisiert werden (Energate 2018).

Erdbeckenwärmespeicher hingegen weisen eine sehr viel geringere oberirdische Bauhöhe auf und sind daher aus einer gewissen Entfernung weniger sichtbar und landschaftsrelevant. Beim Bau eines Erdbeckenspeichers können je nach vorheriger Flächennutzung Vegetation und Lebensräume zerstört werden. Dies sollte bei der Standortwahl Berücksichtigung finden.

Es besteht die Möglichkeit, Erdbeckenspeicher in vorhandenen Gruben zu errichten. Durch den Kiesabbau entstehen Gruben, die nach Stilllegung als Speicherstandorte genutzt werden können. Ein Projekt für einen Erdbeckenwärmespeicher in einer ehemaligen Kiesgrube mit einem Volumen von 500.000 m³ im Landkreis München ist in Planung (Teuffer 2020).

Negative Auswirkungen von Aquiferwärmespeichern und Erdsondenwärmespeichern auf die Natur sind eher gering. Allgemeingültige Aussagen bezüglich der Auswirkungen sind nicht möglich, da an dem potenziellen Standort spezifische Randbedingungen vorherrschen.

Die Gefahren durch den obertägigen Austritt von Betriebsmitteln, Einträge während der Bohrung oder der korrekten Abdichtung der Bohrungen sind gemäß dem Stand der Technik minimierbar. Eine relevante Beeinflussung der Grundwassertemperatur in oberflächennahen Bereichen durch Aquifere ist nicht feststellbar. (Degenhart et al. 2019)

Die Fläche über den Aquifer- und Erdsondenwärmespeichern kann nach Fertigstellung der Speicher genutzt werden. Der Erdsondenwärmespeicher in Crailsheim wurde beispielsweise nach Inbetriebnahme begrünt und fügt sich damit nahtlos in die landschaftliche Umgebung ein. (Riegger 2008)

5.2. Flächenwirkung der Technologien im Vergleich

In diesem Abschnitt werden die Wirkungen der Technologien zur Erzeugung und Speicherung von erneuerbarer Wärme in Hinblick auf ihre oberirdische Flächeninanspruchnahme geprüft und quantitativ miteinander verglichen. Bei der Betrachtung des Flächenbedarfs findet an dieser Stelle noch keine Betrachtung der Art des Flächenverbrauchs und damit der Naturferne der Flächen statt (vgl. Hemerobie-Konzept (Fehrenbach et al. 2020)). Die Wirkung auf Naturschutz und Landschaft wird in dieser Studie separat analysiert.

Das Ziel dieses Arbeitspaketes ist es, für die flächenrelevanten Technologien die jeweiligen flächenspezifischen jährlichen Wärmeerträge in Wärme pro Fläche (MWh/ha) anzugeben.

Diese werden miteinander verglichen, um eine Einordnung des Flächenbedarfs der Technologien zu ermöglichen.

Der wärmebezogene jährliche Flächenbedarf wird in diesem Rahmen festgelegt auf die oberirdische Landfläche, die beansprucht wird, um eine Einheit Wärme zu generieren. Bei Technologien, die keinen relevanten Flächenbedarf aufweisen, beträgt dieser 0 m²/MWh.

Folgende erneuerbare Wärmetechnologien weisen einen relevanten Flächenbedarf auf, der nachgehend quantifiziert wird:

- Power-to-Heat: Flächenbedarf für die Erzeugung von EE-Strom,
- Wärmepumpe: Flächenbedarf für die Erzeugung von EE-Strom,
- Power-to-Gas: Flächenbedarf für die Erzeugung von EE-Strom,
- Biogene Brennstoffe, die speziell zur energetischen Nutzung angebaut werden (Anbaubiomasse): Flächenbedarf für die Anbaufläche,
- Solarthermie: Flächenbedarf für die Kollektorstandfläche,
- Saisonale Wärmespeicher: Flächenbedarf für den Wärmespeicher.

Weitere Flächenbedarfe für die Umwandlungs- und Regelungsanlagen werden im Vergleich zur Fläche für den eingesetzten Strom bzw. Brennstoff oder Kollektorfelder in dieser Betrachtung vernachlässigt. Nicht einbezogen werden daher beispielsweise PtH-Anlagen, PtG-Anlagen zur Elektrolyse und ggf. Methanisierung, Wärmetauscher und weitere Komponenten der Wärmepumpen, Verbrennungs-/Vergasungs-/Vergärungsanlagen für die Verwertung der biogenen Brennstoffe bzw. der synthetischen Gase sowie Heizzentralen bei der Solarthermie. Der Flächenbedarf für die direkten Umwandlungs- bzw. Regelungsanlagen ist im Vergleich zum Flächenbedarf zur Herstellung der eingesetzten Brennstoffe bzw. des eingesetzten Stroms bzw. der Kollektorfelder sehr gering und ist häufig nicht linear mit der installierten Leistung verknüpft (angegebene Werte gelten für Anlagengrößen von etwa 1 MW). Daher ist die Berücksichtigung bei der Angabe der benötigten Fläche je erzeugter MWh Wärme methodisch nicht integrierbar.

Einige Technologien weisen nur einen sehr geringen oberirdischen Flächenbedarf auf oder werden auf Flächen installiert, die vorrangig bereits einen anderen Zweck erfüllen (Prinzip Multicodierung (Sandrock et al. 2020), wie beispielsweise Aufdach-Photovoltaik oder -Solarthermie). Für diese Technologien wird kein erheblicher zusätzlicher Flächenbedarf festgestellt (Reichmuth et al. 2012):

- Aufdach-Photovoltaikanlagen (Flächenbedarf von etwa 6,74 m²/MWh⁸, aufgrund von Doppelnutzung einer bereits versiegelten Fläche nicht einbezogen),
- Tiefengeothermie (kein erheblicher oberirdischer Flächenbedarf, abgesehen von den Umwandlungsanlagen),
- Wasserkraft (Ausbau nahezu abgeschlossen, Fläche der Stauseen, die energetisch genutzt werden, beträgt etwa 159 km²)⁹,
- Rest- und Abfallstoffe,
- Aufdach-Solarthermie (Doppelnutzung der Dachfläche; vgl. Aufdach-PV).

Effizienzmaßnahmen wie die Gebäudedämmung und Dach- oder Fassadenbegrünungen weisen keinen direkten Flächenbedarf auf. Indirekt besteht für die Bereitstellung der Rohstoffe für die Dämmung von Gebäuden ein gewisser Flächenbedarf, der im Rahmen dieses Arbeitspaketes nicht quantifiziert wird. In der Rescue-Studie (Purr et al. 2019) wird eine mögliche Kumulierung der aufgewendeten Rohstoffe für die energetische Sanierung von 2010 bis 2050 für das Szenario GreenEe1 dargestellt (s. Abb. 43), die einen Eindruck der Größenordnungen des

⁸ Annahmen PV-Dachanlagen: 6 m²/kW, VBH 890 h/a; Eigene Berechnung auf Basis von (Wirth et al. 2020)

⁹ Eigene Berechnungen auf Basis von https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_Talsperren_in_Deutschland

Rohstoffaufwandes vermittelt. Während ökologische Dämmstoffe als naturverträglicher gelten und für ein besseres Raumklima sorgen können, wird für ihre Bereitstellung jedoch mehr Fläche benötigt als für die Bereitstellung fossiler Dämmstoffe.

Infrastrukturmaßnahmen wie die Ausweitung und Verdichtung der Wärmenetze bzw. Effizienzmaßnahmen für diese wie die Absenkung der Temperaturen weisen keinen relevanten oberirdischen Flächenbedarf auf.

Dennoch haben die hier nicht näher behandelten Technologien, Effizienzmaßnahmen und Infrastrukturen Auswirkungen auf Natur und Landschaft.

Die Aussagekraft der quantifizierten Flächenbedarfe der jeweiligen Technologien ist eingeschränkt und immer vor dem Hintergrund der getroffenen Annahmen zu interpretieren.

Zum einen wird die oberirdische Landfläche je nach Technologie bzw. getroffenen Annahmen mit einer sehr unterschiedlichen Intensität beansprucht. Beispielsweise werden bei der Flächeninanspruchnahme von Onshore-Windenergieanlagen die Abstandsflächen zwischen den WEA mit eingerechnet, wodurch sich ein höherer Bedarf ggü. der versiegelten Standfläche der WEA ergibt. Grundlegende Annahmen wie diese sollten bei der Interpretation der Werte berücksichtigt werden.

Zum anderen hängen die errechneten Flächenbedarfe in einigen Fällen in besonderem Maß von den getroffenen Annahmen ab. Dies ist beispielsweise bei Biogas, Biomethan und biogenen Festbrennstoffen der Fall. Der angenommene Substratmix für die Vergärungsanlagen sowie der Anteil von KUP an den Festbrennstoffen ist ausschlaggebend für die Flächenbedarfe der Technologien. Für Biogas und Biomethan wird der aktuelle Substratmix in Anlagen als Basis verwendet und zusätzlich die Sensitivität für eine Veränderung des Verhältnisses von Anbau- zu Reststoffsubstraten untersucht. Für biogene Festbrennstoffe werden die Flächenbedarfe für KUP bzw. Restholz gesondert angegeben.

In den jeweiligen Abschnitten der Technologien sowie in den entsprechenden Infoboxen zu den Grafiken sind die getroffenen Annahmen detailliert ausgeführt.

Bei der Ermittlung von Flächen, die zur Erzeugung von Strom oder Wärme in KWK-Anlagen erzeugt wird, werden jeweils die Gesamtwirkungsgrade angesetzt. Würden nur die elektrischen bzw. thermischen Wirkungsgrade angesetzt, so fielen die Flächenbilanzen für KWK-Strom bzw. -Wärme deutlich schlechter aus und es bliebe unberücksichtigt, dass mit der angegebenen Fläche zeitgleich ein zweites Produkt erzeugt wird.

Ein realistischer Vergleich der KWK-Technologien mit den anderen Technologien ist daher nur möglich, wenn die Gesamteffizienz der KWK-Anlagen angesetzt wird.

5.2.1. Erneuerbarer Strom

Erneuerbarer Strom (EE-Strom) wird in Deutschland mittels Windenergieanlagen an Land und auf See, Photovoltaik, biogenen Brennstoffen, Wasserkraft und Geothermie gewonnen. Der Flächenbedarf des EE-Stroms setzt sich anteilig aus den Flächenbedarfen der jeweiligen Technologien zusammen. Für die Anteile der Technologien an der EE-Stromerzeugung werden hier die Werte für 2019 verwendet. Der hier ermittelte Flächenbedarf für erneuerbaren Strom gilt für den in Abb. 43 dargestellten Erzeugungsmix für das Jahr 2019. In Zukunft ist möglich, dass sich dieser Erzeugungsmix und damit der spezifische Flächenbedarf von erneuerbarem Strom ändern wird.

Die Flächenbedarfe der verschiedenen Technologien basieren auf Statistiken zu existierenden Anlagen (Agentur für erneuerbare Energien 2020) sowie auf Annahmen zum Flächenverbrauch aus unterschiedlichen Studien, u. a. (Purr et al. 2019) sowie (Matthes et al. 2018).

Zudem werden basierend auf typischen Kennzahlen der Technologien und Erträge von biogenen Brennstoffen Berechnungen durchgeführt (FNR).

Relevante Flächenbedarfe weisen Anbau-Biomasse (anteilig ist Anbaubiomasse sowohl in dem Substratmix zur Herstellung von Biogas/Biomethan sowie in fester Biomasse enthalten), Photovoltaik-Freiflächenanlagen und Onshore- bzw. Offshore-Windenergieanlagen auf.

Biomasse aus Reststoffen, PV-Dachanlagen, Wasserkraft und Geothermie weisen keine erheblichen zusätzlichen oberirdischen Flächenbedarfe an Land auf.

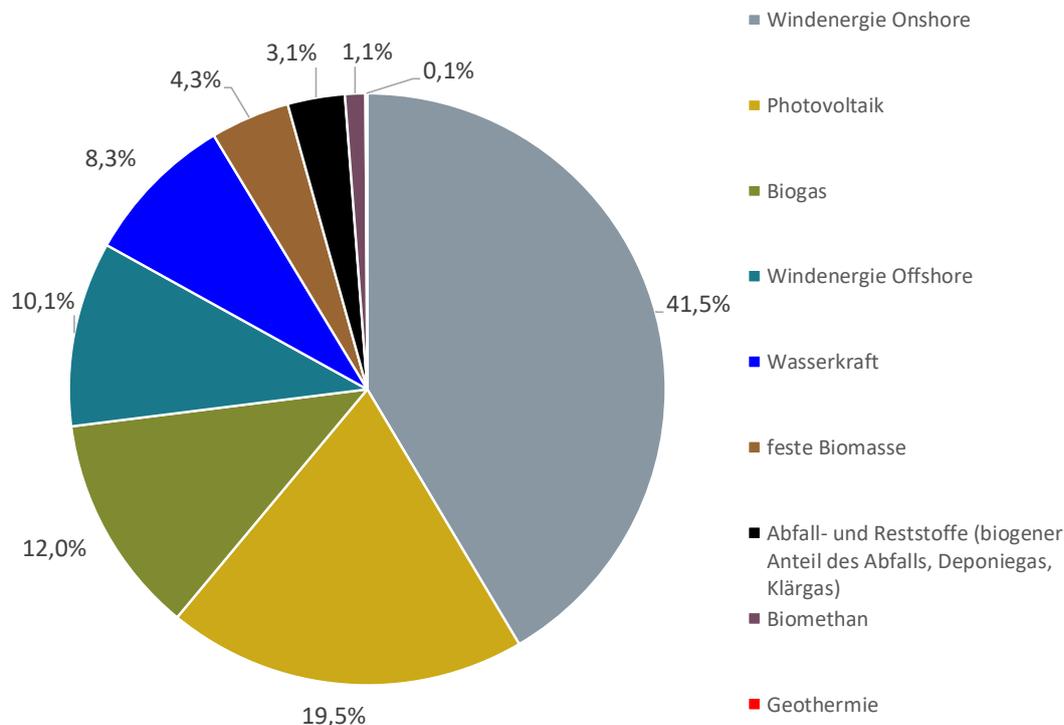


Abb. 43: Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Jahr 2019. (Quelle: Umweltbundesamt auf Basis AGEE-Stat)

Windenergie Onshore

Windenergieanlagen an Land (Onshore-WEA) stellten 2019 mit rund 42 % den relevantesten Anteil an der erneuerbaren Stromerzeugung in Deutschland dar (s. Abb. 43).

Bei der Ermittlung des Flächenbedarfs von Windenergieanlagen an Land ist zu beachten, dass ein Großteil der dafür beanspruchten Fläche weiterhin landwirtschaftlich genutzt werden kann. Um die gegenseitige Beeinflussung zu minimieren, müssen Windenergieanlagen einen Mindestabstand zueinander einhalten. Die Fundamentsflächen von Windenergieanlagen, die den Boden versiegeln, betragen maximal ein Prozent der Abstandsflächen (Umweltbundesamt 2020). Bei den hier beschriebenen Werten handelt es sich nicht um die reine Fundamentsfläche, sondern um die gesamte Fläche, die von Windparks bedeckt wird.

Im Jahr 2020 beträgt die für WEA an Land in Deutschland genutzte Fläche rund 270.000 Hektar. Es werden 112 TWh Strom mit den Onshore-WEA erzeugt, es ergibt sich also ein Flächenbedarf für den Onshore-WEA-Bestand von ca. 24,1 m²/MWh_{Strom} (Agentur für erneuerbare Energien 2020). Dieser Wert wird abgeglichen mit Angaben zum spezifischen Flächenbedarf¹⁰ von Onshore-WEA aus der Rescue-Studie von 22,9 m²/MWh_{Strom} und aus einer Studie im Auftrag des WWF, durchgeführt vom Öko-Institut und von Prognos (Matthes et al. 2018),

¹⁰ Annahme durchschnittliche Vollbenutzungsstunden von Onshore-WEA: 1700 h/a, auf Basis von (Fraunhofer IWES lfd.)

die einen Flächenbedarf von $26,4 \text{ m}^2/\text{MWh}_{\text{Strom}}$ (Zubau, Starkwind-Anlagen) angibt. Im Weiteren wird hier der mittlere Flächenbedarf von $24,5 \text{ m}^2/\text{MWh}_{\text{Strom}}$ für die Erzeugung von Strom mit Onshore-WEA in Deutschland verwendet. Der flächenspezifische Stromertrag von Onshore-WEA-Strom beträgt $409,5 \text{ MWh/ha}$.

Windenergie Offshore

Auch Windenergieanlagen auf See (Offshore-WEA) spielen eine entscheidende Rolle bei der erneuerbaren Stromerzeugung und machten im Jahr 2019 rund 10 % davon aus (s. Abb. 43).

Gerade vor dem Hintergrund der sich abzeichnenden Flächenengpässe bei der Windenergie an Land und den bestehenden Akzeptanzproblemen nimmt die Bedeutung der Offshore-Stromerzeugung zu. Wegen stetigeren und stärkeren Windverhältnissen sind für Offshore-WEA bei gleicher installierter Leistung im Vergleich zu Onshore-WEA höhere Stromerträge möglich. Während Onshore-WEA auf durchschnittlich 1.700 Vollbenutzungsstunden (VBH) kommen, sind bei Offshore-WEA rund 3.500 VBH üblich. (Fraunhofer IWES lfd.)

Auch die Fläche auf dem Meer ist ein begehrtes Gut. Die Nutzung zur Installation von Offshore-Windparks konkurriert beispielsweise mit Fischfang, Schifffahrt, Erdöl- und Erdgasgewinnung, Kiesgewinnung, militärischer Nutzung und Schutzgebieten.

Bei der Stromerzeugung mittels Offshore-WEA fällt zwar kein Flächenbedarf an Land an, es bestehen jedoch Nutzungskonkurrenzen und die räumliche Ausdehnung der Fläche, welche von Offshore-Windparks überplant wird, hat eine naturschutzfachliche Bedeutung. Für die Ermittlung des Flächenbedarfs von Offshore-WEA wird der Mittelwert über einige ausgewählte Offshore-Planflächen gebildet. Diese Methodik wird gewählt, da je nach Standortbedingungen und WEA-Technologie sehr unterschiedliche Flächenbedarfe anfallen können. Auf Basis des Flächenentwicklungsplanes 2050 für die deutsche Nord- und Ostsee (BSH 2020) wird der Mittelwert über sechs Windparks gebildet, für welche die Flächenangaben und die geplante Leistung gegeben sind. Es werden VBH von 3.500 Stunden jährlich angenommen.

Durchschnittlich ist ein flächenspezifischer Stromertrag von etwa $538,5 \text{ MWh/ha}$ für Offshore-WEA erreichbar (vgl. Tab. 16). Dieser Wert geht im Folgenden in die Berechnung des Flächenbedarfs für EE-Strom ein.

Bei der Angabe dieses Flächenbedarfs wird die Fläche des gesamten Offshore-Windparks eingerechnet. Ein anderes Bild ergibt sich, wenn nur die von den Rotorblättern überstrichene Fläche berechnet wird. Mit durchschnittlich 368 W/m^2 spezifischer Flächenleistung (bezogen auf die vom Rotorblatt überstrichene Fläche) (WindGuard 2019) und weiterhin 3.500 VBH ergibt sich ein flächenspezifischer Stromertrag von 12.880 MWh/ha . Würde sich also auf die vom Rotorblatt überstrichene Fläche bezogen, so wäre der Ertrag um den Faktor 24 höher, als wenn die gesamte Windparkfläche (inklusive Abstandsflächen) einbezogen wird.

Tab. 16: Ermittlung des flächenspezifischen Stromertrags für Offshore-WEA anhand von BSH (2020).

Offshore WEA	Fläche [km ²]	Leistung [MW]	Kalenderjahr Ausschreibung	leistungsbezogener Flächenbedarf [m ² /kW]	spezifische Leistung [MW/ha]	Volllaststunden (VBH) [h/a]	spezifischer Stromertrag [MWh/ha]
N-3.7	17	225	2021	75,6	0,13	3500	463,2
N-3.8	23	433	2021	53,1	0,19	3500	658,9
O-1.3	25	300	2021	83,3	0,12	3500	420
N-7.2	53	930	2022	57,0	0,18	3500	614,2
N-3.5	26	420	2023	61,9	0,16	3500	565,4
N-3.6	33	480	2023	68,8	0,15	3500	509,1
Mittelwert					0,15	3500	538,5

Photovoltaikanlagen

In Deutschland werden rund 19,5 % des EE-Stroms mittels Photovoltaik-Anlagen erzeugt. Dabei handelt es sich sowohl um große PV-Freiflächenanlagen als auch um meist kleinere Dachanlagen. Diese weisen jeweils einen unterschiedlichen Flächenbedarf auf, daher ist das Verhältnis von Freiflächenanlagen zu Dachflächenanlagen entscheidend.

Auch wenn aktuell der Anteil der Dachanlagen an der Erzeugung von PV-Strom in Deutschland größer ist als der Anteil an Freiflächenanlagen¹¹, so gehen Studien davon aus, dass sich diese Anteile in Zukunft angleichen werden¹². Für die Berechnung des Flächenbedarfs von EE-Strom wird hier davon ausgegangen, dass 50 % der installierten PV-Leistung auf Dachanlagen und die restlichen 50 % auf Freiflächenanlagen entfallen. Bei PV-Freiflächenanlagen gibt es bereits zahlreiche Konzepte zur Multicodierung, bei denen beispielsweise kontaminierte Flächen wie Alt-Deponien oder Infrastrukturflächen wie Grünstreifen oder Lärmschutzwälle entlang von Straßen genutzt werden. Die Qualität der Flächennutzung wird hier nicht aufgeschlüsselt, im Kapitel Natur- und Landschaftswirkung wird jedoch näher auf diesen Aspekt eingegangen.

PV-Dachanlagen nutzen das Dach als funktionale Fläche zusätzlich zur Stromerzeugung. Bei dieser multicodierten Nutzung kommt es zu keiner Umwidmung oder Neuversiegelung von Flächen. Zudem ist keine Konkurrenz zu einer aus naturschutzfachlicher Sicht wertvollen Nutzung gegeben, da beispielsweise Dachbegrünungen und Aufdach-PV (bzw. Solarthermie) kombinierbar sind und sich bei dieser Kombination u.U. sogar Synergieeffekte ergeben können. Daher geht der Flächenbedarf von PV-Dachanlagen bei der Ermittlung des Gesamt-Flächenbedarfs für EE-Strom mit 0 m²/MWh ein, auch wenn real ein Flächenbedarf von ca. 6,74 m²/MWh¹³ für PV-Dachanlagen in Deutschland üblich ist.

PV-Freiflächenanlagen weisen einen Flächenbedarf von circa 18,0 m²/MWh auf bzw. erzeugen 575,5 MWh/ha. Dieser Wert basiert auf Daten zur aktuellen Situation der Photovoltaikanlagen in Deutschland des Fraunhofer ISE (Wirth et al. 2020). Es wird von circa 1,7 ha/MW installierter PV-Leistung ausgegangen sowie von typischerweise jährlich 980 VBH (Mathes et al. 2018).

¹¹ Anteil von Freiflächenanlagen an der installierten PV-Leistung 2017: 25,5 %. Quelle: Agentur für Erneuerbare Energien (Ifd.): Deutschland – Solar. Auf Basis von AGEE-Stat 2018.

¹² So z. B. die Annahme für die meisten Szenarien in der Rescue-Studie (Purr et al. 2019).

¹³ Annahmen PV-Dachanlagen: 6 m²/kW, VBH 890 h/a (Wirth et al. 2020)

Biogas/Biomethan

Rund 12 % des erneuerbaren Stroms in Deutschland wurde im Jahr 2019 aus Biogas generiert. Rund 1,1 % des erneuerbaren Stroms wird aus Biomethan hergestellt (s. Abb. 43).

Der Substrateinsatz für die Erzeugung von Biogas wird entsprechend Tab. 17 angenommen, dadurch ergeben sich die dargestellten Methanerträge je Hektar. Es wird angenommen, dass Exkrememente keinen eigenen Flächenbedarf haben, sondern als Nebenprodukt bei der Tierhaltung anfallen.

Tab. 17: Substrateinsatz in Biogasanlagen (2017). (Kern et al. 2010), FNR Faustzahlen

Substrat	Gewichtsprozent	Methanertrag massebezogen	Flächenertrag	Flächenbedarf [m ² Fläche/m ³ Methan]
NawaRo (Maissilage, Getreide GPS, Grassilage)	45,7 %	98,9 Nm ³ /t	40 t/ha	2,53
Exkrememente	49,2 %	66,0 Nm ³ /t	Kein Flächenbedarf	0
Kommunaler Bioabfall	3,1 %	52,0 Nm ³ /t	Kein Flächenbedarf	0
Reststoffe Industrie, Gewerbe und Landwirtschaft	2,0 %	52,0 Nm ³ /t	Kein Flächenbedarf	0
Biogas - Gesamt	100 %	80,3 Nm ³ /t	87,53 t/ha	1,42

Die Substratzusammensetzung in Biogasanlagen mit angeschlossener Methanaufbereitung unterscheidet sich deutlich von der Zusammensetzung der Substrate in Biogasanlagen ohne entsprechende Aufbereitung des Biogases zu Biomethan. Typischerweise sind Biomethananlagen deutlich größer und werden mit weniger Exkrementen und mehr NawaRo beschickt. Zur Herstellung von Biomethan wird aktuell also durchschnittlich mehr Anbaubiomasse eingesetzt als zur Herstellung von Biogas, wodurch Biomethan beim Flächenverbrauch deutlich schlechter abschneidet.

Die Substratzusammensetzung und die Methanerträge für Biomethan sind in Tab. 18 gezeigt.

Tab. 18: Substrateinsatz in Biogasanlagen mit Gasaufbereitung zur Herstellung von Biomethan (2016). (Kern et al. 2010), FNR Faustzahlen

Substrat	Gewichtsprozent	Methanertrag massebezogen	Flächenertrag	Flächenbedarf [m ² Fläche/m ³ Methan]
NawaRo (Maissilage, Getreide GPS, Grassilage)	73 %	98,9 Nm ³ /t	40 t/ha	2,53
Exkrememente	13 %	66 Nm ³ /t	Kein Flächenbedarf	0
Kommunaler Bioabfall	6 %	52 Nm ³ /t	Kein Flächenbedarf	0
Reststoffe Industrie, Gewerbe und Landwirtschaft	8 %	52 Nm ³ /t	Kein Flächenbedarf	0
Biomethan - Gesamt	100 %	88,06 Nm ³ /t	54,80 t/ha	2,07

Für die Stromerzeugung aus Biogas oder Biomethan wird im Folgenden von einer Nutzung der biogenen Gase in einer KWK-Anlage mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 38 %, einem thermischen Wirkungsgrad von 44 % und einem Gesamtwirkungsgrad von 82 % ausgegangen. Diese Werte entsprechen mittleren Kennzahlen für Biogas/-methan-BHKWs. (FNR Faustzahlen)

Der flächenspezifische Energieertrag aus Biogas-KWK beträgt somit 57,5 MWh/ha bzw. 174,0 m²/MWh.

Mit Biomethan betriebene KWK-Anlagen erzeugen je Hektar Anbaufläche 39,4 MWh Strom und Wärme, der Flächenbedarf beträgt 253,6 m²/MWh¹⁴.

Feste Biomasse

Der Anteil fester Biomasse an den Erneuerbaren Energie für die Stromproduktion beträgt 4,3 %. Strom aus fester Biomasse wird in Biomasse(heiz)kraftwerken oder durch sogenanntes Cofiring in Kraftwerken, beispielsweise in Kohle-, Müllheiz- oder Ersatzbrennstoffkraftwerken erzeugt.

Je nachdem, wie hoch der Anteil an eingesetzter Anbaubiomasse gegenüber den Abfall- und Resthölzern ist, fällt der flächenspezifische Energieertrag sehr verschieden aus.

Für die hier durchgeführte Berechnung wird der Anteil der eigens zur Strom- und Wärmeproduktion angebauten Biomasse in Anlehnung an die Daten von Scheftelowitz et al. (2014) mit 4 % festgesetzt. Es wird angenommen, dass durch die Nutzung von Altholz, Waldrestholz und Schadholz, Pellets, Landschaftspflegeholz, Rinde und Sägenebenprodukten kein Flächenbedarf entsteht, sondern diese bei der Bewirtschaftung der Wälder und bei der stofflichen Holzverwertung ohnehin anfallen. KUP-Holz geht mit einem jährlichen Ertrag von 40 MWh/ha in die Berechnung ein.

Es wird angenommen, dass Strom aus Festbiomasse in KWK-Anwendungen erzeugt wird. Unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades von 82 % folgt ein flächenspezifischer Energieertrag von 820 MWh/ha bzw. ein Flächenbedarf von 12,2 m²/MWh¹⁵.

Wasserkraft und Tiefengeothermie

Die Flächenbedarfe von Wasserkraft sowie von Tiefengeothermie zur Stromerzeugung werden in den hier durchgeführten Berechnungen vernachlässigt und gehen jeweils mit einem Flächenbedarf von 0 m²/MWh in die Berechnung ein. Bei der Wasserkraft ist das technisch-ökologische Potenzial zur energetischen Nutzung in Deutschland bereits weitestgehend ausgeschöpft und kann ggf. durch Optimierung und Modernisierung bzw. durch die Reaktivierung von Wasserkraftanlagen an bereits bestehenden Stauseen geringfügig ausgebaut werden (Purr et al. 2019). Die dafür genutzten Flächen (z. B. Stauseen, Talsperren) sind integrale Teile der Landschaften. Eine Fläche von etwa 159 km² wird in Deutschland von Stauseen bedeckt, die vorrangig zur Energieerzeugung genutzt werden¹⁶ (entspricht etwa 0,04 % der Gesamtfläche Deutschlands). Im Jahr 2019 wurden etwa 20 TWh Strom aus Wasserkraft erzeugt (Pumpspeicher- und Laufwasserkraftwerke). Geothermieanlagen weisen im Betrieb keinen erheblichen oberirdischen Flächenbedarf auf.

¹⁴ Weitere Annahmen: Heizwert Methan 9,968 kWh/m³. Berechnung Biogas-KWK-Strom: 7.030,31 Nm³/ha*9,968 kWh/m³*0,46*0,82 // Berechnung Biomethan-KWK-Strom: 4.825,04 Nm³/ha*9,968 kWh/m³*0,46*0,82

¹⁵ Heizwert Festbiomasse: 4 kWh/kg

¹⁶ Nur große Talsperren nach der Definition von ICOLD (Internationale Kommission für große Talsperren), etwa 311 der 357 Talsperren aus Deutschland werden berücksichtigt. Angabe der Stauseefläche bei Vollstau; nur Stauseen mit energetischer Nutzung.

Erneuerbarer Strom gesamt

Insgesamt ergibt sich somit für EE-Strom der in Tab. 19 dargestellte flächenspezifische Stromertrag. Basierend auf dem Erzeugungsmix des Jahres 2019 können je Hektar etwa 278 MWh Strom auf Basis erneuerbarer Energien erzeugt werden. Der Flächenbedarf beträgt demnach 36 m²/MWh EE-Strom.

Tab. 19: Anteile der Stromerzeugungstechnologien am EE-Strommix, spezifische Energieerträge und Flächenbedarfe. Auf Basis von Abbildung 48. Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Jahr 2019. (Umweltbundesamt auf Basis AGEE-Stat)

Technologie	Anteil an EE-Strom	spezifischer Energieertrag [MWh/ha]	Flächenbedarf [m ² /MWh]
Windenergie Onshore	41,5 %	409,50	24,42
Windenergie Offshore	10,1 %	538,46	0,00
Photovoltaik Freiflächenanlagen	9,75 %	575,50	17,38
Photovoltaik Dachanlagen	9,75 %	Kein erheblicher zusätzlicher Flächenbedarf	0,00
Biogas-KWK (inkl. Wärme)*	12,0 %	57,46	174,02
Biomethan-KWK (inkl. Wärme)*	1,1 %	39,44	253,56
feste Biomasse KWK (inkl. Wärme)*	4,3 %	820,00	12,20
Abfall- und Reststoffe (biogener Anteil des Abfalls, Deponiegas, Klärgas)	3,1 %	Kein erheblicher zusätzlicher Flächenbedarf	0,00
Wasserkraft	8,3 %	Kein erheblicher zusätzlicher Flächenbedarf	0,00
Geothermie	0,1 %	Kein erheblicher zusätzlicher Flächenbedarf	0,00
Mittelwert (gewichtet; geht später in die Berechnung des Flächenbedarfs für Wärme auf Basis von EE-Strom ein, vgl. Abschnitte 5.1.2, 5.1.3, 5.1.4)	Summe: 100 %	263,85	37,90

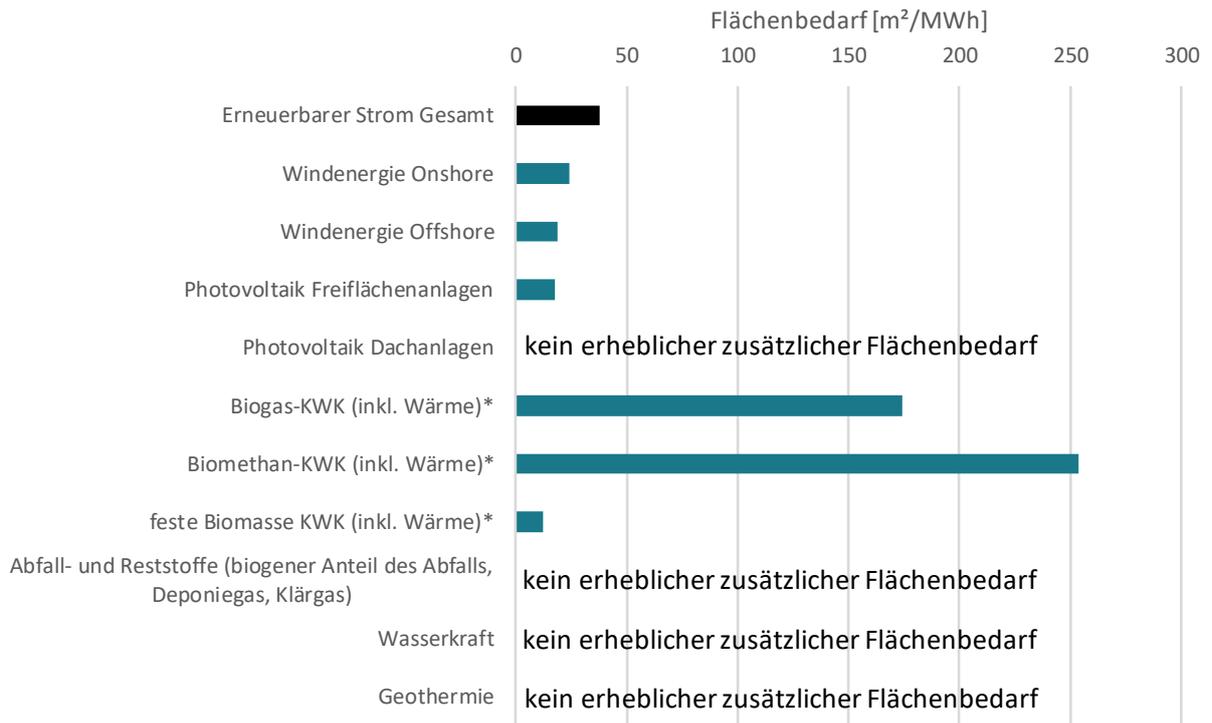


Abb. 44: Flächenbedarf für die Erzeugung einer MWh Strom innerhalb eines Jahres in Deutschland.

Kurz-Informationen zu den Flächenbedarfen von EE-Strom und deren Einordnung

Definition der „Flächenbedarfe“: Mit dem gewählten methodischen Ansatz soll ein Vergleich der Flächeneffizienzen der Technologien ermöglicht werden, der jedoch losgelöst von der naturschutzfachlichen Bewertung dieser Flächen steht. In Kombination mit der naturschutzfachlichen Bewertung ist somit eine umfassende Bewertung der Technologie-Auswirkungen möglich.

Im Gegensatz zu der in der Literatur diskutierten Methodik zur Bewertung der Flächennutzung in Ökobilanzen (z. B. Hemerobie-Konzept), bei denen die Naturnähe einer Fläche als Maß für den menschlichen Einflussgrad im Vergleich zu einer Referenzfläche bewertet wird, nähert sich unser gewähltes Vorgehen der Problematik anhand eines gänzlich anderen Weges.

Hier steht die Fläche als eine Ressource für sich. Vor allem in den dicht besiedelten Regionen der Welt, zu denen Deutschland gehört, ist dieses Gut für verschiedene Anwendungsfälle sehr begehrt, zu denen auch die Stromerzeugung mittels erneuerbarer Energiequellen gehört. In Abb. 44 soll die Effizienz des Verbrauchs dieser Ressource durch unterschiedliche Technologien quantitativ miteinander verglichen werden. Die Qualität der Flächennutzung aus naturschutzfachlicher Sicht fließt nicht in die Betrachtung ein.

Im Folgenden werden die wichtigsten Annahmen für die jeweiligen Technologien aufgeführt (für Details, s. die vorangehenden Abschnitte zu den Technologien in diesem Kapitel).

Windenergie Onshore: Die angegebene Fläche bezieht sich auf die gesamte Fläche, die von Windparks bedeckt wird (inkl. Abstandsflächen). Es handelt sich um einen Mittelwert der Anlagen in Deutschland, in Einzelfällen kann z. B. durch eine veränderte Aufstellungsdichte ein anderer Flächenbedarf resultieren. Würden nur die Fundamentflächen betrachtet, so wäre der Bedarf nur ein Prozent der angegebenen Fläche. In der Praxis werden die Abstandsflächen häufig landwirtschaftlich genutzt. Der Volumenbedarf (extreme Höhe der WEA, die dadurch weithin sichtbar sind und spezielle naturschutzfachliche Auswirkungen z. B. auf Vögel haben) wird hier nicht berücksichtigt.

Windenergie Offshore: Die angegebene Fläche bezieht sich auf die gesamte Fläche, die von Windparks bedeckt wird (also inkl. Abstandsflächen). Es handelt sich um einen Mittelwert einiger ausgewählter Windparks in Nord- und Ostsee, in Einzelfällen kann z. B. durch eine veränderte Aufstellungsdichte ein anderer Flächenbedarf resultieren.

PV Freifläche: Die gesamte für die Freiflächenanlage genutzte Fläche (inkl. Abstandsflächen, Kabelführung, etc.) wird berücksichtigt. Der Versiegelungsgrad ist je nach Art und Standort der Installation sehr unterschiedlich von kaum versiegelt (Befestigung durch aufliegende Gewichte) bis gänzlich versiegelt (Installation auf bereits versiegelter Fläche). Eine anderweitige Nutzung der PV-Anlagen ist möglich (z. B. Weideland, Ackerbau, etc., Konzept Multicodierung).

PV Aufdach: Da die genutzte Fläche (das Dach) bereits vorrangig eine andere Funktion erfüllt, und des Weiteren parallel zur Aufdach-PV Dachbegrünungen o. ä. möglich sind, wird der Flächenbedarf als kein erheblicher zusätzlicher Bedarf gekennzeichnet. De facto ist allerdings ein Dachflächenbedarf von etwa 6,7 m²/MWh erforderlich.

Biogas (KWK inkl. Wärme): Wirkungsgrad elektrisch 38 %, thermisch 44 %. Flächenbedarf stark abhängig von der Substratmischung. Hier dargestellt für den durchschnittlichen Substratmix 2017 (NaWaRo 45,7 %; Exkremente 49,2 %; kommunaler Bioabfall 3,1 %; Reststoffe 2 %).

Biomethan (KWK inkl. Wärme): Wirkungsgrad elektrisch 38 %, thermisch 44 %. Flächenbedarf stark abhängig von der Substratmischung. Hier dargestellt am durchschnittlichen Substratmix 2016 (NaWaRo 73 %; Exkremente 13 %; kommunaler Bioabfall 6 %; Reststoffe 8 %)

Biogene Festbrennstoffe – Restholz: Aufgrund der unterschiedlichen Entwicklungsstadien der Wälder sowie der daraus resultierenden Bewirtschaftung (Durchforstungen) kann kein zusätzlicher Flächenbedarf für die Energieholznutzung ausgewiesen werden. Die Waldflächen stehen keiner alternativen Nutzung zur Verfügung und die bei Durchforstungen (Ziel Wertholzproduktion) anfallenden Energieholzmengen fallen quasi als Neben- oder Abfallprodukt an.

Biogene Festbrennstoffe – KUP (Kessel): Holz aus KUP geht mit einem jährlichen Ertrag von 40 MWh/ha in die Berechnung ein. Die Flächen könnten alternativ auch anderweitig genutzt werden.

Feste Biomasse KWK (inkl. Wärme): Wirkungsgrad elektrisch 38 %, thermisch 44 %. Flächenbedarf stark abhängig von der Substratzusammensetzung. Hier dargestellt für Anteil KUP Holz 4 %, Anteil Restholz 96 %. (DBFZ Betreiberbefragung 2014)

Abfall- und Reststoffe (biogener Anteil des Abfalls, Deponiegas, Klärgas): Durch die ausschließliche Nutzung von Rest- und Abfallstoffen fällt hier kein nennenswerter Flächenbedarf an.

Wasserkraft: Da der Ausbau der Wasserkraft in Deutschland als nahezu abgeschlossen gilt und die Stauseen und Flüsse auch anderweitig genutzt werden, wird kein erheblicher zusätzlicher Bedarf angegeben. De facto beträgt die in Deutschland von Stauseen¹⁷ bedeckte Fläche etwa 159 km².

Tiefengeothermie: Im Betrieb fällt für eine Geothermieanlage kein erheblicher zusätzlicher Flächenbedarf an.

5.2.2. Erneuerbare Wärme: Power-to-Heat

Bei der direkten Nutzung von Strom zur Wärmeerzeugung mittels PtH-Anlagen wird Strom mit einem Wirkungsgrad von etwa 99 % in Wärme umgewandelt.

Der flächenspezifische Wärmeertrag von PtH-Anlagen beträgt somit 261,2 MWh/ha, der Flächenbedarf 38,3 m²/MWh.

5.2.3. Erneuerbare Wärme: Wärmepumpe

Die Wärmeerzeugung mittels Wärmepumpe erfolgt auf Basis der Erschließung unterschiedlicher Umgebungswärmequellen. Bei Luftwärmepumpen wird die Luft über Ventilatoren angesaugt, bei erdwärmebasierten Wärmepumpen werden Kollektoren oder Sonden in den Untergrund gebaut. Die Fläche darüber kann anderweitig genutzt werden. Hier wird der Flächenbedarf für den eingesetzten EE-Strom zum Betrieb der Wärmepumpen ermittelt, der Flächenbedarf zur Erschließung der Wärmequelle wird nicht berücksichtigt.

Die Effizienz der Umwandlung von Strom und Umgebungswärme in Nutzwärme wird durch die Jahresarbeitszahl (JAZ) beschrieben. Je nach Wärmequelle, Nutztemperaturniveau, Betriebsweise und Technologie unterscheiden sich die JAZ erheblich voneinander.

Für die durchgeführten Berechnungen werden folgende JAZ angesetzt, die sich auf Basis von Literaturangaben (Bürger et al. 2017) sowie Erfahrungswerten ergeben:

- Luftwärmepumpe: JAZ = 3 (inkl. Strombedarf für das Rückkühlerfeld),
- Sole/Wasser-Wärmepumpen: JAZ = 4.

Mit der Absenkung der Vorlauftemperatur in Wärmenetzen und Heizungssystemen können Wärmepumpen effizienter betrieben werden. Zudem ist ein Fortschritt der

¹⁷ Stauseen, die vorrangig energetisch genutzt werden

Technologieentwicklung zu erwarten, sodass sich voraussichtlich in dem Zeitraum bis 2050 die JAZ der Wärmepumpen weiter verbessern werden.

Mit den angenommenen JAZ beträgt der flächenspezifische Wärmeertrag von Luftwärmepumpen etwa 791,6 MWh/ha (entspricht 12,6 m²/MWh) und von Sole/Wasser-Wärmepumpen etwa 1.055,4 MWh/ha (entspricht 9,5 m²/MWh).

5.2.4. Erneuerbare Wärme: Power-to-Gas

Für die Ermittlung des Flächenbedarfs von synthetischen strombasierten Brennstoffen zur Wärmeerzeugung müssen zum einen die Umwandlungsverluste des erneuerbaren Stroms in Gas mittels Elektrolyse oder Elektrolyse mit anschließender Methanisierung und zum anderen die Umwandlungsverluste bei der Wärmeerzeugung auf Basis der Gase in Brennstoffzelle (H₂) oder Gas-KWK/-Kessel (Methan) berücksichtigt werden (vgl. Abb. 42).

Der Flächenverbrauch der PtG-Anlagen zur Umwandlung und der Transportstrukturen wird hier analog zum Vorgehen in den anderen Abschnitten nicht mit einbezogen. Es wird ausschließlich der Flächenbedarf zur Bereitstellung des erneuerbaren Stroms betrachtet. Angenommen werden die Herstellung und anschließende Verflüssigung der Gase zum Transport.

Wasserstoff

Der Wirkungsgrad bei der Erzeugung von Wasserstoff (Umwandlung EE-Strom in Wasserstoff) wird mit 53 % (alkalische Elektrolyse und Verflüssigung) angenommen.

Die Wärmeerzeugung geschieht in Brennstoffzellen, in denen Strom und Wärme erzeugt wird. Als Gesamtwirkungsgrad der Brennstoffzelle wird 86 % angenommen.¹⁸

Es ergeben sich daher flächenspezifische Wärmeerträge von 120,3 MWh/ha bzw. ein Flächenbedarf von 83,2 m²/MWh für die Wärmeerzeugung mittels Wasserstoffs.

Synthetisches Methan

Der Wirkungsgrad bei der Erzeugung von synthetischem Methan wird mit 48 % (Verflüssigung) angenommen.

Die Wärmeerzeugung geschieht in KWK-Anlagen oder in Gaskesseln. Die Wirkungsgrade für Gas-KWK sind dieselben wie bei der Ermittlung der Stromflächenbedarfe (Gesamtwirkungsgrad von 82 %).

Für die Erzeugung von KWK-Wärme mittels synthetischen Methans ergeben sich flächenspezifische Energieerträge von 103,9 MWh/ha bzw. einen Flächenbedarf von 96,3 m²/MWh.

Die Wärmeerzeugung basierend auf synthetischem Methan in Gaskesseln weist flächenspezifische Wärmeerträge von 114,0 MWh/ha (komprimiertes Methan) bzw. einen Flächenbedarf von 87,7 m²/MWh auf.

5.2.5. Erneuerbare Wärme: Biogene Brennstoffe

Mit einem Anteil von fast 87 % aller EE bleibt die Biomasse mit großem Abstand die wichtigste erneuerbare Wärmequelle. Die feste Biomasse macht allein schon etwa 75 % der erneuerbaren Wärmeerzeugung aus. Auch im Jahr 2018 war Scheitholz das bedeutendste Brennholzsortiment in Privathaushalten. Unter dem Obergriff Scheitholz wird Scheitholz aus dem Wald, Scheitholz aus dem Garten und Landschaftspflegeholz zusammengefasst. Der gesamte Scheitholzverbrauch belief sich auf 20,9 Mio. Fm und hatte damit einen Anteil von 74,1 % am gesamten Brennholzverbrauch. Der gesamte Brennholzverbrauch im Jahr 2018 belief sich auf

¹⁸ Annahme basiert auf einem Vergleich von Herstellerangaben (Groß et al. 2012)

28,2 Mio. Fm (Döring et al. 2020). Durch die heterogenen Quellen und verschiedenen Nutzungsstadien der Wälder ist ein direkter Bezug zum Flächenverbrauch nicht möglich.

Die Berechnung des Flächenverbrauchs ist recht komplex, denn je nachdem, wie hoch der Anteil an eingesetzter Anbaubiomasse gegenüber den Abfall- und Resthölzern ist, fällt der flächenspezifische Energieertrag sehr verschieden aus.

Analog zu der vorgestellten Methodik für den EE-Strom auf Basis von Biomasse nehmen wir an, dass durch die Nutzung von Altholz, Waldrestholz und Schadholz, Pellets, Landschaftspflegeholz, Rinde und Sägenebenprodukten kein Flächenbedarf entsteht. Diese fallen bei der Bewirtschaftung der Wälder und bei der stofflichen Holzverwertung ohnehin an. In den meisten Fällen ist aufgrund der Dimensionen (Durchforstungen), der Qualitäten (Schadholz) oder der dezentral anfallenden Kleinmengen (Kleinprivatwald) keine hochwertige stoffliche Verwertung realisierbar.

Biogas/Biomethan

Rund 11 % der erneuerbaren Wärme in Deutschland wurde im Jahr 2019 aus Biogas generiert (BMWi 2020).

Für die Wärmeerzeugung aus Biogas oder Biomethan wird im Folgenden von einer Nutzung der biogenen Gase im BHKW mit einem thermischen Wirkungsgrad von 44 % und einem Gesamtwirkungsgrad von 82 % ausgegangen. Diese Werte entsprechen mittleren Kennzahlen für Biogas/-methan-BHKWs (FNR lfd.).

Eine separate Darstellung der Wärmeproduktion aus KWK pro Hektar ist aufgrund der direkten Kopplung beider Energieformen (Strom und Wärme) nicht sinnvoll. Um den Flächenverbrauch der Biogas-KWK Technologie mit den anderen Formen der Wärmeerzeugung zu vergleichen ist es vielmehr sinnvoll und notwendig den Gesamtwirkungsgrad der Anlagen zu betrachten. Im Folgenden werden bei der Biogas-KWK die Erträge inklusive Stroms dargestellt.

Es ergeben sich folgende Werte:

- Biogas-KWK spezifischer Energieertrag 57,5 MWh/ha und ein Flächenbedarf von 174,0 m²/MWh.
- Biomethan-KWK: 39,4 MWh/ha, Flächenbedarf von 253,6 m²/MWh.
- Biomethan-Kessel: 43,3 MWh/ha, 231,0 m²/MWh.

Die geringere Flächeneffizienz der Biomethan-KWK im Vergleich zur Biogas-KWK sind auf die zu Grunde gelegten Substratmixe zurückzuführen.

Die beschriebenen Zahlen ergeben sich in direkter Abhängigkeit zum Substratmix. Grundsätzlich gilt, je höher der Anteil von Gülle und Reststoffen am Substratmix ist, desto besser die Flächeneffizienz! Wie entscheidend der Substratmix bei Biogas und Biomethan ist veranschaulichen Abb. 45 und Abb. 46. Hier ist dargestellt, wie der Flächenbedarf von 0 m² bei reiner Güllenutzung stark und quasi linear zur Zunahme an Anbaubiomasse ansteigt.

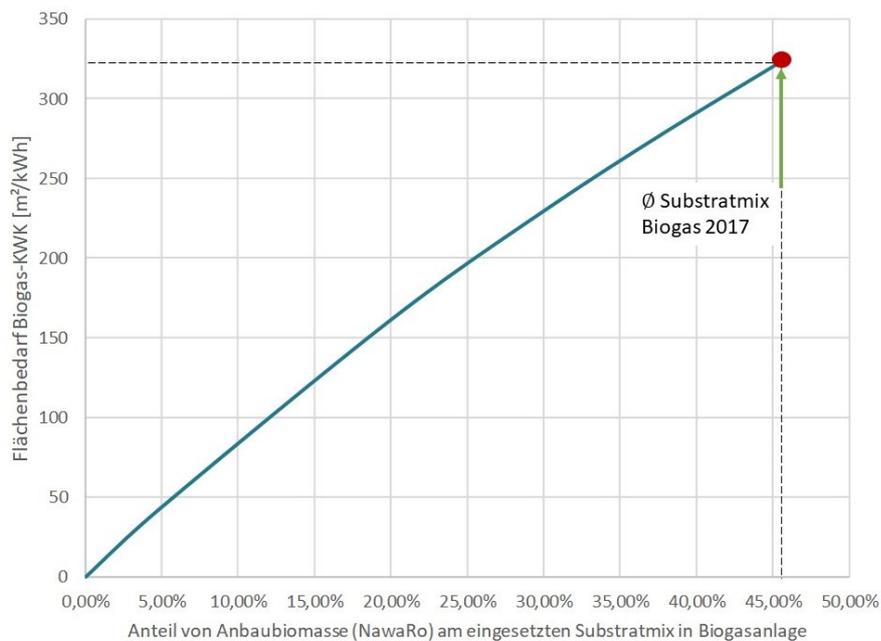


Abb. 45: Sensitivität des Flächenbedarfs zur Erzeugung von einer kWh Wärme und Strom in einer Biogas-KWK-Anlage gegenüber dem eingesetzten Substratmix (Anbau-/Reststoffe).

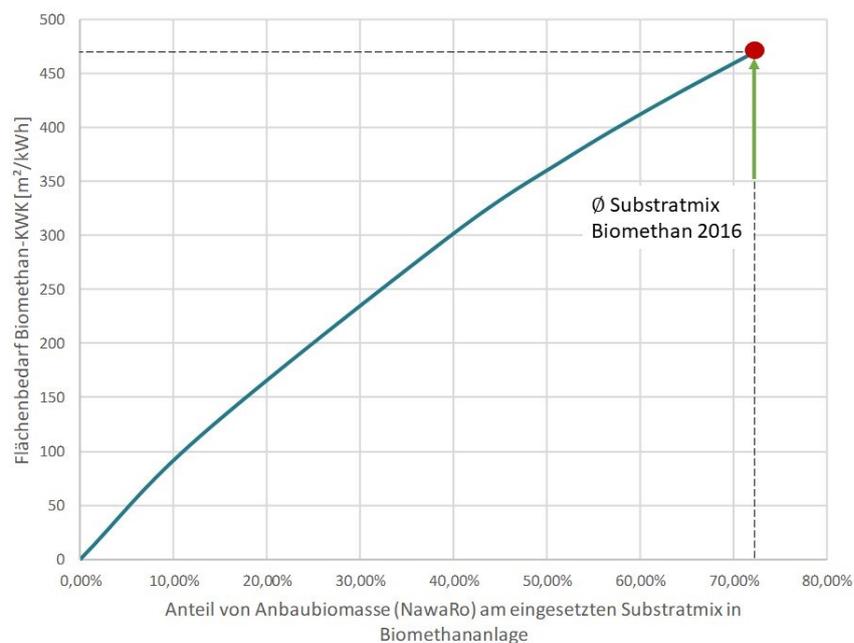


Abb. 46: Sensitivität des Flächenbedarfs zur Erzeugung von einer kWh Wärme und Strom in einer Biomethan-KWK-Anlage gegenüber dem eingesetzten Substratmix (Anbau-/Reststoffe).

Biogene Festbrennstoffe

Der größte Anteil der biogenen Festbrennstoffe kommt aus heimischen Wäldern. Es werden dabei drei charakteristische Energieholznutzungen unterschieden: kommerzielle Holzwerber, Selbstwerber und private Waldeigentümer.

Während kommerzielle Holzwerber, also Energieholzhändler und Selbstwerber, einen Brennholzvertrag vereinbaren und die Holz mengen erfasst werden können, bleibt die genaue Holzmenge für rein energetische Zwecke aus einer privaten Kleinprivatwaldnutzung unbekannt. Der Brennholzvertrag wird mit dem Waldeigentümer geschlossen, die Werbung des Holzes

erfolgt, nachdem die zuständige Forstbehörde die Bäume zur Entnahme markiert hat. Bäume, die für die energetische Nutzung in Frage kommen, eignen sich gemäß den Grundsätzen der „Guten Fachlichen Praxis“ nicht für eine priorisierte stoffliche Nutzung und fallen in der Regel bei Durchforstungen an. Bäume, die im Zuge einer Durchforstung entnommen werden, dienen dazu, die Zielbäume (Z-Bäume) bis zur Ernte zu begünstigen und mit diesen Bäumen einen besonders hohen Ertrag (z. B. Furnier-, Bauholz) zu erzielen. Alternativ werden bei Durchforstungen unterständige und minderwertige Individuen entnommen, ohne explizite Z-Bäume zu fördern.

Durchforstungen bzw. Eingriffe in das Ökosystem sind auch nötig, wenn Störungen (drohender Borkenkäferbefall) oder langfristig angelegte Waldumbaumaßnahmen (Umwandlung zu stabilen Mischwäldern mit hohem Laubbaumanteil) erfolgen. Dieses Durchforstungsmaterial wird häufig energetisch genutzt. Grundsätzlich gilt, dass nach geltenden Derbholzgrenzen Holzanteile, die einen Durchmesser > 7 cm im Wald verbleiben müssen.

In Deutschland sind derzeit 1.354.759,6 ha¹⁹ zertifiziert, das entspricht 12 % der Waldfläche. Die Waldfläche beträgt in Deutschland 11,4 Mio. ha und ist stabil. Dennoch ist trotz eines Umwandlungsverbotes der Wald teilweise durch Infrastrukturprojekte (z. B. Ausbau von Verkehrswegen) bedroht. Eine Vollbaumnutzung ist in der Regel nicht zulässig. Während Holzhändler prioritär Holz hackschnitzel zur Energienutzung produzieren und verkaufen, sind private Eigentümer eher an der Werbung von Scheitholz interessiert.

Für eine Bewertung der Auswirkung der Nutzung von Energieholz muss weiter der Holzvorrat betrachtet werden, der eine Abschätzung möglicher Potenziale zuließe. Die Bundeswaldinventur (BWI3) aus dem Jahr 2012 gibt Auskunft über die in Deutschland vorhandenen Holzvorräte. Diese liegen auf sehr hohem Niveau und beziffern sich auf 358 Kubikmetern pro Hektar (Bundeswaldinventur 3 2012). Auch der Zuwachs ist mit knapp 11 m³ je Hektar und Jahr oder 121,6 Millionen m³ pro Jahr weiterhin auf einem hohen Niveau. Dabei handelt es sich allerdings um einen Mittelwert über alle Baumartengruppen. Diese unterscheiden sich erheblich, so beträgt der Zuwachs bei klimastabilen Eichen 8,3 Vorratsfestmeter (VFM) /a*ha und bei Douglasien 18,9 VFM/a*ha.

Prägend für den Zeitraum der vergangenen zehn Jahre sind in Folge des Klimawandels jedoch auch diverse Störungen, die dazu geführt haben, dass übermäßig viel Holz den Markt flutet und für energetische Zwecke genutzt wird. Das hat jüngst zu einem Preisverfall von Rundholz geführt. Die Folgen dieser Störungen sind in einem nicht-angepassten unnatürlichen Wald (z. B. Fichtenreinbestand) deutlich höher als in einem natürlichen Laubmischwald.

Die Verfügbarkeit von biogenen Festbrennstoffen kann unter den aktuellen Umständen ein falsches Bild produzieren und muss kritisch hinterfragt werden. Eine stabile Waldfläche, hohe Vorräte und hohe Zuwächse reichen nicht aus abschließend eine Beurteilung des Energieholzaufkommens vornehmen zu können und die Auswirkungen auf Naturschutz im Wald zu beschreiben. Für eine naturschutzfachliche Betrachtung der Energieholznutzung können die gleichen Indikatoren gewählt werden, die auch den Bestand beschreiben. Dazu zählen für die natürliche Ressource Boden unter anderem die Nährstoffbilanz und der verfügbare Kohlenstoff. Diese Werte sind unabhängig von der Bestockung vergleichbar. Der Flächenbedarf spielt dabei eine untergeordnete Rolle, da im Gegensatz zu landwirtschaftlichen Flächen der Holzboden im Laufe einer Umtriebszeit verschiedene Sortimente zugleich bereitstellen kann (s. oben Durchforstungsmaterial).

Für eine naturschutzfachliche Betrachtung im Wald ist die Totholzdicke ein wissenschaftlich anerkannter Indikator, anhand dessen Biodiversität im Wald erfasst und beschrieben werden

¹⁹ <https://www.fsc-deutschland.de/de-de/wald/waldzertifizierung/-zahlen-und-fakten>

kann. Totholz bietet Nahrung und Lebensraum für eine unbekannt große Artenzahl von Pilzen, Flechten, Moosen und Invertebraten sowie für viele Wirbeltiere. Auf Bundesebene beträgt die Totholzmenge gemäß BWI3 aktuell 20,6 Fm/ha. Neben der Menge spielen Qualität und Diversität des Totholzes eine entscheidende Rolle für die Biodiversität. „Wichtig sind in dem Zusammenhang der Durchmesser des Totholzes, da davon die Eignung als Habitat für Lebewesen abhängt und die Frage, ob es sich um stehendes oder liegendes Totholz handelt. Neben der Speicherung von Kohlenstoff bietet der Wald Lebensraum für Tier- und Pflanzenarten. Besonders Totholzvorräte von verschiedenen Baumarten, Stärkeklassen und Zersetzungsstufen spielen für den Wert des Waldes als Habitat eine wichtige Rolle (Lassauce 2011) und stellen damit einen wichtigen Indikator für die Bewertung des Waldes als Lebensraum für die biologische Vielfalt dar“.

Die einleitenden Darstellungen zeigen, dass bei der Bewertung von naturschutzfachlichen Auswirkungen der Energieholznutzung eine qualitative vergleichbare Einheit gewählt werden sollte und nach Möglichkeit eine regionale und bestandsgenaue Betrachtung im Forst nötig ist.

Für die thermische Nutzung kommen noch weitere Sortimenten in Frage, wie z. B. Altholz, Landschaftspflegeholz, Rinde und Sägenebenprodukten (Pellets). Hier entsteht kein zusätzlicher Flächenbedarf, diese fallen bei unterschiedlichen Bewirtschaftungsformen z. B. Straßenmeisterei und bei der stofflichen Holzverwertung ohnehin an. Der Anteil Energieholz aus KUPs auf landwirtschaftlichen Flächen ist mit einer Anbaufläche von etwa 6.000 ha im Verhältnis zu 11,4 Mio. Hektar Nutzwald derzeit mengenmäßig zu vernachlässigen. (Bundeswaldinventur 3 2012)

Der spezifische Wärmeertrag bei Holz aus KUP geht mit 40 MWh/ha in die Berechnung ein. Mit einem Kesselwirkungsgrad von 90 % ergibt sich ein flächenspezifischer Energieertrag von 36,0 MWh/ha bzw. ein Flächenbedarf von 277,9 m²/MWh.

Die Waldfläche in Deutschland und damit die Menge an verfügbarem Holz ist jedoch begrenzt. Daher sollte wann immer möglich eine stoffliche Nutzung Vorrang vor der energetischen Nutzung haben.

5.2.6. Erneuerbare Wärme: Solarthermie

Zur Wärmezeugung mittels Solarthermie werden Flachkollektoren (FK) und Vakuumröhrenkollektoren (VR) eingesetzt.

Die solarthermischen Wärmeerträge hängen von zahlreichen Faktoren ab. Relevant sind die Sonneneinstrahlung am Anlagenstandort, die Ausrichtung und der Aufstellwinkel der Kollektoren bzw. die Dachneigung und die Verschattung. Des Weiteren spielt die Kollektorart eine Rolle, sowie die Temperaturspreizung zwischen Umgebung und Kolleortemperatur.

In Deutschland ist mit Wärmeerträgen von etwa 450 kWh/m² Kollektorfläche (FK) bzw. 490 kWh/m² Kollektorfläche (VR) (Herstellerangaben sowie SWISSOLAR 2017) zu rechnen. Unter Berücksichtigung der Aufstellwinkel und Kollektorgeometrie sowie der Abstandsflächen zwischen den Modulen²⁰ ergeben sich flächenspezifische Wärmeerträge von 2.045,5 MWh/ha (Solarthermie FK) bzw. 2.227,3 MWh/ha (Solarthermie VR).

5.2.7. Erneuerbare Wärme: Wärmenetze

Die potenziellen Auswirkungen von Fernwärmeleitungen auf Natur und Landschaft sind in Abschnitt 5.1.8 bereits geschildert worden. In diesem Abschnitt wird die räumliche Ausdehnung von Fernwärmeleitungen in der Fläche eingegangen.

²⁰ Gesamtfaktor zur Berücksichtigung der Abstandsflächen sowie der Kollektorgeometrie: 2,2 (Verhältnis Landfläche zu Kollektorfläche)

Wärmeleitungen werden entweder ober- oder unterirdisch verlegt. Bei der Wahl des Verlegungsverfahrens spielen verschiedene Faktoren wie beispielsweise die Topografie, die Infrastruktur und die Bodenverhältnisse eine Rolle. Eine oberirdische Verlegung von Fernwärmeleitungen ist nur möglich, wenn eine spätere Bebauung mit Sicherheit nicht erfolgen wird. Die oberirdische Verlegung ist daher eher der Ausnahmefall. In Ballungszentren werden aus optischen und baulichen Gründen Fernwärmeleitungen nahezu ausschließlich unterirdisch verlegt, lediglich in Industriegebieten erfolgt eher eine oberirdische Verlegung.

Bei der unterirdischen Verlegung, die den Normalfall darstellt, fällt (abgesehen von der Bau-phase) kein erheblicher zusätzlicher Flächenbedarf an.

In Deutschland sind aktuell etwa 23 Tsd. Trassenkilometer verlegt. Bis 2030 könnte sich die Länge der Fernwärmeleitungen nahezu verdoppeln auf dann 45 Tsd. Trassenkilometer. Im Zeitraum bis 2050 könnten weitere 20 Tsd. Trassenkilometer verlegt werden, sodass die Gesamtlänge bei etwa 65 Tsd. Trassenkilometern im Jahr 2050 liegt²¹.

5.2.8. Erneuerbare Wärme: Saisonale Wärmespeicher

Für Erdsonden- und Aquifer-WS entsteht kein relevanter oberirdischer Flächenbedarf.

Behälterwärmespeicher erfordern Fläche für die Aufstellung der Speichertanks. Je nach Größe des Speichers und Verhältnis von Höhe zu Durchmesser ist der Flächenbedarf pro eingespeicherte Wärmemenge unterschiedlich. Das Höhe/Durchmesser-Verhältnis ist nicht konstant, sondern wechselt je nach Speichergröße. Eine allgemeingültige Aussage der Flächenwirkung von Behälterspeichern ist demnach nicht möglich. Am Beispiel eines Wärmespeichers kann jedoch ein Eindruck der Größenordnung vermittelt werden: Mit einer Speicherkapazität von circa 2.000 MWh, einer Gesamthöhe von 45 m und einem Durchmesser von 40 m (Neumann 2018 sowie Stadler et al. 2020) beträgt der Flächenbedarf je eingespeicherter MWh Wärme nur rund 0,63 m².

Erdbeckenwärmespeicher sind unabhängig von der Gesamt-Speichergröße typischerweise nicht tiefer als etwa 20 m. Der Erdbeckenwärmespeicher in Dronninglund beispielsweise beansprucht eine Fläche von 100 x 100 m und hat eine Speicherkapazität von 5.400 MWh (Stadler 2020). Der Flächenbedarf dieser Speicher beträgt demnach etwa 1,85 m²/MWh. Je nach Speichergeometrie, -größe und -medium ergeben sich abweichende Flächenbedarfe.

Im Vergleich zu den Erzeugungstechnologien ist der Flächenbedarf der Speichertechnologien sehr gering. Es sollte jedoch beachtet werden, dass Wärmespeicher in einem Jahr mehrere Speicherzyklen durchlaufen und der angegebene Wert somit nicht ohne weiteres mit den verschiedenen Flächenbedarfen der jährlichen Erzeugung erneuerbarer Wärme vergleichbar ist.

5.2.9. Zusammenfassung

Die jährlichen Flächenbedarfe zur Erzeugung einer MWh Wärme sind in Abb. 47 und in Tab. 20 dargestellt.

Die höchsten Flächenbedarfe weist KUP mit knapp 280 m²/MWh auf, dicht gefolgt von Biomethan (in aktueller Substratzusammensetzung) mit circa 230 bis 250 m²/MWh Wärme auf. Der Flächenbedarf von Biogas ist im Vergleich zu Biomethan mit 174 m²/MWh etwas geringer, da die Substratzusammensetzung in Biogasanlagen ohne Methanaufbereitung typischerweise mehr Reststoffe enthält.

Synthetische strombasierte Brennstoffe weisen einen Flächenbedarf von etwa 83 bis 96 m²/MWh Wärme auf und liegen damit im allgemeinen Vergleich im Mittelfeld. Da EE-Strom

²¹ Ausbau der Wärmenetze: Status quo sowie Prognosen entsprechend Szenarien in (Thamling et al. 2020)

für PtG-Wärme mindestens zwei Umwandschritte durchläuft (Elektrolyse plus ggf. Methanisierung und anschließende Umwandlung der Gase in Brennstoffzelle bzw. Gas-KWK/-Kessel), ist die Flächenbilanz von PtG im Vergleich zu PtH schlecht. Bei der direkten Umwandlung von EE-Strom in Wärme werden nur 38 m²/MWh verbraucht.

Wärmepumpen, die oberflächennahe Geothermie nutzen, wandeln Strom noch flächeneffizienter in Wärme um: mit dieser Technologie werden nur knapp 10 m²/MWh benötigt. Durch die etwas niedrigere JAZ von Luftwärmepumpen benötigen diese rund 13 m²/MWh.

Solarthermieranlagen, die Wärmenetze beliefern, haben einen sehr geringen Flächenbedarf. Um jährlich eine MWh Wärme zu erzeugen benötigen sie unter 5 m² Fläche.

Aufdach-Solarthermieranlagen, Restholz und Tiefengeothermie benötigen (nahezu) keine oberirdische Fläche zur Erzeugung von Wärme.

Tab. 20: Spezifische Wärmeerträge und Flächenbedarfe für die Erzeugung einer MWh Wärme von EE-Technologien.

Technologie	spezifischer Wärmeertrag [MWh/ha]	Flächenbedarf [m ² /MWh]
Power-to-Heat	261,21	38,28
Luftwärmepumpe	791,55	12,63
Sole/Wasser-Wärmepumpe	1055,40	9,48
PtG Wasserstoff (Brennstoffzelle inkl. Strom)*	120,26	83,15
PtG Methan (KWK inkl. Strom) *	103,85	96,29
PtG Methan (Kessel)	113,98	87,73
Biogas (KWK inkl. Strom)*	57,46	174,02
Biomethan (KWK inkl. Strom)*	39,44	253,56
Biomethan (Kessel)	43,29	231,02
Biogene Festbrennstoffe – Restholz	Kein erheblicher zusätzlicher Flächenbedarf	0,00
Biogene Festbrennstoffe – KUP (Kessel)	36,00	277,78
Solarthermie Aufdach	Kein erheblicher zusätzlicher Flächenbedarf	0,00
Solarthermie Freifläche (FK)	2.045,45	4,89
Solarthermie Freifläche (VR)	2.227,27	4,49
Tiefengeothermie	Kein erheblicher zusätzlicher Flächenbedarf	0,00

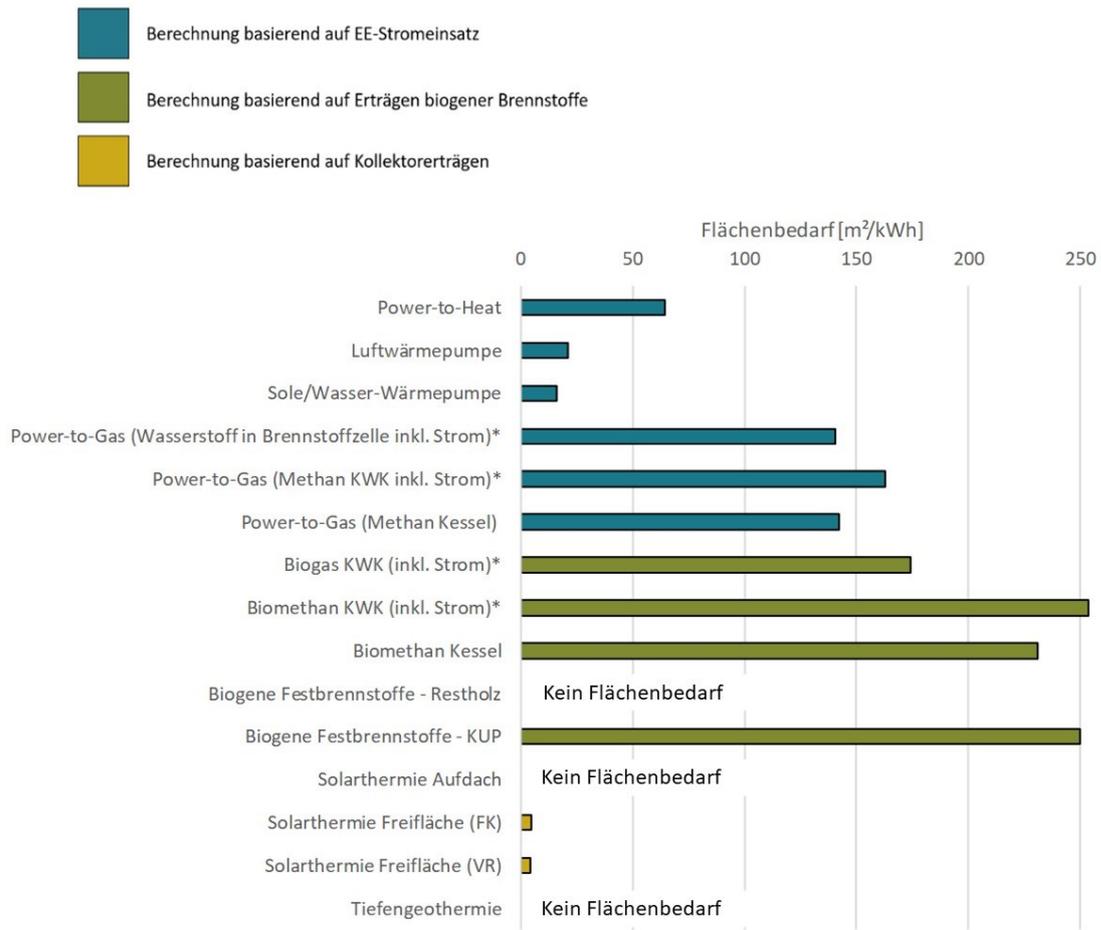


Abb. 47: Flächenbedarfe für die Erzeugung einer MWh Wärme innerhalb eines Jahres in Deutschland. Die mit * gekennzeichneten Technologien erzeugen als KWK-Anlagen kombiniert Wärme und Strom. Um einen Vergleich zu ermöglichen, wurde hier der Gesamtwirkungsgrad dieser Technologien verwendet.

Kurz-Informationen zu den Flächenbedarfen von EE-Wärme und deren Einordnung

Definition der „Flächenbedarfe“: Hier soll festgehalten werden, dass mit dem gewählten methodischen Ansatz ein Vergleich der Flächeneffizienzen der Technologien ermöglicht werden soll, der jedoch losgelöst von der naturschutzfachlichen Bewertung dieser Flächen ist. In Kombination mit der naturschutzfachlichen Bewertung ist somit eine umfassende Bewertung der Technologie-Auswirkungen möglich.

Im Gegensatz zu der in der Literatur diskutierten Methodik zur Bewertung der Flächennutzung in Ökobilanzen (z. B. Hemerobie-Konzept), bei denen die Naturnähe einer Fläche als Maß für den menschlichen Einflussgrad im Vergleich zu einer Referenzfläche bewertet wird, nähert sich unser gewähltes Vorgehen der Problematik anhand eines gänzlich anderen Weges.

Hier steht die Fläche als eine Ressource für sich. Vor allem in den dicht besiedelten Regionen der Welt, zu denen Deutschland gehört, ist dieses Gut für verschiedene Anwendungsfälle, zu denen auch die Wärmeerzeugung mittels erneuerbarer Energiequellen gehört, sehr begehrt. Bei der Umstellung der Wärmeversorgung von fossil auf erneuerbar spielt der Flächenbedarf eine relevante Rolle. Während die fossilen Wärmeträger (insbesondere Heizöl und Erdgas) einen „unsichtbaren“, ausgelagerten Flächenbedarf haben, so sind viele der erneuerbaren Wärmetechnologien aufgrund hoher Transportverluste auf die räumliche Nähe zu den Abnehmern angewiesen. Somit sind die erforderlichen Flächen sichtbarer und durch die Nähe zu den Abnehmern häufiger in hohen Besiedlungsdichten zu verorten, als dies beim EE-Strom der Fall ist.

In Abb. 47 soll die Effizienz des Verbrauchs dieser Ressource durch unterschiedliche Technologien quantitativ miteinander verglichen werden. Die Qualität der Flächennutzung aus naturschutzfachlicher Sicht fließt nicht in die Betrachtung ein.

Hier die wichtigsten Annahmen für die jeweiligen Technologien. Für weitere Details, s. die vorangehenden Abschnitte zur Flächenwirkung der Technologien.

Power-to-Heat: Wirkungsgrad PtH 99 %. Ermittelt auf Basis des Flächenbedarfs für EE-Strom.

Luft-WP: JAZ = 3 (inkl. Strombedarf für das Rückkühlerfeld). Ermittelt auf Basis des Flächenbedarfs für EE-Strom.

Sole/Wasser-WP: JAZ= 4 (inkl. Strombedarf für das Rückkühlerfeld). Ermittelt auf Basis des Flächenbedarfs für EE-Strom.

PtG-Wasserstoff (Brennstoffzelle inkl. Strom): Wirkungsgrad Elektrolyse: 53 % (alkalische Elektrolyse und Verflüssigung). Gesamtwirkungsgrad Brennstoffzelle: 86 %. Ermittelt auf Basis des Flächenbedarfs für EE-Strom.

PtG-Methan (KWK inkl. Strom): Wirkungsgrad Methanproduktion: 48 % (Verflüssigung). Gesamtwirkungsgrad KWK-Anlage: 82 %. Ermittelt auf Basis des Flächenbedarfs für EE-Strom.

PtG-Methan (Kessel): Wirkungsgrad Methanproduktion: 48 % (Verflüssigung). Wirkungsgrad Kessel: 90 %. Ermittelt auf Basis des Flächenbedarfs für EE-Strom.

Biogas (KWK inkl. Strom): Wirkungsgrad elektrisch 38%, thermisch 44%. Flächenbedarf stark abhängig von der Substratmischung. Hier dargestellt am durchschnittlichen Substratmix 2017 (NaWaRo 45,7%; Exkremente 49,2 %; kommunaler Bioabfall 3,1 %; Reststoffe 2 %)

Biomethan (KWK inkl. Strom): Wirkungsgrad elektrisch 38 %, thermisch 44 %. Flächenbedarf stark abhängig von der Substratmischung. Hier dargestellt am durchschnittlichen Substratmix 2016 (NaWaRo 73 %; Exkremente 13 %; kommunaler Bioabfall 6 %; Reststoffe 8 %)

Biomethan (Kessel): Wirkungsgrad Gaskessel 90 %; Substratmix 2016 (wie KWK)

Biogene Festbrennstoffe – Restholz: Aufgrund der unterschiedlichen Entwicklungsstadien der Wälder sowie der daraus resultierenden Bewirtschaftung (Durchforstungen) kann kein zusätzlicher Flächenbedarf für die Energieholznutzung ausgewiesen werden. Die Waldflächen stehen keiner alternativen Nutzung zur Verfügung und die bei Durchforstungen (Ziel Wertholzproduktion) anfallenden Energieholzmengen fallen quasi als Neben- oder Abfallprodukt an.

Biogene Festbrennstoffe – KUP (Kessel): Holz aus KUP geht mit einem jährlichen Ertrag von 40 MWh/ha in die Berechnung ein. Die Flächen könnten alternativ auch anderweitig genutzt werden.

Solarthermie Aufdach: Da die genutzte Fläche (das Dach) bereits vorrangig eine andere Funktion erfüllt, und des Weiteren parallel zur Aufdach-Solarthermie Dachbegrünungen o. ä. möglich sind, wird der Flächenbedarf als kein erheblicher zusätzlicher Bedarf gekennzeichnet.

Solarthermie Freifläche (Flachkollektoren FK): Die gesamte für die Freiflächenanlage genutzte Fläche (inkl. Abstandsflächen, Rohrleitungsflächen, etc.) wird berücksichtigt. Der Versiegelungsgrad ist je nach Art und Standort der Installation sehr unterschiedlich von kaum versiegelt (Befestigung durch aufliegende Gewichte) bis gänzlich versiegelt (Installation auf bereits versiegelter Fläche). Eine anderweitige Nutzung der Anlagen ist möglich (z. B. Weideland, Ackerbau, Doppelnutzung mittels Multicodierung).

Solarthermie Freifläche (Vakuumröhrenkollektoren VR): s. Solarthermie Freifläche (FK).

Tiefengeothermie: Im Betrieb fällt für eine Geothermieanlage kein erheblicher zusätzlicher Flächenbedarf an.

6. Systematische Ableitung von Stellschrauben und Handlungsempfehlungen für eine naturschutzkompatible Wärmewende

In diesem Kapitel wird ein Überblick der Wirkmechanismen und kausalen Zusammenhänge im Wärmemarkt und deren Rückkopplung auf Naturschutzziele gegeben. Dafür werden die bereits erarbeiteten Ergebnisse der Kapitel 3, 4 und 5 zusammengeführt.

Zunächst werden die Ergebnisse zur Relevanz der Technologien (Kapitel 4) und zu den potenziellen Auswirkungen auf Natur, Landschaft und Fläche (Kapitel 5) miteinander kombiniert, um die relevanten Stellschrauben der Entwicklung des Wärmesektors für den Naturschutz zu identifizieren (siehe Tab. 21). In dieser Tabelle wird die Herleitung der Gesamtrelevanz und die verknüpften Stellschrauben dargestellt und nachvollziehbar gemacht. Auf der einen Seite steht die zukünftige Relevanz der Technologien im Wärmesektor, die in den Szenarien (unter bestimmten Randbedingungen und nach wirtschaftlicher Optimierung) ermittelt wurde. Auf der anderen Seite stehen die Auswirkungen der jeweiligen Technologie auf Natur, Landschaft und Fläche. Die Gesamtrelevanz ergibt sich daraus, welche Technologien in Zukunft vermehrt zum Einsatz kommen, und welche dieser Technologien tendenziell besonders nachteilig oder förderlich für den Naturschutz sind. Die Herleitung der Gesamtrelevanz und die verknüpften Stellschrauben wird tabellarisch dargestellt und nachvollziehbar gemacht (s. Abschnitt 6.1, Tab. 21).

Als Ergebnis resultieren aus dieser Analyse folgende sieben relevante Stellschrauben für die naturverträgliche Wärmewende:

- Gebäudeeffizienz steigern und naturverträglich ausgestalten (s. Kapitel 6.2)
- Effiziente Integration von erneuerbaren und naturschutzkompatiblen Technologien durch Wärmenetze (s. Kapitel 6.3)
- Quantitative Steuerung der Biomassenachfrage aus dem Wärmesektor (s. Kapitel 6.4)
- Qualitative Steuerung der Biomasse in Richtung naturverträglicher Ressourcen (s. Kapitel 6.5)
- Naturschutzkompatible und flächeneffiziente Technologien fördern (s. Kapitel 6.7)
- Naturschutzorientierte räumliche Verteilung und Standortwahl (s. Kapitel 6.8)
- Naturschutzorientierte Ausgestaltung von Wärmeerzeugungsanlagen (s. Kapitel 6.9)

Die Stellschrauben werden in den folgenden Abschnitten begründet und dargelegt. Weiterhin erfolgt der Abgleich mit dem aktuellen politischen, instrumentellen und rechtlichen Rahmen (Kapitel 3), um diesen in Hinblick auf den Naturschutz zu bewerten. Werden die identifizierten Stellschrauben durch die aktuelle Gesetzgebung bedient? Es soll ein Gesamtbild gezeichnet werden, das verdeutlicht, ob der aktuelle Rechtsrahmen und der übergreifende politische Rahmen die richtigen Stellschrauben in die jeweils für den Naturschutz vorteilhafte Richtung betätigen.

Anhand dieser Analyse werden die bestehenden Lücken der aktuellen Rahmenbedingungen identifiziert und Handlungsbedarfe abgeleitet, die in Hinblick auf die Weiterentwicklung der Rahmenbedingungen relevant sind. Konkrete Vorschläge für ausgewählte Gesetze, Richtlinien und Förderprogramme werden entwickelt. Da sich die Handlungsempfehlungen häufig direkt aus der Analyse der aktuellen Rahmenbedingungen schlussfolgern lassen, schließt das fünfte Arbeitspaket jeweils direkt an die einzelnen Abschnitte an.

6.1. Synthese: Relevanz im Wärmesektor und Naturschutzwirkung der Technologien

Um die Vergleichbarkeit der Technologien zu ermöglichen, wird eine quantitative Beschreibung für die Relevanz im Wärmesektor eingeführt. Die Skala reicht von 1 (sehr gering) bis 5 (sehr hoch). Für den Vergleich der Bedeutung der Auswirkung auf Natur, Landschaft und Fläche wird eine Bereichs-Skala eingeführt. Auf dieser wird mittels eines Balkens eingetragen, ob die zu erwartenden Auswirkungen insgesamt und im Vergleich mit den anderen Technologien eher positiver oder negativer Art sind. Durch die Länge des Balkens wird die mögliche Spannweite an Auswirkungen verdeutlicht: Ein kurzer Balken deutet auf eindeutige Auswirkungen hin. Für viele Technologien sind jedoch potenziell sowohl positive als auch negative Auswirkungen möglich. Dies wird durch einen langen Balken dargestellt.

In der folgenden Tabelle werden die Ergebnisse zur Relevanz der Technologien im zukünftigen Wärmesektor (AP 2) und deren potenzielle Auswirkungen für Natur, Landschaft und Fläche (AP 3) zusammengeführt. Daraus ergibt sich eine Gesamtbedeutung der Technologien in Hinblick auf die Handlungsbedarfe und die Erarbeitung der Stellschrauben. Eine hohe Gesamtbedeutung kann sowohl potenziell besonders nachteilige als auch vorteilhafte Wirkungen der Technologie bedeuten. Durch den erläuterten Handlungsbedarf wird definiert, welche Richtungen für Natur, Landschaft und Fläche anzustreben sind.

Technologien, die eine vernachlässigbare Rolle im Wärmesektor spielen werden, sind (auch bei hohen Naturschutzwirkungen) tendenziell weniger relevant als zukünftig weit verbreitete Technologien mit hoher Naturschutzwirkung. Im Umkehrschluss bedeutet dies nicht, dass für eine Technologie mit geringer Relevanz im zukünftigen Wärmesektor automatisch kein Handlungsbedarf besteht. Hat die Technologie tendenziell positive oder neutrale Auswirkungen auf Natur, Landschaft und Fläche, so besteht möglicherweise der Handlungsbedarf, diese Technologie gezielt zu fördern, um zu einer naturschutzkompatiblen Wärmewende beizutragen.

Die Gesamtbedeutung ist daher ein erster Anhaltspunkt, welchen Technologien sich mit höchster Priorität gewidmet werden sollte.

Während die meisten abgeleiteten Stellschrauben universell sind und auf alle Technologien angewendet werden können (Ausnahme: Gebäudeeffizienz und Biomasse), soll in deren Konkretisierung anhand von Instrumenten die Gesamtbedeutung Berücksichtigung finden (vgl. Tab. 21).

Tab. 21: Synthese der Ergebnisse aus AP 2 und AP 3 und Entwicklung der Gesamtrelevanz der Technologien.

Technologie (alphabetisch)	Relevanz laut Szenarien: Optimierter Einsatz im Wärmesystem (volkswirtschaftlich optimiert) (vgl. 4)	Potenzielle Auswirkungen auf Natur, Landschaft und Fläche (vgl. 5)	Gesamtbedeutung und Fazit	Berührte Themen und Stellschrauben
<p>Abwärme</p>	<p>In den Szenarien nimmt Abwärme (häufig mit Wärme aus der Abfallverbrennung zusammengefasst) eine eher geringe Relevanz ein. Es besteht jedoch ein derzeit noch weitestgehend unberücksichtigtes Potenzial insbesondere an Abwärme aus niederkalorischen (z. B. aus Dienstleistungen, Gewerbe, Rechenzentren) sowie auch aus mittel- und hochkalorischen Quellen (Gewerbe und Industrie), welches bei entsprechenden Rahmenbedingungen genutzt werden kann.</p>  <p>1 2 3 4 5</p> <p>Relevanz im Gesamtsystem: gering bis mittel (Wert auf Skala: 2,5)</p>	<p>Die Nutzung von unvermeidbarer Abwärme ist i. d. R. mit keinen potenziellen Auswirkungen auf Natur, Landschaft und Fläche verbunden. Im Gegenteil, die Nutzung von Abwärme ist eher äußerst flächeneffizient. Situationsbedingt kann die Anbindung an ein Wärmenetz und damit die Errichtung von Wärmeleitungen erforderlich sein (vgl. Auswirkungen Wärmenetze). Außerdem können Wärmepumpen genutzt werden, um niederkalorische Abwärme auf ein höheres Temperaturniveau zu bringen.</p>  <p>Potenzielle Auswirkungen (eingetragen auf Bereichs-Skala): gering/neutral</p>	<p>Abwärme hat nur sehr geringe Auswirkungen auf Natur, Landschaft und Fläche.</p> <p>Die Erschließung bestehender Potenziale von unvermeidbarer Abwärme aus industriellen oder gewerblichen Prozessen ist daher im Sinne einer naturverträglichen Wärmeerzeugung zu unterstützen.</p> <p>Sofern Abwärme nicht durch Effizienzmaßnahmen vermeidbar ist, sollte diese stets zur Wärmeversorgung genutzt werden. Für die Erschließung von Abwärmequellen eignen sich häufig Wärmenetze.</p>	<p>Wärmenetze/ Wärmeverteilung: Effiziente Integration von erneuerbaren und naturschutzkompatiblen Technologien durch Wärmenetze (s. Kapitel 6.3);</p> <p>Wärmetechnologien: Naturschutzkompatible und flächeneffiziente Technologien fördern (s. Kapitel 6.7);</p> <p>Raumwirkung und Standortwahl: Naturschutzorientierte räumliche Verteilung und Standortwahl (s. Kapitel 6.8)</p>
<p>Biomasse</p>	<p>Gebäudewärme (GW): mittelfristig in der Gebäudewärme relevant, im Vergleich zu heute vsl. leichter Rückgang. Relevanz: 2.</p> <p>Prozesswärme (PW): langfristig relevant, 2050 wichtiger Energieträger für PW, im Vergleich zu heute steigender Bedeutung: Relevanz: 4.</p> <p>Die im Wärmesektor genutzte Biomassemenge hängt stark von den gesetzten Restriktionen ab. Werden Biomasseimporte nicht begrenzt und es findet eine Steigerung der Nachfrage statt, so kann die Relevanz deutlich höher sein als in den Szenarien dargestellt.</p>	<p>Anbaubiomasse zur anschließenden Vergärung (z. B. Mais) hat im Allgemeinen nachteilige Auswirkungen auf die Natur, insbesondere auf den Boden, die Biodiversität sowie Lebensräume von Tieren und Pflanzen. Zudem schneiden biogene gasförmige Brennstoffe bei der Flächeneffizienz schlecht ab. In Regionen mit verarmter Fruchtfolge (z. B. Thüringen) kann Mais zur Erweiterung der Fruchtfolge beitragen. Insgesamt ist aus Naturschutzsicht eine artenreichere Ausgestaltung der Landwirtschaft prioritär anzustreben.</p>  <p>Potenzielle Auswirkungen (eingetragen)</p>	<p>Biomasse ist im zukünftigen Wärmesektor relevant und potenziell hochwirksam für Natur, Fläche und Landschaft. Insgesamt sollte die Nutzung von Anbaubiomasse zur Wärmeerzeugung vor allem unter Gesichtspunkten der geringen Flächeneffizienz geringgehalten werden. Reststoffe sind tendenziell effizienter in der Flächennutzung, doch gerade bei Waldrestholz(-importen) sind Naturschutzfragen teilweise noch ungeklärt bzw. die Nachhaltigkeitskriterien gerade bei Importen schwer überprüfbar. Daraus folgt, dass Biomasse im Sinne einer</p>	<p>Biomasse: Quantitative Steuerung der Biomassenachfrage aus dem Wärmesektor (s. Kapitel 6.4)</p> <p>Wärmenetze ausbauen und dekarbonisieren;</p> <p>Biomasse: Qualitative Steuerung der Biomasse in Richtung naturverträglicher Ressourcen (s. Kapitel 6.5)</p>

Technologie (alphabetisch)	Relevanz laut Szenarien: Optimierter Einsatz im Wärmesystem (volkswirtschaftlich optimiert) (vgl. 4)	Potenzielle Auswirkungen auf Natur, Landschaft und Fläche (vgl. 5)	Gesamtbedeutung und Fazit	Berührte Themen und Stellschrauben
	 <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5</p> <p>Relevanz im Gesamtsystem: mittel (Wert auf Skala: 3); tendenziell zunehmende Relevanz möglich</p>	<p>auf Bereichs-Skala): negativ; breite Streuung</p> <hr/> <p>Feste Anbaubiomasse zur Verbrennung: Kurzumtriebsplantagen (KUP) beispielsweise sind nachteilig bei der Flächeneffizienz, da die Wärmeenergieerzeugung je genutzter Fläche sehr gering ist. Positiv ist eine mögliche Extensivierung der vorherigen Nutzung des Standortes, z. B. von einjähriger Acker- auf die mehrjährige KUP-Kultur. KUP auf naturschutzfachlich bedeutsamen Böden (z. B. Grünland) sind nachteilig. Neben Standortkriterien sorgen weitere Maßnahmen wie z. B. Blühstreifen, Bestandslücken, Gehölzwahl, für naturverträgliche KUP.</p>  <p>Potenzielle Auswirkungen (eingetragen auf Bereichs-Skala): neutral bis hin zu positiv, sofern keine naturschutzfachlich bedeutsamen Flächen genutzt werden; breite Streuung</p>	<p>naturverträglichen Wärmewende in geringem Umfang eingesetzt werden sollte. Der Import von Biomasse sollte weitestgehend vermieden werden oder strikten und überprüfbaren Nachhaltigkeitskriterien unterliegen.</p> <p>Bei KUP sollte auf die naturverträgliche Standortwahl und Ausgestaltung geachtet werden, damit diese zu einer Extensivierung der Flächennutzung beitragen können.</p> <p>Der Einsatz von Rest- und Abfallstoffen ist für die naturverträgliche Wärmewende förderlich und sollte daher unterstützt werden. Organische Abfälle (z. B. Stroh, Landschaftspflegematerial, Grassilage) sollten vermehrt zur Verbrennung oder Vergärung eingesetzt werden. In Biogasanlagen muss daher ein Wandel von dem vorwiegenden Einsatz angebauter Substrate (Mais etc.) hin zur Verwertung von Abfall- und Reststoffen stattfinden. Der Transport zur Biogasanlage sollte nur in einem</p>	

Technologie (alphabetisch)	Relevanz laut Szenarien: Optimierter Einsatz im Wärmesystem (volkswirtschaftlich optimiert) (vgl. 4)	Potenzielle Auswirkungen auf Natur, Landschaft und Fläche (vgl. 5)	Gesamtbedeutung und Fazit	Berührte Themen und Stellschrauben
		<p>Rest- und Abfallstoffe zur Vergärung: Nutzung von Reststoffen (z. B. landwirtschaftlich wie tierische Exkremente, gewerblich wie Obstmaische) ist aus Naturschutzsicht unproblematisch. Es erfolgt keine zusätzliche Flächeninanspruchnahme.</p>  <p>Potenzielle Auswirkungen (eingetragen auf Bereichs-Skala): neutral bis positiv; breite Streuung</p> <p>Holzige Rest- und Abfallstoffe zur Verbrennung (z. B. aus Wald, Landschaftspflege): sind je nach Herkunft relevant für den Naturschutz. Holz aus nachhaltiger Forstwirtschaft ist eher unkritisch. Der Zielkonflikt naturnahe Waldwirtschaft und Energieholznutzung, insbesondere die Aspekte Totholzmanagement und die Rodung größerer zusammenhängender Waldgebiete besteht dabei jedoch. Bei Importen ist nicht immer überprüfbar, ob das Holz tatsächlich aus nachhaltiger Forstwirtschaft stammt. Der Diskurs auf wissenschaftlicher sowie politischer Ebene ist hierzu noch nicht abgeschlossen: Klimawirkung von nachhaltig bewirtschafteter im Gegensatz zu geschützten Wäldern (vgl. Welle et al. 2020, Kun et al. 2020, Booth et al. 2020); Klimawirkung der Nutzung von Waldholz zur Energieerzeugung</p> 	<p>Einzugsbereich bis etwa 10 km Radius erfolgen, da ansonsten die negativen Auswirkungen durch den Transport (Verkehr, Luftverschmutzung, THG-Emissionen) überwiegen und es zudem ökonomisch nicht sinnvoll ist.</p>	

Technologie (alphabetisch)	Relevanz laut Szenarien: Optimierter Einsatz im Wärmesystem (volkswirtschaftlich optimiert) (vgl. 4)	Potenzielle Auswirkungen auf Natur, Landschaft und Fläche (vgl. 5)	Gesamtbedeutung und Fazit	Berührte Themen und Stellschrauben
		<p>Potenzielle Auswirkungen (eingetragen auf Bereichs-Skala): Je nach Rohstoff und Gewinnungsart neutral bis stark negativ; breite Streuung. Bei Waldresthölzern eher problematisch als bei der Landschaftspflege. Bei Importen eher problematisch als bei inländischen Resthölzern.</p>		
<p>Gebäudeeffizienz</p>	<p>Effizienzmaßnahmen sind in allen Szenarien sehr relevant. Sie führen zu einer Reduktion des Endenergiebedarfs bei der Gebäudewärme. Je nach Szenario ist der erreichte Rückgang unterschiedlich stark, die Bandbreite bei der Gebäudeeffizienz ist also sehr groß.</p>  <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5</p> <p>Relevanz im Gesamtsystem: sehr hoch (Wert auf Skala: 5)</p>	<p>Durch Maßnahmen zur energetischen Sanierung von Bestandsgebäuden können vorübergehend Lebensräume von Tieren an der Fassade und am Dach zerstört werden. In der mittel- und langfristigen Perspektive können bei Sanierungsmaßnahmen jedoch potenziell negative Auswirkungen vermieden werden, wenn diese naturverträglich ausgestaltet werden. Bei Neubauten, die nach energetischen Effizienzstandards errichtet werden, tritt das Problem nicht auf.</p>  <p>Potenzielle Auswirkungen (eingetragen auf Bereichs-Skala): neutral bis geringfügig negativ oder positiv; breite Streuung um die neutrale Mitte.</p>	<p>Die Steigerung der Gebäudeeffizienz ist relevant, weil dadurch der Energiebedarf gesenkt wird und zudem durch reduzierte Systemtemperaturen die Integration klimaneutraler Wärmetechnologien vereinfacht wird. Ohne eine erhebliche Steigerung der Effizienz bei Gebäuden sind die Klimaziele in diesem Sektor nicht erreichbar. Bei Sanierungen sollten die Maßnahmen mit Klima- und Artenschutz abgestimmt werden.</p>	<p>Gebäudeeffizienz steigern und naturverträglich ausgestalten (s. Kapitel 6.2)</p>
<p>Power-to-Gas</p>	<p>Gebäudewärme (GW): eher geringe Relevanz (2). Prozesswärme (PW): Hohe Relevanz (5).</p>  <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5</p> <p>Relevanz im Gesamtsystem: hoch (Wert auf Skala: 4)</p>	<p>PtG-Anlagen zur Erzeugung synthetischer Brennstoffe und zur Umwandlung von synthetischem Brennstoff in Wärme (Elektrolyseure, Methanisierungsanlagen, Brennstoffzellen, etc.) haben in erster Linie keine starke Auswirkung auf Natur, Landschaft und Fläche. Für die Erzeugung von PtG-Wärme ist jedoch der Einsatz von Strom erforderlich – mit potenziell negativer Wirkung auf die Schutzgüter (vgl. PtH). Zudem muss</p>	<p>Die Nutzung von PtG spielt insbesondere bei der Dekarbonisierung der Prozesswärmeerzeugung eine wichtige Rolle. Aus systemischer Sicht unter volkswirtschaftlicher Kostenoptimierung ist der Einsatz synthetischer Brennstoffe für die Erzeugung von niederkalorischer Gebäudewärme wenig sinnvoll.</p>	<p>Wärmetechnologien: Naturschutzkompatible und flächeneffiziente Technologien fördern (s. Kapitel 6.7); Hintergrund: PtG als wenig effiziente Technologie sollte aus Naturschutzsicht in eher geringem</p>

Technologie (alphabetisch)	Relevanz laut Szenarien: Optimierter Einsatz im Wärmesystem (volkswirtschaftlich optimiert) (vgl. 4)	Potenzielle Auswirkungen auf Natur, Landschaft und Fläche (vgl. 5)	Gesamtbedeutung und Fazit	Berührte Themen und Stellschrauben
		<p>für den Einsatz von synthetischen Gasen die dafür erforderliche Transportinfrastruktur geschaffen werden (Rohrleitungen, Terminals, etc.). Durch die zukünftig voraussichtlich zu großen Teilen im Ausland hergestellten synthetischen Gase sind die Auswirkungen der Produktionsanlagen und der Stromerzeugung schwer steuerbar.</p>  <p>Potenzielle Auswirkungen (eingetragen auf Bereichs-Skala): negativ; mittlere Streubreite.</p>	<p>Gerade aus der Perspektive des Naturschutzes sollte der Einsatz von PtG-Brennstoffen im Wärmesektor eher geringgehalten werden, da aufgrund der ineffizienten Umwandlung große Mengen an EE-Strom benötigt werden. Wenn effizientere Alternativen wie beispielsweise die Wärmepumpe verfügbar und für die jeweilige Anwendung geeignet sind, sind diese im Sinne der Verträglichkeit mit Natur, Landschaft und Fläche eindeutig zu bevorzugen.</p>	<p>Umfang eingesetzt werden.</p>
<p>Power-to-Heat</p>	<p>Gebäudewärme (GW): Eher geringe Relevanz (2). Prozesswärme (PW): Sehr hohe Relevanz, 2050 im Mittel aller Szenarien die wichtigste Technologie für PW. Relevanz: 5.</p>  <p>1 2 3 4 5 Relevanz im Gesamtsystem: hoch (Wert auf Skala: 4)</p>	<p>PtH-Anlagen selbst haben kaum Bedeutung für Natur und Landschaft. Die Erzeugung des eingesetzten erneuerbaren Stroms (Wind, PV) hat jedoch potenziell Auswirkungen, die den Landnutzungs- und Landschaftswandel verstärken und sich negativ auf Lebensräume, Arten und Landschaften auswirken können. Die Wahl flächeneffizienter Stromerzeugungstechnologien und die naturverträgliche Standortwahl für Wind- und PV-Anlagen bzw. deren räumliche Verteilung sind essenziell, genau wie die Durchführung von Begleitforschung und Vermeidungsmaßnahmen.</p>  <p>Potenzielle Auswirkungen (eingetragen auf Bereichs-Skala): neutral bis leicht negativ durch die Auswirkungen der Stromerzeugung; mittlere Streubreite.</p>	<p>PtH-Anlagen sind aus Naturschutzsicht aufgrund ihrer etwas besseren Effizienz gegenüber PtG-Anlagen zu bevorzugen – Wärmepumpen setzen EE-Strom jedoch noch effizienter ein und sollten daher bei der Gestaltung einer naturverträglichen Wärmewende die erste Wahl sein.</p>	<p>Wärmetechnologien: Naturschutzkompatible und flächeneffiziente Technologien fördern (s. Kapitel 6.7); Hintergrund: PtH als weniger effiziente Technologie sollte aus Naturschutzsicht in eher geringem Umfang eingesetzt werden.</p>

Technologie (alphabetisch)	Relevanz laut Szenarien: Optimierter Einsatz im Wärmesystem (volkswirtschaftlich optimiert) (vgl. 4)	Potenzielle Auswirkungen auf Natur, Landschaft und Fläche (vgl. 5)	Gesamtbedeutung und Fazit	Berührte Themen und Stellschrauben
Saisonale Wärmespeicher	<p>Saisonale Wärmespeicher werden in den Szenarien nicht als eigene Erzeugereinheiten modelliert, sondern zumeist lediglich qualitativ erwähnt. Dadurch wird ihre Rolle unzureichend beleuchtet. Sie spielen für die Transformation der Wärmenetze zur Klimaneutralität eine wichtige Rolle, indem sie die Einbindung saisonal verfügbarer Wärmequellen (Solarthermie, Umweltwärme) unterstützen und haben daher zukünftig eine aus systemischer Sicht hohe Relevanz.</p>  <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5</p> <p>Relevanz im Gesamtsystem: hoch (Wert auf Skala: 4)</p>	<p>Das Landschaftsbild wird durch oberirdische Behälterwärmespeicher beeinflusst. Erdbeckenwärmespeicher können zudem Auswirkungen auf Lebensräume am und im Boden haben und beanspruchen eine vergleichsweise große Fläche. Unterirdische Wärmespeicher (Aquifer- und Erdsondenspeicher) haben hingegen keine relevanten Auswirkungen auf Natur, Landschaft und Fläche.</p>  <p>Potenzielle Auswirkungen (eingetragen auf Bereichs-Skala): gering bzw. neutral bis negativ (je nach Speichertyp); daher große Streubreite.</p>	<p>Saisonale Wärmespeicher sind für die Wärmewende unverzichtbar, weil sie erneuerbare Wärme integrieren. Daher werden sie voraussichtlich eine zunehmend wichtige Rolle bei der Gebäudewärmeversorgung einnehmen. Die Auswahl von aus Naturschutzsicht geeigneten Speichertypen und Standorten ist eine Möglichkeit zur Steuerung der naturschutzrelevanten Aspekte, zudem sollten landschaftsgestalterische Aspekte einbezogen werden.</p>	<p>Wärmenetze/ Wärmeverteilung: Effiziente Integration von erneuerbaren und naturschutzkompatiblen Technologien durch Wärmenetze (s. Kapitel 6.3);</p> <p>Raumwirkung und Standortwahl: Naturschutzorientierte räumliche Verteilung und Standortwahl (s. Kapitel 6.8)</p>
Solarthermie	<p>Im zeitlichen Verlauf vsl. zunehmende Bedeutung, die ST hat jedoch insgesamt einen eher geringen Anteil an der Wärmeherzeugung.</p> <p>GW: Mittel- und langfristig relevant. Relevanz: 3.</p> <p>PW: Wenig relevant. Relevanz: 1.</p>  <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5</p> <p>Relevanz im Gesamtsystem: gering bis mittel (Wert auf Skala: 2,5)</p>	<p>Solarthermieanlagen stellen einen Eingriff in die Natur dar. Sie sind jedoch mit Naturschutzaspekten vereinbar. Je nach vorheriger Flächennutzung und Ausgestaltung der Anlage können mitunter positive Wirkungen auf Natur entstehen. Das Landschaftsbild wird beeinflusst und zumindest vorübergehend (während der Nutzungsdauer) nachhaltig verändert. Solarthermie ist eine sehr effiziente Flächennutzung zur Wärmeherzeugung.</p>  <p>Potenzielle Auswirkungen (eingetragen auf Bereichs-Skala): Negative Auswirkungen vermeidbar, unter bestimmten Voraussetzungen und Maßnahmen sind</p>	<p>Vsl. eher geringe Relevanz für den Wärmesektor.</p> <p>Solarthermieanlagen haben das Potenzial, durch ihre Flächeneffizienz und naturverträgliche Ausgestaltung zur naturschutzfreundlichen klimaneutralen Wärmeherzeugung beizutragen. Werden vorbelastete, versiegelte oder intensiv bewirtschaftete Flächen genutzt, so können positive Auswirkungen auf die Natur entstehen. Wichtig ist vor allem eine naturverträgliche Standortwahl.</p>	<p>Wärmenetze/ Wärmeverteilung: Effiziente Integration von erneuerbaren und naturschutzkompatiblen Technologien durch Wärmenetze (s. Kapitel 6.3);</p> <p>Raumwirkung und Standortwahl: Naturschutzorientierte räumliche Verteilung und Standortwahl (s. Kapitel 6.8);</p> <p>Projektumsetzung: Naturschutzorientierte Ausgestaltung von Wärmeherzeugungsanlagen (s. Kapitel 6.9)</p>

Technologie (alphabetisch)	Relevanz laut Szenarien: Optimierter Einsatz im Wärmesystem (volkswirtschaftlich optimiert) (vgl. 4)	Potenzielle Auswirkungen auf Natur, Landschaft und Fläche (vgl. 5)	Gesamtbedeutung und Fazit	Berührte Themen und Stellschrauben
		positive Auswirkungen erreichbar; daher große Streuungsbreite.		
Wärmenetze	<p>Der Ausbau von Wärmenetzen spielt in den Zielszenarien eine wichtige Rolle. In einigen Szenarien sinkt die absolute Wärmebereitstellung durch Fernwärme aufgrund von Effizienzmaßnahmen. Diesem Effekt wirkt jedoch der Zuwachs an Fernwärmeanschlüssen entgegen, der in den meisten Szenarien angenommen wird.</p>  <p>1 2 3 4 5 Relevanz im Gesamtsystem: gering bis mittel (Wert auf Skala: 2,5)</p>	<p>Wärmenetze können als Infrastrukturanlagen einen Eingriff in die Natur darstellen, beispielsweise während der Bauphase. Die größtenteils unterirdisch verlegten Leitungen haben keine Auswirkung auf das Wurzelwachstum von Bäumen. Die potenziellen Auswirkungen auf Natur, Landschaft und Fläche von Fernwärmeleitungen sind vergleichsweise gering bzw. mit denen von anderen Infrastrukturanlagen (Kanalbau etc.) vergleichbar.</p>  <p>Potenzielle Auswirkungen (eingetragen auf Bereichs-Skala): gering bzw. neutral; geringe Streuungsbreite.</p>	<p>Wärmenetze nehmen in Zukunftsszenarien eine wichtige Rolle ein und sind zugleich eine Schlüsselinfrastruktur für die naturverträgliche Wärmewende, da sie die Einbindung von Technologien bzw. Wärmequellen wie Solarthermie, Abwärme, Wärmepumpen in großem Stil und unter Berücksichtigung von Naturschutzaspekten ermöglichen. Zudem wird durch hybride Erzeugersysteme mit einer Mehrzahl von diversen Erzeugern die effiziente Einbindung von Biomasse sowie PtG und PtH eher möglich als dies in der dezentralen Gebäudewärmeversorgung der Falls ist.</p>	<p>Wärmenetze/ Wärmeverteilung: Effiziente Integration von erneuerbaren und naturschutzkompatiblen Technologien durch Wärmenetze (s. Kapitel 6.3)</p>
Wärmepumpe	<p>GW: relevanteste Zieltechnologie, sowohl dezentral als auch zentral in Wärmenetzen. Relevanz: 5.</p>  <p>1 2 3 4 5 Relevanz im Gesamtsystem: hoch (Wert auf Skala: 4)</p>	<p>Wärmepumpen können allgemein als eine mit dem Naturschutz gut vereinbare Technologie bezeichnet werden. Nachteilige Auswirkungen können durch eine entsprechende naturschutzgerechte Ausgestaltung (bauliche und betriebliche Maßnahmen) vermieden werden. In einigen Fällen (z. B. Nutzung von Gewässern) kann die Abkühlung der Gewässer deren klimawandelbedingten Erwärmung entgegenwirken. Hocheffiziente Flächennutzung durch den effizienten Einsatz von erneuerbarem Strom. Die Auswirkungen der EE-Stromerzeugung sind zu berücksichtigen (vgl. PtG, PtH),</p>	<p>WP spielen vor allem in der Gebäudewärme zukünftig eine große Rolle. Im Allgemeinen sind WP gut mit dem Naturschutz vereinbar und haben nur geringe bzw. einfach vermeidbare Auswirkungen. Bei strombasierter Wärmeerzeugung sollten WP als effiziente Technologien zum Einsatz kommen, die Strom mit einem hohen Wirkungsgrad in Wärme umwandeln. Wärmepumpen sind daher generell gegenüber PtH- und</p>	<p>Wärmetechnologien: Naturschutzkompatible und flächeneffiziente Technologien fördern (s. Kapitel 6.7); Raumwirkung und Standortwahl: Naturschutzorientierte räumliche Verteilung und Standortwahl (s. Kapitel 6.8); Projektumsetzung: Naturschutzorientierte</p>

Technologie (alphabetisch)	Relevanz laut Szenarien: Optimierter Einsatz im Wärmesystem (volkswirtschaftlich optimiert) (vgl. 4)	Potenzielle Auswirkungen auf Natur, Landschaft und Fläche (vgl. 5)	Gesamtbedeutung und Fazit	Berührte Themen und Stellschrauben
		<p>haben jedoch durch die höhere Effizienz von Wärmepumpen ein sehr viel geringeres Ausmaß.</p>  <p>Potenzielle Auswirkungen (eingetragen auf Bereichs-Skala): gering bzw. neutral.</p>	PtG-Technologien zu bevorzugen.	Ausgestaltung von Wärmeerzeugungsanlagen (s. Kapitel 6.9)

6.2. Gebäudeeffizienz steigern und naturverträglich ausgestalten

Die Steigerung der Gebäudeeffizienz ist von zentraler Bedeutung für die Erreichung von nationalen und internationalen Klimazielen. Die Dekarbonisierung des Gebäudesektors ist wesentlicher Bestandteil aller Szenarien, die in Kapitel 1 analysiert wurden. Aktuell liegt die Sanierungsrate bei einem Prozent und bleibt weit hinter dem zurück, was im Gebäudesektor nötig wäre, um die Klimaziele zu erreichen. Ein verstärkter Einsatz von Gebäudesanierung und dem kontinuierlichen Anheben der Energiestandards ist daher nötig. Eine Sanierung von Nicht-Wohngebäuden und Gewerbegebäuden ist dabei besonders wichtig, da diese 35 Prozent des gesamten Energieverbrauchs im Gebäudesektor ausmachen. Aus naturschutzfachlicher Sicht sind Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz im Bestand anders zu bewerten, wie das der Fall im Neubau wäre. So können z. B. im Bestand sowohl auf Nicht- wie auch Wohngebäuden im Laufe der Jahre Brut- und Lebensräume entstanden sein. Gemäß dem Bundesnaturschutzgesetz sind Brutstätten und Lebensräume geschützt, eine Entfernung oder Zerstörung ist ein Straftatbestand. In der Praxis kann und wird dies oftmals nicht kontrolliert und nachverfolgt. Die Gründe sind divers und liegen sowohl an mangelnden Vorgehensstrategien, Kontrollinstanzen und Vollzugsmaßnahmen.

Im Folgenden wird sowohl zwischen Effizienzsteigerung, sprich Dämmung, der Schaffung neuer Lebensräume, z. B. bei der Anlage von Gründächern oder Fassadenbegrünungen und dem Einsatz von unterschiedlichen Dämmmaterialien an Gebäuden unterschieden. Ferner wird die Gestaltung von Fassaden und Gründächern betrachtet.

6.2.1. Gebäudeseitige Effizienzmaßnahmen zur quantitativen Steuerung des Wärmeverbrauchs

Abstrakte Beschreibung der Stellschraube

Die energetische Sanierung von Gebäuden verläuft auf einem niedrigen Niveau. Die aktuellen Sanierungsraten liegen bei 1 % im Bestand. Eine Steigerung der Energieeffizienz gelingt im Bestand mit einer nachträglichen Dämmung der Außenfassaden. Bei weiteren Dämmmaßnahmen wie dem Austausch von Fenstern oder der Dämmung von Kellerdecken sollten Artenschutzrechtliche Belange berücksichtigt werden. Im energieeffizienten Neubau können unterschiedlichste Kombinationen an energiesparender Gebäudetechnik wie auch bauliche Maßnahmen berücksichtigt werden. Es werden im Neubau vier unterschiedliche Haustypen unterschieden. Diese sind das Effizienzhaus, Passivhaus, Nullenergiehaus, Plusenergiehaus. Alle vier Kategorien erfüllen gesetzliche Anforderungen an die Dämmung bzw. die Verwendung von Dämmmaterialien. Die wesentliche Unterscheidung liegt im Einsatz der benötigten Energie. Die Erfüllungskriterien im Einsatz von erneuerbaren Energien sind dabei unterschiedlich. So liegt der Anteil z. B. beim Einsatz von Solarthermie bei 15 %, für den Einsatz von Geothermie-Wärme oder Biomasse, sowie von Biomethan bei Brennwertkessel bei 50 % bei neu errichteten Gebäuden ab einer Nutzfläche von 50 m².

Neben der Reduktion des Wärmebedarfs ist für die Integration erneuerbarer Wärmequellen insbesondere die Absenkung der benötigten Vorlauftemperaturen erforderlich. Dies gilt sowohl für die dezentrale Wärmeversorgung als auch für die zentral versorgten Gebäude. Daher müssen die Heizungssysteme in Gebäuden zukünftig mit niedrigeren Vorlauftemperaturen operieren können.

Alle zu Grunde gelegten Szenarien gehen von einer notwendigen Anhebung der Sanierungsraten und einer damit einhergehenden Reduktion des Wärmebedarfs aus. Die Angaben in den Szenarien variieren im Zeitraum und im jeweiligen Anteil, bis wann ein klimaneutraler Gebäudebestand erreicht wird. Grundsätzlich gilt, dass eine gute Wärmedämmung nicht nur im Winter vor Kälte, sondern auch im Sommer vor Wärme schützt.

Die Steigerung der Gebäudeeffizienz hat kaum naturschutzrelevante Auswirkungen vor Ort. Bauliche Maßnahmen können jedoch je nach Zustand der Ausgangsgebäude über die Jahre entstandene Lebensräume zerstören. Dazu zählen zum Beispiel Ritzen im Mauerwerk für Eidechsen und Insekten oder Lebensräume für mauerbrütende Vögel, wie Schwalben, Spatzen oder Mauersegler. Auch die Abdichtung von Dachstühlen, kann Zugänge und somit Lebensräume für Fledermäuse oder Vögel zu Nichte machen. Diese Rückzugsräume betreffen wildlebende Arten, die dem Schutz des Bundesnaturschutzgesetzes (§§ 39 u. 44) unterliegen (Demuth, B.; Schumacher, J. 2019). Welche Lebensräume oder Brutstätten betroffen sind, kann mit Hilfe einer Begutachtung im Vorfeld einer Sanierungsmaßnahme geklärt werden.

Positiv wirkt sich hingegen der Einsatz von Gründächern und Fassadenbegrünungen als Beitrag zur Senkung des Energiebedarfs aus und kann bedingt neue Lebensräume im urbanen Raum schaffen.

Für eine naturschutzkompatible Wärmewende sind eine vorangegangene Dämmung bzw. sind Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz unerlässlich, da sie den Energiebedarf senken und den Einsatz von Energieträgern zur Beheizung oder Kühlung reduzieren.

Konkrete Beschreibung der Instrumente und Aufzeigen des Handlungsbedarfs

Die Gebäudesanierung ist zentrales Element bei der Erreichung der politisch vereinbarten Klimaziele und zur Reduktion von CO₂ im Gebäudesektor. Wegen der geringen Auswirkungen bei Effizienzsteigerungsmaßnahmen auf den Naturschutz wird an dieser Stelle der Tausch und die Neuinstallation von Heizungsanlagen bzw. die Anbindung an ein Wärmenetz (vgl. hierzu Auswirkungen Kap. 4.3) empfohlen. Damit wird der Einsatz von (fossilen) Energieträgern reduziert.

Maßnahmen an der Gebäudehülle werden aktuell über zwei Instrumente gesteuert.

- Steuerliche Förderung energetischer Gebäudesanierungen: Bei Einzelmaßnahmen zur energetischen Gebäudesanierung sind 20 % der Aufwendungen (max. 40.000 Euro pro Wohnobjekt), verteilt über drei Jahre, steuerlich abzugsfähig. Die steuerliche Förderung können Bürger:innen geltend machen, welche energetische Sanierungsmaßnahmen an selbstgenutztem Wohneigentum vornehmen.
- Investitionszuschüsse/Tilgungszuschüsse: über das Marktanreizprogramm (MAP des BAFA) und der KfW-Programmlinien. Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG)

Ziel ist die Reduzierung des Energiebedarfs. Eine Betrachtung von naturschutzfachlichen Auswirkungen erfolgt nicht bei der Zuwendung und Bewilligung von Förderungen und Zuschüssen.

Das Klimaschutzgesetz in Bezug auf die Gebäudesanierung hat nur eingeschränkte Auswirkungen auf direkte naturschutzrelevante Aspekte. Dafür braucht es eine Novellierung des GEG mit Verschärfung des Effizienzhausniveaus für Neubau auf Effizienzhaus 40 und der Ausweitung des Anteils an Erneuerbaren Energieträgern für den energetischen Restbedarf. Eine raschere Umsetzung von Mindestenergiestandards der EU-Kommission nach deren Veröffentlichung in deutsches Recht ist anzustreben.

Steuerliche Begünstigungen wie die Geltendmachung handwerklicher Leistungen haben Auswirkung auf die Auswahl der Technik und ergänzen die Umsetzung einer notwendigen Verschärfung. Mit dem Einbeziehen von Biomasseheizanlagen entfalten diese eine direkte Auswirkung auch auf die Auswahl des zukünftigen Energieträgers. Eine Ungleichbehandlung der unterschiedlichen Techniken ist unwahrscheinlich. Mit der Ausweitung der Förderungen um naturschutzfachlich relevante Aspekte können sowohl der Beitrag des Energiesektors bei der CO₂ Reduktion im Gebäudesektor gesteigert als auch Naturschutz berücksichtigt werden.

Die Ausweitung der Unterstützung mittels Zuschüssen oder Förderungen bei der Dämmung umfassen lediglich handwerkliche Leistungen. Eine gesetzliche Erweiterung, die bei Effizienzmaßnahmen die Schaffung weiteren Lebensraums an Fassade oder Dachstühlen vorschreibt, könnte im Rahmen der Unterstützung berücksichtigt werden. Diese Form der Unterstützung eignet sich für Maßnahmen an Einzelwohngebäuden. Hier kann über den Anreiz ein Mehr an Lebensraum gestaltet werden.

Unterschieden werden muss bei Sanierungen von Mehrfamiliengebäude zwischen den unterschiedlichen Formen der Eigentümerstruktur. Die entstandenen Lebensräume sind hier oftmals unbekannt. Hausverwaltungen fehlen der Überblick und das Wissen über die vielfältigen Biotope. Ansätze zum Erhalt möglicher Lebensräume müssen bekannt sein. Ein niederschwelliges Informationsangebot, in der Erweiterung der Tätigkeiten z. B. kommunaler Klimaschutzmanager:innen um naturschutzfachliche Aspekte, könnte hier eine erste Option sein. Neben der Motivationsarbeit unterschiedliche Gebäudestrukturen zu sanieren, müssen die zuständigen Akteur:innen in der kommunalen Verwaltung, bei Energieagenturen oder Hausverwaltungen informiert und entsprechend weitergebildet sein. Die Erweiterung von Lehrinhalten ist dazu nötig.

Kurzfristig kann dieses Leck an Know-how bei den zuständigen Akteuren über unabhängige Beratungsstellen kompensiert werden oder präsenste kommunale Verwaltungen (Naturschutz) muss in Kooperation Amtshilfe leisten. Diese kann z. B. in Form einer Begutachtung der zu sanierenden Gebäude im Vorfeld erfolgen.

Bisher gibt es keine gesetzlichen Grundlagen, die naturschutzfachliche Maßnahmen berücksichtigen. Zusammengefasst sollten daher bei Individualgebäuden zumindest auf den Zeitpunkt der Sanierung geachtet werden (z. B. um Brutzeiten zu vermeiden), sowie Nisthilfen und neue Lebensräume sowohl im Neubau wie auch bei Sanierungen im Bestand mit vorgesehen werden.

Eine institutionelle Umsetzung bzw. Berücksichtigung von naturschutzfachlichen Aspekten, kann im Rahmen einer Aufstockung bzw. Anpassung von bereits existierenden Fördermitteln erfolgen, wenn wie oben beschrieben das Know-how bei verantwortlichen Akteuren gesteigert wird. Energieberatende, die für Sanierungen zu Rate gezogen werden müssen, können hierfür qualifiziert werden.

Eine weitere Möglichkeit wäre, größere Dämmmaßnahmen und Arbeiten zur energetischen Sanierung an Gebäuden per se genehmigungspflichtig durch die Naturschutzbehörden zu machen. Können Lebensräume durch die Arbeiten zerstört werden, so sind besondere Auflagen bzw. Kompensationsmaßnahmen zu erfüllen.

6.2.2. Naturverträgliche Ausgestaltung von Effizienzmaßnahmen bei der Auswahl von Dämmmaterialien und beim Einsatz von Grünfassaden

Abstrakte Beschreibung der Stellschraube

Den Energiebedarf in Gebäuden zu senken, trägt zum Klimaschutz bei. Der Energiebedarf ist aktuell saisonal noch unterschiedlich, so ist dieser im Winter wegen der benötigten Heizenergie nach wie vor höher als im Sommer. Laut einer Studie des UBA aus dem Jahr 2011 kann sich dies aber ändern, da mit der Zunahme von längeren Hitzeperioden im Sommer der Wunsch nach Kühlung auch in Wohngebäuden zunehmen kann. Derzeit schwanken die Angaben für den Kühlenergiebedarf in Wohngebäuden aus vorhandenen Studien bei einem Vergleich der unterschiedlichen Quellen extrem stark, anders als bei Nichtwohngebäuden. "Der Kühlenergiebedarf für den Nichtwohngebäudebestand ist aufgrund der vorliegenden bewerteten Zahlen für das Jahr 2005 mit 15-20 TWh/a etwa 100-mal höher als derjenige für Wohngebäude. Künftig ist mit einer deutlichen Zunahme der durch Gebäudekühlung erzeugten

Kohlendioxidemissionen zu rechnen" (Bettgenhäuser et al. 2011). Studien gehen davon aus, dass sich zum Referenzjahr 2008 der Energiebedarf für Kühlung in den nächsten 20 Jahren mehr als verdoppeln wird und somit als sehr hoch einzustufen ist. In Nichtwohngebäuden fällt der Anstieg geringer aus, da hier bereits Kühlung oftmals bereits integriert ist.

Um den Hitzewellen wirkungsvoll zu begegnen, gibt es bauliche und verhaltenstechnische Maßnahmen, die es ermöglichen, die Innenraumtemperaturen auch ohne Klimatisierung zu senken. Zu den baulichen Maßnahmen, zählen am Gebäude:

- Einbau von dreifach-verglasten Wärmeschutzfenstern
- Wärmedämmung
- Steigerung der Luftdichtheit
- Verschattung von Fensterflächen im Sommer durch größeren Dachüberstand

Während Maßnahmen, wie zum Beispiel die Verbauung von Wärmeschutzfenstern einen geringen bzw. verhaltenstechnische Maßnahmen keine direkten Einflüsse auf naturschutzfachliche Aspekte haben, können die folgenden technischen Ausführungen positive Folgen für Lebensräume am Gebäudebiotop haben.

Gründächer und Fassadenbegrünungen können die oben beschriebenen Effekte bewirken und einen Beitrag zur Kühlung leisten. Die Begrünungsmaßnahmen verhindern einerseits das Aufheizen der Gebäudehülle und reduzieren die Reflektion der Sonneneinstrahlung. Dies wirkt sich positiv auf das Stadtklima aus. Eine erweiterte Möglichkeit Temperaturen in Kommunen zu senken, sind die Gestaltung von Frischluftschneisen, Begrünungen, die zur Verschattung von versiegelten Flächen beitragen und naturverträgliche Dämmung.

Bei der Auswahl des Dämmmaterials ergeben sich Unterschiede in der Kühlleistung. Dämmstoffe, die dieselben Wärmedämmeigenschaften aufweisen, können beim Wärmeschutz Unterschiede zeigen. Hohe Wärmespeicherfähigkeit von Dämmstoffen wirkt sich positiv aus, da sie einen langsameren Temperaturdurchgang besitzen, so dass Hitze länger abgeschirmt wird. Naturdämmstoffe, wie Hanfdämmmatten, Zelluloseflocken und Dämmplatten aus Holzfasern haben eine hohe Wärmespeicherkapazität, damit schneiden sie besser beim Wärmeschutz ab.

Tab. 22: Natürliche Dämmmaterialien mit Wärmeleitfähigkeit und spezifischer Wärmekapazität.

Dämmstoff	Wärmeleitfähigkeit λ in W/mK	Spezif. Wärmekapazität in J/(kgK)
Hanfdämmung	0,040 - 0,045	2300
Holzfaserdämmplatten	0,040 - 0,055	2100
Zelluloseflocken	0,040 - 0,045	2000
Polystyrol-Hartschaum	0,035 - 0,040	1450
Stahlbeton	1,4	1050
Vollziegel	0,8	950
Mineralwolle	0,030 - 0,045	900

Eine erweiterte Möglichkeit Temperaturen in Kommunen zu senken, sind die Gestaltung von Frischluftschneisen, Begrünungen, die zur Verschattung von versiegelten Flächen beitragen und naturverträgliche Dämmung.

Konkrete Beschreibung der Instrumente und Aufzeigen des Handlungsbedarfs

Eine Dämmung der Gebäudehülle ist ein wichtiger Beitrag zur Reduzierung des Energieverbrauchs. Das gilt sowohl für den Einsatz von marktüblichen Dämmstoffen wie auch für den

Einsatz von Naturmaterialien wie oben dargestellt. Eine Beschränkung auf den ausschließlichen Einsatz von Naturmaterialien für die Dämmung wäre kontraproduktiv. Allerdings kann über eine kontinuierliche Aufklärungsarbeit zum Einsatz von Naturmaterialien und einer Anreizförderung die Etablierung am Markt gefördert werden. Da der Einsatz teurer ist kann eine gebundene Förderung den Preisunterschied ausgleichen und die Wahl für natürliche Dämmmaterialien begünstigen. Dies kann über das GEG erfolgen.

6.3. Wärmenetze zur Integration von klima- und naturschutzfreundlichen Wärmetechnologien

Abstrakte Beschreibung der Stellschraube

Durch die leitungsgebundene Wärmeversorgung können viele erneuerbare Wärmequellen und Abwärme integriert werden, die bei einer dezentralen Wärmeversorgung nicht in Frage kommen. Beispielsweise sind Tiefengeothermie und Großwärmepumpen, mit denen bestimmte Umweltwärmequellen wie Oberflächengewässer erschlossen werden, nur in Verbindung mit einem Wärmenetz wirtschaftlich sinnvoll anwendbar. Auch die Nutzung von unvermeidbarer Abwärme aus Industrieprozessen oder Abwasser zur Gebäudebeheizung kann nur mit einem Wärmenetz umgesetzt werden, da für die nötigen Investitionen ein gewisser Mindestwärmeabsatz erforderlich ist. Wärmenetze ermöglichen somit zugleich die Integration von Technologien, die gut mit dem Naturschutz vereinbar sind.

Wärmenetze können außerdem Kälte bereitstellen, indem beispielsweise Absorptionskälteanlagen angeschlossen werden, welche die gelieferte Wärme in Nutzkälte umwandeln. Auch Kältenetze sind eine denkbare Alternative, um naturschutzkompatibel Kälte bereitzustellen.

Zudem bestehen Wärmenetzsysteme aus einem Erzeugerpark, d. h. sie werden aus verschiedenen Quellen gespeist (Hybridsystem). In dem Hybridsystem werden die Erzeuger in einer optimierten Regelung je nach Wärmelast (Grund-, Mittel- und Spitzenlast) gesteuert. So besteht in Hybridsystemen die Möglichkeit, Technologien bzw. Brennstoffe effizient und zielgerichtet einzusetzen. Der Einsatz von begrenzt zur Verfügung stehenden (biogene Abfall- und Reststoffe sowie klimaneutrale Gase) sowie naturschutzfachlich eher problematischer Technologien und Brennstoffen (z. B. Anbaubiomasse und PtG) kann in intelligent geregelten hybriden Fernwärme-Erzeugerparcs auf das notwendige Minimum reduziert werden.

Wärmenetze werden bereits in Wissenschaft sowie Politik als relevante Infrastruktur für die Wärmewende gesehen (BMW 2021). Der aktuelle politische und rechtliche Rahmen für den Ausbau und die Verdichtung von grünen Wärmenetzen wird durch anreizbasierte Förderungen (insbesondere Wärmenetze 4.0 bzw. das neue Programm BEW, vsl. ab 2021), sowie durch übergeordnete finanzielle Rahmenbedingungen (z. B. KWKG, BEHG) und ordnungsrechtliche Vorgaben (z. B. WärmeLV) beeinflusst. Nicht zuletzt spielen auch planerische Instrumente wie die kommunale Wärmeplanung eine wichtige Rolle für die Entwicklung von Wärmenetzinfrastruktur.

Konkrete Beschreibung der Instrumente und Aufzeigen des Handlungsbedarfs

Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG): Umlagefähigkeit der CO₂-Kosten

Das BEHG kann erneuerbare Erzeugungsanlagen in der Fernwärme wettbewerbsfähiger gegenüber fossil befeuerten Anlagen stellen. Außerdem werden die Rahmenbedingungen für grüne Fernwärme gegenüber dezentraler, aus fossilen Brennstoffen erzeugter Wärme verbessert. Die CO₂-Bepreisung im Brennstoffemissionshandel setzt auch Anreize zur Änderung des Heizverhaltens.

Für die Wirkung des Instruments ist es u. a. entscheidend, ob die Eigentümer:innen der Gebäude angereizt werden, Investitionen in die Gebäudeeffizienz und in fossilfreie

Heizungssysteme (z. B. Fernwärmesysteme) zu tätigen. Bleibt es wie bislang vorgesehen Vermietern möglich, die CO₂-Kosten in vollem Umfang auf Mieter:innen umzulegen, so besteht für sie kein unmittelbarer Anreiz, in Gebäudeeffizienzmaßnahmen oder in den Anschluss an ein grünes Fernwärmenetz (oder eine klimafreundliche dezentrale Heizung) zu investieren. Es bedarf daher einer Nachsteuerung bei den Regelungen zur Kostentragung. Eine vollständige Kostentragungspflicht der Eigentümer:innen hat die größte Hebelwirkung in Richtung grüner Fernwärme. Eine differenziertere und ebenfalls wirksame Bestimmung des umlagefähigen Anteils ist die Ermittlung in Abhängigkeit des energetischen Gebäudezustandes (z. B. orientiert an der Effizienzklasse des Energieausweises (vgl. dena 2021, DENEFF 2020)).

Wärmelieferverordnung (WärmeLV)

Die Wärmelieferverordnung (WärmeLV) in Verbindung mit dem Paragraph 556c BGB gehört zum wichtigsten Hindernis der Verdichtung von Wärmenetzen im Gebäudebestand. Darin wird geregelt, dass die Umstellung einer von Vermieter:innen betriebenen Heizung auf die Wärmelieferung durch Dritte (Fernwärmeanschluss) keine höheren Wärmekosten verursachen darf als in den drei vorhergehenden Jahren (retrospektiver Benchmark). Das Ziel der Regelung ist, Mieter:innen vor unverhältnismäßig hohen Wärmekosten zu schützen. Durch die in den letzten Jahren günstigen Preise von Heizöl und Erdgas ist dieser retrospektive Benchmark so niedrig, dass er den Anschluss an ein Wärmenetz in sehr vielen Bestandsquartieren verhindert. Um die Verdichtung und den Ausbau von Wärmenetzen zu fördern, muss die Methodik für das Benchmarking geändert werden. Der Blick auf die zurückliegenden Jahre verschleiert, welche Kosten auf die Mieter:innen in den folgenden Jahren zukommen, wenn weiterhin eine fossile Heizung betrieben wird (steigende CO₂-Preise nach BEHG, Preissteigerungen fossiler Brennstoffe). Zudem werden Betriebskosten des bestehenden Systems mit Vollkosten für das neue System verglichen.

Geeigneter ist ein in die Zukunft gerichteter antizipierender Benchmark. Dabei sollten die erwarteten Kosten des bestehenden Heizungssystems als Vergleichswert dienen, beispielsweise indem die erwarteten CO₂-Preisentwicklungen sowie Brennstoffkosten berücksichtigt werden. Alternativ kann ein standardisierter Benchmark eingeführt werden, der die Vollkosten einer künftigen Wärmeversorgung mit einem Mindestanteil erneuerbarer Energien beinhaltet.

Bundesförderung effiziente Wärmenetze (BEW)

Die Bundesförderung effiziente Wärmenetze (BEW) wird ab dem dritten Quartal 2021 erwartet. Das Programm wird die bisherige BAFA-Förderung Wärmenetze 4.0 ersetzen und erweitern. Die hier genannten Details beziehen sich auf die aktuell verfügbaren Informationen (Pehnt 2020) sowie auf den veröffentlichten Entwurf der Förderrichtlinie. (BMW 2021)

Im Vergleich zur bisherigen Förderung weist das BEW einige Neuerungen auf: insbesondere sind die Förderungen für Einzelmaßnahmen zu nennen, die auch ohne vorhergehende Transformationsstudie in Anspruch genommen werden können (z. B. Solarthermieanlagen, Großwärmepumpen, Biomasse mit Nebenanforderungen, Wärmespeicher und -netze > 50 % EE/Abwärme, Geothermie). Eine weitere sehr relevante Neuerung ist, dass nicht wie bislang nur neue Wärmenetze mit Machbarkeitsstudien und in der Umsetzung gefördert werden, sondern auch die Transformation von Bestandsnetzen gefördert wird. Zusätzlich werden vsl. Betriebsprämien für Solarthermie und Großwärmepumpen vorgesehen.

Diese neue Aufstellung der Förderung für Wärmenetze ist sehr positiv. Es ist wichtig, dass die finanzielle Ausstattung und langfristige Planbarkeit sichergestellt wird. Die jährliche Gesamtausstattung für das BEW sowie die Förderung je Projekt müssen ausreichend bemessen sein, um auch große Projekte mit Skaleneffekten zu implementieren.

Transformationspläne bei Ordnungsrecht und Förderung anerkennen

Transformationspläne bilden den Umbau eines Wärmenetzes über einen langfristigen Zeitraum (z. B. bis 2045) ab und planen die Umstellung des Netzes auf erneuerbare Wärmequellen. Sie werden ab Inkrafttreten des BEWs förderfähig sein, sofern sie bestimmten Mindestanforderungen genügen. Die Förderung beträgt dann 50 % der förderfähigen Kosten für die Erstellung der Transformationspläne (max. 600.000 Euro). Die Transformationspläne geben einen zeitlich klar definierten Zielpfad vor, nach dem die Wärmenetze schrittweise auf erneuerbare Wärmequellen umgestellt werden. Damit wird konkret belegbar, welche Fortschritte ein Wärmenetz innerhalb einiger Jahre in Richtung Klimaneutralität erzielen wird.

Dieses Potenzial kann honoriert werden, indem der Zielzustand eines Transformationsplans für das Jahr 2030 herangezogen wird, um die EE-Nutzungspflicht mittels Wärmeanschluss (GEG) bzw. die Förderbedingungen für einen Wärmenetzanschluss (BEG) zu erfüllen.

Die Nutzungspflicht für erneuerbare Energien im GEG kann durch den Anschluss an ein Fernwärmenetz ab 50 % EE/Abwärme/KWK-Anteil erfüllt werden. Heutzutage erfüllen einige Wärmenetze diese Anforderung nicht, innerhalb weniger Jahre werden jedoch nahezu alle Wärmenetze diese Anforderungen erfüllen bzw. übertreffen.

Die Förderung des Anschlusses an ein Wärmenetz nach BEG wird ab einem EE-Anteil von 35 % im Wärmenetz gewährt. Auch bei dieser Regelung ist es sinnvoll, das Dekarbonisierungspotenzial der Fernwärme anzuerkennen, indem die Transformationspläne der Fernwärmeversorger berücksichtigt werden. Damit die Transformationspläne für die Erfüllung der Bedingungen im GEG und BEG berücksichtigt werden können, wird vorausgesetzt, dass die Fernwärmeversorger sich zu den definierten Zielen und Maßnahmen verbindlich bekennen.

6.4. Quantitative Steuerung der Biomassenachfrage aus dem Wärmesektor

Abstrakte Beschreibung der Stellschrauben

Die Nutzung von Biomasse im Wärmesektor lässt sich aus technischer, wirtschaftlicher, systemischer und naturschutzfachlicher Perspektive beleuchten. In diesem Abschnitt werden diese Aspekte eingeordnet und miteinander verknüpft. Darauf basierend werden Schlussfolgerungen für die regulatorischen Anpassungen im Bereich der Biomassenutzung im Wärmesektor abgeleitet.

An den jeweiligen Stellen innerhalb dieses Berichts wird der Biomasseeinsatz im Wärmesektor aus den verschiedenen Perspektiven analysiert: Die technischen Aspekte der Biomassenutzung (siehe Anhang), die wirtschaftlichen Aspekte der Biomassenutzung unter den aktuellen regulatorischen Rahmenbedingungen (Kapitel 2), der gesamt-volkswirtschaftliche und systemische Aspekt der Biomassenutzung (Kapitel 4) und die naturschutzfachliche Bewertung (Kapitel 5).

Aus technischer Sicht ist die Nutzung von Biomasse zur Wärmeerzeugung, ob als Festbiomasse oder in Form von Biogas (auch Biomethan), grundsätzlich vorteilhaft. Mittels Kesseln oder KWK-Anlagen kann in Verbrennungsprozessen das geforderte Temperaturniveau bis etwa 500°C bereitgestellt werden. Ein weiterer Vorteil ist die zeitlich flexible Steuerbarkeit der Wärmeerzeugung mittels Biomasse. Unabhängig von Klima- und Witterungsbedingungen kann Wärme auf dem gewünschten Temperaturniveau erzeugt werden. Dies macht Biomasse zu einem attraktiven Brennstoff sowohl im Gebäudewärmebereich (insbesondere für die Heizperiode) als auch im Prozesswärmebereich.

Berücksichtigt man die ökonomischen Rahmenbedingungen, so ist der Einsatz von Biomasse derzeit eine relevante Option für die wirtschaftlich effiziente Erzeugung von erneuerbarer Wärme. Dies gilt sowohl im dezentral versorgten Gebäudebereich wie auch zentral in

Wärmenetzen sowie im Bereich der Prozesswärmeerzeugung. Dafür sorgen einerseits hohe (betriebliche) Opportunitätskosten für alternative erneuerbare Technologien, z. B. für Wärmepumpen oder Wasserstoff. Andererseits fördern begünstigende Faktoren (z. B. der Ausschluss von der CO₂-Bepreisung sowie die entsprechenden Förderprogramme sowie der geringe Steuersatz auf Energieholz) den Einsatz von Biomasse im Wärmesektor.

Neben den technischen und betriebswirtschaftlichen Aspekten fließen jedoch auch die volkswirtschaftlichen sowie die naturschutzfachlichen Aspekte in die Analyse ein, um zu einer ganzheitlichen Bewertung zu gelangen.

Aus volkswirtschaftlicher Sicht werden die Systeme am effizientesten bewertet, welche einen Ausstieg aus der dezentralen Biomassenutzung voraussetzen. Der Grund dafür ist, dass der notwendige Markthochlauf von alternativen Technologien (Wärmepumpen) insbesondere in der dezentralen Gebäudewärme erschwert wird, wenn weiterhin Biomasseanlagen installiert werden. Langfristig fehlt die Biomasse, welche für die Gebäudewärmeerzeugung eingesetzt wird, für die Dekarbonisierung von Prozesswärmeanwendungen. Für diese Bereiche stehen allerdings nur wenige, teure Alternativen zur Verfügung stehen. Die fortlaufende Nutzung von Biomasse in dezentralen Niedertemperaturanwendungen führt u. a. zu höheren PtX-Importen und damit zu hohen Gesamtsystemkosten (Gerhardt et al. 2019).

Während die volkswirtschaftliche Bewertung den Einsatzort bzw. Anwendungssektor von Biomasse (dezentral oder zentral bzw. Gebäude- oder Prozesswärme) als Kriterium herausstellt, ist es für die naturschutzfachliche Perspektive weniger relevant, wer der Letztverbrauchende ist.²² Hierfür ist relevanter, welche Biomassemengen eingesetzt werden und aus welchen Quellen bzw. Sortimenten diese stammen.

Einige Biomassearten weisen bei entsprechenden Rahmenbedingungen eine gute Naturverträglichkeit auf. Dazu gehören beispielsweise biogene Rest- und Abfallstoffe sowie Kurzumtriebsplantagen (KUP), die auf naturschutzfachlich unbedeutsamen Flächen angebaut werden sowie nachhaltig bewirtschaftete Wälder. KUP haben jedoch zugleich eine sehr geringe Flächeneffizienz.

Viele Biomassesortimente verfügen über eine eher schlechte Naturverträglichkeit und Flächeneffizienz. Dazu gehören z. B. einjährige Anbaukulturen (Mais zur anschließenden Vergärung), intensive Waldbewirtschaftung und Kahlschlag sowie der Anbau von KUP auf naturschutzfachlich bedeutsamen Flächen.

Die Produktion naturverträglicher Biomassesortimente ist begrenzt und lässt sich nicht beliebig steigern. Insgesamt lautet das Fazit aus naturschutzfachlicher Sicht, dass so wenig Biomasse wie nötig zur Wärmeerzeugung eingesetzt werden sollte.

Die Verknüpfung der beschriebenen Aspekte führt zu folgenden grundsätzlichen Prinzipien für die Biomassenutzung im Wärmesektor:

1. Biomassenutzung im Wärmesektor insgesamt geringhalten.

Die Biomassemenge im Wärmesektor sollte aus naturschutzfachlicher Sicht im Vergleich zu heute nicht erheblich gesteigert werden, da ansonsten erheblich mehr Flächen im In- und Ausland für die Kultivierung von Energiepflanzen genutzt werden müssten bzw. eine Intensivierung der Waldbewirtschaftung stattfinden würde.

²² Es ist nur insofern relevant, als dass auch aus naturschutzfachlicher Sicht der Einsatz von Biomasse in Verbrennungssystemen mit hohen Standards an die Rauchgasfilterung vorzuziehen ist.

2. Nachhaltig erwirtschaftete Biomasse einsetzen.

Wenn Biomasse eingesetzt wird, dann sollten Nachhaltigkeitskriterien erfüllt sein. Darüber hinaus ist es wichtig, diese Kriterien über den gesamten Nutzungszeitraum einzuhalten. Eine Basis hierfür kann die Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung (BioStNachV) bieten, welche Nachhaltigkeitskriterien sowie den Nachweis der Nachhaltigkeit von Biomasse (Zertifizierung) regelt.

3. Phase-out der dezentralen Biomassenutzung.

Die gesamtsystemische volkswirtschaftliche Analyse zeigt, dass ein Ausstieg aus der dezentralen Biomassenutzung zur Erzeugung von Gebäudewärme langfristig am effizientesten ist. In der dezentralen Gebäudewärmeerzeugung sollte Biomasse zukünftig ausschließlich dort eingesetzt, wo alternative erneuerbare Optionen nicht zu akzeptablen Kosten zur Verfügung stehen. Dies betrifft schwer sanierbare Gebäude mit hohen Wärmebedarfen und Vorlauftemperaturen, ohne die Möglichkeit eines Wärmenetzanschlusses.

4. Funktionaler Biomasseeinsatz in Wärmesystemen mit mehreren Erzeugern.

Biomasse wird vornehmlich in Hybridsystemen eingesetzt, anstatt in monovalenten Systemen. Der klassische Anwendungsfall ist die Wärmeerzeugung in Wärmenetzsystemen zur Erzeugung der Mittel- und Spitzenlast. Außerdem kann der Einsatz von Biomasse auch in multivalenten dezentralen Systemen erfolgen. Dabei sollte jedoch keineswegs der Ersatz ganzer Kohlekraftwerke mit Biomasse oder die Beifeuerung von Biomasse in Kohle-KWs implementiert werden, da dies die Biomassenutzung erheblich steigern würde, damit dem Grundsatz (1) widersprechen würde und u. a. aus Naturschutzperspektive vermieden werden muss.

5. Funktionaler Biomasseeinsatz für hohe Temperaturen.

Bei Bedarf an hohen Temperaturen, beispielsweise im Prozesswärmesektor, ist Biomasse eine sinnvolle Dekarbonisierungsoption. Auch hier bestehen Optimierungspotenziale: Beispielsweise sollte die Biomasseanlage nach Möglichkeit einer anderen EE-Wärmetechnologie (z. B. Wärmepumpe) zur Temperaturanhebung nachgeschaltet sein, um die Effizienz zu steigern.



Abb. 48: Darstellung der Grundprinzipien für die Biomassennutzung im Wärmesektor aus Naturschutzsicht sowie der anzupassenden regulatorischen Bedingungen übergreifend und in den Anwendungen dezentral (Gebäudewärme) und zentral (Wärmenetze)/Prozesswärme.

Konkrete Beschreibung der Instrumente und Aufzeigen des Handlungsbedarfs

Im Folgenden wird für den dezentralen (Abschnitt 6.4.1) sowie für den zentralen Einsatz von Biomasse (Abschnitt 6.4.2) der Änderungsbedarf der regulatorischen Rahmenbedingungen aufgezeigt.

Übergreifend lassen sich jedoch zunächst zwei wichtige Instrumente beschreiben, welche für alle Anwendungsbereiche gelten:

- **Definition der Klimaneutralität von Biomasse prüfen.**

Biomasse wird derzeit als klimaneutraler Brennstoff eingestuft. Weder im europäischen Emissionshandel (EU-ETS) noch in der nationalen CO₂-Bepreisung (BEHG) müssen Zertifikate für die Verbrennung von Festbiomasse oder Biomethan erworben werden, sofern die eingesetzte Biomasse Nachhaltigkeitskriterien entspricht. Die Verbrennung von holziger Biomasse in großem Stil würde zunächst zu einem Anstieg der Treibhausgasemissionen in den kommenden Jahren führen (Norton et al. 2019; EASAC 2019), wenn sie als erneuerbare Energiequelle Kohle und Erdgas ersetzen soll. Biomasse hat eine geringere Energiedichte als diese fossilen Energieträger und somit höhere spezifische Emissionen bei der Verbrennung. Für die Beurteilung ist relevant, wie schnell die genutzte Biomasse tatsächlich wieder nachwächst und die bei der Verbrennung entstandenen Emissionen bilanziell wieder aufnimmt. Das European Academies' Science Council (EASAC) schlägt daher vor, Biomasse nur noch bei sehr schnell nachwachsenden Sortimenten (kurze Carbon-Payback-Zeiträume von beispielsweise unter 5 Jahren) als klimaneutral einzustufen und mit Null Emissionen zu bilanzieren. Bei längeren Carbon-Payback-Zeiträumen sollten hingegen anteilhaft steigend die tatsächlichen Emissionen

ausgewiesen werden – bis hin zu sehr langen Carbon-Payback-Zeiträumen von über 20 Jahren, bei denen 100 % der Emissionen berücksichtigt werden.

Eine derartige Anpassung würde in erster Linie die Selbstverständlichkeit, mit der Biomasse als klimaneutral gehandelt wird, einer relevanten Bedingung unterordnen. Zudem würde eine Anpassung die Nutzung von naturschutzfachlich besseren Biomassesortimenten, wie Rest- und Abfallstoffen aus der Landwirtschaft und schnellwachsenden Anbaubiomassen (z. B. KUPs, je nach naturschutzfachlicher Einordnung der Fläche) unterstützen. Daher sollte die Aufnahme von Biomasse mit langen Carbon-Payback-Zeiträumen in das BEHG (und auf europäischer Ebene in den EU-ETS) geprüft werden. Dabei sollten Überlegungen einbezogen werden, wie mit forstwirtschaftlichen biogenen Reststoffen aus langjährigen Sortimenten zu verfahren ist, welche bei der Ernte von holzigen Sortimenten für stoffliche Verwendungen anfallen (vgl. Kapitel 6.5).

Eine alternative Möglichkeit wäre die Anrechnung von negativen Emissionen für Aufforstungen in Kombination der Ausweitung der CO₂-Zertifikatepflicht für Biomasse.

- **Herkunftsnachweise für die Nachhaltigkeit von Biomasse.**

Kommt Biomasse zur Wärmeerzeugung zum Einsatz, so sollte über die gesamte Nutzungsdauer sichergestellt sein, dass nachhaltige Sortimente eingesetzt werden. Dies kann nachgewiesen werden, indem Herkunftsnachweise (HKN) für Biomasse in Verbindung mit einem entsprechenden Nachweisregister genutzt werden. Analog zu den in der RED II definierten HKN, welche durch ein elektronisches Dokument dem Endkunden gegenüber nachweisen, dass ein bestimmter Anteil der Energie aus erneuerbaren Quellen produziert wurde (RED II Art. 2), können HKN für Biomasse die Nachhaltigkeit und den Carbon-Payback-Zeitraum sowie weitere relevante Details enthalten. Nur so kann die durchgehende Einhaltung der Nachhaltigkeitskriterien sichergestellt werden. Zudem können die HKN verwendet werden, um den Carbon-Payback-Zeitraum der Biomasse für die Anerkennung der Klimaneutralität (und Freistellung von der Teilnahme am EU-ETS und nEHS) nachzuweisen. Grundsätzlich besteht auch die Möglichkeit, die Nutzung von Förderprogrammen und die Erfüllung ordnungsrechtlicher Vorgaben auf den Einsatz von nachhaltiger Biomasse mit kurzen Carbon-Payback-Zeiträumen zu beschränken.

6.4.1. Dezentraler Einsatz von Biomasse

Zusätzlich sollten das Ordnungsrecht in Form des GEG und die Förderung (BEG) angepasst werden, um den Phase-out der Biomasse im dezentralen Bereich bzw. den zielgerichteten Einsatz von Biomasse in Einzelfällen zu erreichen.

Folgende Handlungsempfehlungen gelten für die Förderung dezentraler Biomasseanlagen im BEG:

- Beendigung der Förderung monovalenter Biomasseheizungen beim Heizungstausch und im Neubau (BEG). Als Ausnahme gelten Bestandsgebäude, die nicht „Wärmepumpen-ready“ saniert werden können und welche nicht an ein Wärmenetz angeschlossen werden können. Für diese Ausnahmefälle sollten nach Möglichkeit bivalente Systeme (z. B. Wärmepumpe und Biomassespitzenlast) gefördert werden.
- Beendigung der Förderung monovalenter Gas-Brennwertheizungen („Renewable Ready“) beim Heizungstausch und im Neubau (BEG). Als Ausnahme gelten Bestandsgebäude, die nicht „Wärmepumpen-ready“ saniert werden können und welche nicht an ein Wärmenetz angeschlossen werden können. Für diese Ausnahmefälle sollten nach Möglichkeit bivalente Systeme (z. B. Wärmepumpe und Biomassespitzenlast) gefördert werden.

- Beendigung der Förderung des Ersterwerbs sowie der Sanierung von Effizienzhäusern der Klassen 40 EE und 50 EE, welche die Kriterien durch monovalente Biomasse-Heizungen erfüllen (BEG),
- Austauschprämie für monovalente Biomasseheizungen (analog zur Austauschprämie für Ölheizungen) zu Gunsten von Wärmepumpen.
- Förderfähig sind nur Anlagen, für die der Betrieb mit nachhaltiger Biomasse nachgewiesen wird.

Für das Gebäudeenergiegesetz werden folgende Anpassungen empfohlen:

- Ausschluss der Erfüllung der bestehenden EE-Nutzungspflichten im GEG für Wärme und Kälte (§ 10 Abs. 2 Satz 3 in Verbindung mit §§ 34 bis 45 GEG) sowie zukünftiger weiterer EE-Nutzungspflichten durch Biomasse. Dazu bedarf es insbesondere der Anpassung von §§ 34, 38, 39 und 40 in der aktuellen Fassung des GEG.
- Zusätzlich wird für die Anwendung des Primärenergiefaktors (PEF) zur Ermittlung des Gesamtenergiebedarfs (nach § 10 Abs. 2 Satz 2 GEG) für feste Biomasse in Einzelheizungen die Methodik des Biomasse-Budgets vorgeschlagen (Pehnt et al. 2021). Das Verfahren berücksichtigt, dass Biomasse nur in begrenztem Umfang nachhaltig zur Verfügung steht und daher vorrangig in sehr effizienten Anlagen zur Wärmeerzeugung eingesetzt werden soll. Für einen Biomasseeinsatz bis 50 kWh/m²a (entspricht dem Endenergiebedarf für Heizung und Warmwasser in einem Effizienzhaus 55) 20 g/kWh angesetzt, darüber hinaus wird der Biomasseeinsatz mit 180 g/kWh bilanziert. Damit soll der ineffiziente Einsatz von Biomasse vermieden werden.

6.4.2. Zentraler Einsatz in Wärmenetzen und für Prozesswärme

In Wärmenetzen ist der Einsatz von Biomasse zur Spitzenlastdeckung mit geringen Betriebsstunden effizient. So wird die zur Verfügung stehende Biomasse funktional genutzt, um während bestimmter Zeitperioden hohe Temperaturen zu erzeugen. Auch hierbei sollte nur Biomasse aus nachhaltigen Quellen verwendet werden. Das zukünftig relevanteste Förderprogramm für Wärmenetze auf Bundesebene wird die Bundesförderung effiziente Wärmenetze (BEW), die vsl. ab 2021/2022 in Kraft tritt²³. Die dort formulierten Förderbedingungen nehmen starken Einfluss auf die Transformation der Wärmenetze und auf die Errichtung neuer Wärmenetze. Daher sollten die Details so angepasst werden, dass auch die naturschutzfachlichen Aspekte einbezogen werden und die Biomassenutzung begrenzt wird.

Auch in der Prozesswärmeerzeugung kann der Einsatz von nachhaltiger Biomasse aus systemischer und naturschutzfachlicher Sicht eine sinnvolle Option sein, um dekarbonisierte hochkalorische Wärme beispielsweise in Form von Prozessdampf o. ä. zu erzeugen.

Folgende Empfehlungen werden gegeben, um die bestehenden Instrumente hinsichtlich der Biomassenutzung aus naturschutzfachlicher Sicht zu optimieren:

- Für Transformationspläne, welche die Dekarbonisierung von Wärmenetzen beschreiben, sollten die Anforderungen an die Einschränkung der Biomassenutzung verschärft werden. Bislang ist im Entwurf veranlagt, dass je nach Länge des Wärmenetzes im Jahr 2045 bis zu 25 % (Netze 20 bis 50 km) bzw. bis 15 % (Netze ab 50 km) der Wärmemenge durch Biomasse erzeugt werden darf²⁴.
- Aus naturschutzfachlicher Sicht wären für die Bedingungen in Transformationsplänen zwei Anpassungen sinnvoll. Zunächst sollten Zwischenziele bis 2045 definiert werden,

²³ Hier wird Bezug genommen auf die im Entwurf vom 16.07. definierten Regelungen (BMWi 2021)

²⁴ Satz 4.1.1 des BEW-Entwurfs vom 16.7.21

beispielsweise für die Jahre 2025, 2030, 2035 und 2040. Zudem sollten die o.g. Biomasseanteile für das Jahr 2045 weiter herabgesetzt werden.

- Auch für neue Wärmenetze sollten die entsprechenden Vorgaben für Machbarkeitsstudien verschärft werden. Bisher sollen neue Wärmenetze nicht mehr als 25 % (große Netze) bzw. 35 % (kleine Netze) Biomasseanteil aufweisen, um die Förderung zu erhalten (es sei denn, es wird vorrangig Altholz genutzt). Die Ausnahme, dass bei Altholznutzung auch größere Anteile zulässig sind, sollte geprüft und ggf. annulliert werden.
- Die Ergänzung Biomasse-basierter Nahwärmenetze durch Solarthermie, Wärmepumpen und Wärmespeicher sollte gezielt gefördert werden.
- Die zeitliche Begrenzung der Nutzung von Biomasse in größeren Fernwärmesystemen auf Spitzenlastkessel durch die Ausgestaltung im BEW (max. 4.000 VBH in kleinen Netzen und max. 2.500 VBH in großen Netzen) ist bereits gut geeignet. Denkbar ist eine weitere Verschärfung dieser Vorgaben (Absenkung der VBH) im zeitlichen Verlauf bis 2040.
- Feste Biomasse erhält einen sehr niedrigen Primärenergiefaktor f_P von 0,2 bzw. 20 g/kWh (AGFW Blatt 309-1), wodurch der Einsatz von Biomasse-Kesseln und Heizkraftwerken aus f_P -Sicht äußerst attraktiv ist. Das unter Abschnitt 6.1 vorgeschlagene Biomasse-Budgetverfahren ist nicht für Wärmenetze anwendbar. Für Wärmenetze könnte ein höherer, politisch definierter Pauschalfaktor für Biomasse angesetzt werden, welcher auch die begrenzte Verfügbarkeit des Rohstoffs berücksichtigt. In ifeu und Prognos et al. (2018) wird ein Faktor von 0,4 vorgeschlagen.
- Die Umrüstung von Kohle-KWs auf Biomasse ist aus naturschutzfachlicher Sicht besonders nachteilig, da bereits für die Umstellung eines Kohle-KWs sehr große Mengen an Pellets verbraucht würden²⁵ und dadurch eine Intensivierung der Waldnutzung oder Biomasseimport erfolgen würde. Die Umrüstung sollte daher aus naturschutzfachlicher Sicht nicht erfolgen und keinesfalls gefördert werden.
- Die Bedingungen in der Bundesförderung Energieeffizienz in der Wirtschaft (EEW) sollten analog zum im Entwurf der BEW vorgesehenen Bestimmung²⁶ vorsehen, dass zur Prozesswärmeerzeugung nachhaltige Biomassesortimente verwendet werden müssen.

6.5. Qualitative Steuerung der Biomasse in Richtung naturverträglicher Ressourcen

Reststoffe bevorzugen und Anbaubiomasse nachhaltiger gestalten

Biomassenutzung ist ein diverses Feld und pauschale Aussagen können kaum treffend formuliert werden. Generell kann jedoch festgehalten werden, dass die Nutzung von Reststoffen gegenüber der Anbaubiomasse aus naturschutzfachlicher Sicht zu bevorzugen ist. Je weiter die energetische Nutzung von Reststoffen am Ende der Kaskade liegt, desto vorteilhafter stellt sie sich dar. Rest- und Abfallstoffe, die keinen Zusammenhang mit der Fläche haben (Gülle, Mist, Biomüll, Reststoffe der Lebensmittelverarbeitung), sind in ihrer Nutzung aus Naturschutzsicht unkritisch. Anbaubiomasse und solche Reststoffe die einen direkten Flächenbezug aufweisen (KUPs, Waldrestholz, Stammholz, Stroh) bergen höhere Risiken für den Naturschutz und die biologische Vielfalt. Beim Anbau kann es zur Minderung der Habitatqualität und bei einer Flächenausdehnung aufgrund zusätzlich nachgefragter Biomasse zur Zerstörung von Lebensräumen kommen.

Um dieses differenzierte Bild zu vermitteln und allen Akteuren Anreize für die verstärkte Nutzung von Reststoffen zu geben, ist die intensive Kommunikation zwischen den Akteuren ein

²⁵ Für die Umrüstung des Kohle-KWs in Wilhelmshaven würden beispielsweise für die geplanten 3.200 bis 3.500 VBH etwa 1,2 Mio. t Pellets jährlich verbrannt, das entspricht mehr als der Hälfte des Pelletverbrauchs in Deutschland von etwa 2,3 Mio. t (2020). Quellen: Statista sowie (Hanke 2021) und (Ehlerding 2021)

²⁶ unter 4.2 Förderfähige Wärmequellen bzw. 7.2.3.4 Biomasseanlagen Satz 1.e

wichtigstes Instrument. Gerade der Naturschutz muss sich aktiv und konstruktiv in die Debatten einbringen. Kommunikation und Regionalität für die verwendete Biomasse aus Abfall- und Reststoffen und die damit verbundenen Mehrwerte, die sich für den Naturschutz ergeben, müssen frühzeitig und strategisch bearbeitet und berücksichtigt werden.

6.5.1. Holzige Biomasse zur Verbrennung

Abstrakte Beschreibung der Stellschrauben

Auch Waldrestholz oberhalb der Derbholzgrenze, holziges Landschaftspflegematerial und Stroh sollte weiter genutzt werden, anstatt auf Anbau (KUP) oder spezielle Energieholzernte im Wald zu setzen. Gerade alte und altersgemischte Laubholzbestände haben ein besonders hohes Potenzial für den Naturschutz, bei deren Pflege und Nutzung fallen durch den hohen Astanteil minderwertigen Sortimente an, die sich zur energetischen Nutzung eignen. Der Einordnung von holziger Biomasse als klimaneutraler Energieträger liegt das Idealbild eines nachhaltig bewirtschafteten Waldes zu Grunde, bei dem lediglich Äste größer 7 cm, Kronen, Rinde und Sägereste energetisch verwertet werden. Diese Form der Nutzung lässt auch aus Naturschutzsicht eine positive Einschätzung der energetischen Nutzung des Holzes zu. In weiten Teilen entspricht die Forstwirtschaft in Deutschland diesem Idealbild, dies trifft zumindest in den zertifizierten Wäldern zu (80 % der Waldfläche sind FSC oder PEFC zertifiziert).

Die direkte Ernte von Energieholz als Vollbaum- oder Stammholz aus Primärwäldern oder Wäldern mit hoher biologischer Vielfalt birgt Gefahren für die biologische Vielfalt und ist auch in Bezug auf ihre Klimaschutzleistung kritisch zu bewerten. Auch sollte Stammholz auch aus Nutzwäldern nicht als Energieholz genutzt werden, sondern im Sinne der Nutzungskaskade immer zunächst stofflich (Bauholz, Dämmstoff, Möbel etc.) Nur sehr schwer stofflich zu verwertende Holzsortimente (dünnere Äste sowie Baumkronen oberhalb der Derbholzgrenze), die als Reststoffe anfallen, sollten energetisch genutzt werden. Holz unterhalb der Derbholzgrenze sollte aus Naturschutzsicht als Nährstoffquelle im Wald verbleiben.

Konkrete Beschreibung der Instrumente und Aufzeigen des Handlungsbedarfs

Die RED II gibt Nachhaltigkeitskriterien für alle Bioenergiearten an. Jedoch sind die Kriterien für feste Biomasse sehr schwach und für eine Sicherung der Naturschutzbelange nicht ausreichend. Es ist festgeschrieben, dass die Erntetätigkeit legal sein muss, nach der Ernte eine Walderneuerung stattfinden muss und Schutzgebiete geschützt sind. Bei der Ernte ist auf die Erhaltung der Bodenqualität und der biologischen Vielfalt zu achten und durch die Erntetätigkeiten müssen die langfristigen Produktionskapazitäten des Waldes erhalten oder verbessert werden (RED II Art. 29.6). Hinzu kommen Anforderungen für Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF; RED II Art. 29.7). (Böttcher et al. 2020)

Diese Nachhaltigkeitskriterien kommen bei fester Biomasse jedoch nur bei sehr großen Anlagen Anwendung (> 20 MW) und lassen daher den größten Teil der festen Biomassenutzung außen vor.

Den notwendigen Rechtsrahmen für die Anwendung dieser Kriterien stellt die Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung (BioSt-NachV) dar, konkret im § 5 Anforderungen für forstliche Biomasse. (Bundesregierung 2021)

Nachhaltigkeitsstandards für holzige Biomasse aus dem Wald

Um die Nachhaltigkeit von holziger Biomassenutzung sicherzustellen, ist unbedingt die Ausweisung der Biomasseherkunft notwendig. Nur so können entsprechende Standards überprüft werden. Bestehende Zertifizierungssysteme (FSC, PEFC) können dazu beitragen, die Übernutzung der Wälder zu vermeiden. Der Import von Energieholz sollte vermieden werden oder

zumindest auf den europäischen Markt reduziert und an konkrete Nachhaltigkeitsstandards gebunden sein. Bei der Definition dieser Nachhaltigkeitsstandards kann neben bestehenden Zertifizierungssystemen auch die RED II Richtlinie genutzt werden. Die Regelungen in der RED II und auch in den Entwürfen zur RED III stehen allerdings als zu schwach in der Kritik. Die bisher diskutierten Vorschläge für Kriterien beziehen sich ausschließlich auf die Kompatibilität mit den Klimazielen und greifen für Biodiversitätsbelange deutlich zu kurz.

Der wissenschaftliche Diskurs zu den Auswirkungen der energetischen Holznutzung aus dem deutschen und europäischen Wald ist nicht abgeschlossen. Es müssen zwingend die Synergien in der Waldnutzung beachtet werden und entsprechende Förderungen (z. B. Reduzierung des Einschlags in minderwertigen Sortimenten wie Papier und Brennholz) etabliert werden. Problematisch in der Bewertung sind die aktuell noch pauschal dargestellten Zuwächse, die sich für alle Waldarten auf Zuwächse von Fichtenbeständen beziehen. Hier bedarf es differenzierterer Betrachtungen für die verschiedenen Baumarten und Forstsysteme.

Weiterer Untersuchungsbedarf besteht für die integrative Betrachtung der Klimaschutz- und Naturschutzleistung von Waldökosystemen und deren Nutzung. Im Zentrum der Betrachtung darf nicht der Einzelbaum stehen, sondern die Waldökosysteme/Forstsysteme, die entscheidend für die ideale Balance zwischen Klimaschutz- und Naturschutzleistung sind. Eine Vertiefung dieses weitreichenden Diskurses kann jedoch im Rahmen dieser Studie nicht vorgenommen werden.

Gerade alte Laubbaumbestände haben einen besonders hohen Wert für den Naturschutz, die hohen Zuwächse bestimmter Baumarten im Jugendstadium sprechen jedoch für eine Nutzung der Bestände, um einen möglichst großen Klimaschutzeffekt zu entfalten. Eine Lösung mit dem vermeintlich besten Trade-off zwischen langfristigem Naturschutz und Klimaschutz, könnten also nachhaltig bewirtschaftete Wälder mit gemischter Altersstruktur darstellen. Weitere Untersuchungen mit einem speziellen Fokus auf die integrative Betrachtung beider Aspekte sind dazu notwendig. Der wissenschaftliche Diskurs ist hier nicht abgeschlossen.

Nachhaltigkeitsstandards für holzige Anbaubiomasse

Abstrakte Beschreibung der Stellschrauben

Der klassische Anbau fester Biomasse zur Verbrennung findet in Kurzumtriebsplantagen (KUP) auf landwirtschaftlichen Flächen statt. Die Naturverträglichkeit dieses Anbaus hängt stark von der Vornutzung der Flächen sowie der Ausgestaltung des Anbaus ab. Derzeit erfolgt noch keine differenzierte Betrachtung zum Anbau, Nutzen und Mehrwert, was einen Ausbau des Anbaus schwierig macht. Umrandungen der KUPs mit vielfältigen Hecken aus heimischen Gehölzen sowie die ausschließliche Anlage auf Ackerland wirken sich sehr positiv auf die Naturverträglichkeit aus.

Insgesamt ist die Flächeneffizienz gegenüber anderen energetischen Nutzungen eher schlecht. Die Anlage von KUPs darf zudem nicht zu einer Verdrängung von Biogasflächen führen, da es sonst zu ILUC Effekten kommen kann.

Konkrete Beschreibung der Instrumente und Aufzeigen des Handlungsbedarfs

Die Definition von Nachhaltigkeitsstandards für KUPs sollte in anerkannten Normen (CEN oder ISO Norm) festgelegt werden. Aktuell gibt es dies jedoch noch nicht. Ebenso gibt es derzeit keine Regelung für feste Biomasse –Verbrennungsanlagen < 20 MW, die einen Nachhaltigkeitsnachweis fordert. Die Anwendung der RED II Richtlinien ist auf Anlagen > 20 MW beschränkt. Die Abgrenzung von Holzimporten oder nicht nachhaltig produzierter Holziger Biomasse kann durch Zertifizierungssysteme erfolgen.

Die Zertifizierungssysteme FSC und PEFC regeln die waldbauliche Praxis und haben Mindestanforderungen für eine naturverträgliche Holznutzung aus dem Wald definiert. In regelmäßigen Auditierungen werden diese Anforderungen überprüft. Beispielsweise stellt die Berücksichtigung der Derbholtzgrenze sicher, dass genügend Nährstoffe im Wald verbleiben.

Standards zur Definition der Nachhaltigkeit für holzige Biomasse müssen entwickelt und angewendet werden. Diese sollten sowohl beim Anbau und Ernte als auch bei den Verwertungsanlagen eingesetzt werden. Zumindest bei geförderten Verbrennungsanlagen sollte ein Nachhaltigkeitsnachweis für die eingesetzte Biomasse erbracht werden, analog zum Rohstofftagebuch bei Biogasanlagen. Entsprechende Zertifizierungen wie FSC und PEFC erhielten dadurch mehr Gewicht und auch die entsprechende Gestaltung von KUPs könnte sich etablieren.

Ein Austausch zwischen verschiedenen Projekten zu den Potentialen von KUPs ist wünschenswert und sollte gefördert werden, um eine differenzierte Betrachtung unterschiedlicher Anbausysteme voran zu bringen und entsprechende Empfehlungen erarbeiten zu können.

6.6. Biomasse zur Vergärung

Steigerung der Nachhaltigkeit durch Nutzung von Rest- und Abfallstoffen

Abstrakte Beschreibung der Stellschraube

Auch im Bereich der Biogasanlagen sollten vermehrt Reststoffe zum Einsatz kommen, ohne jedoch Nutzungskonkurrenzen zur stofflichen Verwertung zu verschärfen (vgl. Noll et al. 2020 sowie Schoof et al. 2019). Laut der Agora Studie KN2050 (Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut 2020) kann trotz zurückgehender Tierbestände die Leistung aus der Gülle- und Reststoffnutzung von 4,6 TWh (2018) auf bis zu 15,3 TWh (2050) gesteigert werden. Geregelt wird die Reststoffnutzung aktuell im Wesentlichen über EEG und das Abfallrecht, aus dem sich dann die notwendigen Zulassungen für die Energie-Anlagen ableiten.

Konkrete Beschreibung der Instrumente und Aufzeigen des Handlungsbedarfs

Es bedarf einer geeigneten Förderung, um die Nutzung von Gülle und Reststoffen in Biogasanlagen weiter zu steigern. Dazu muss eine Steuerung der Einsatzstoffe etabliert werden, die unabhängig von den Methan- und Stromerträgen funktioniert, um die gewünschte Lenkungswirkung zu entfalten. Eine Regelung im Rahmen des EEG scheint also nicht zielführend.

Fehlende Folgekonzepte für viele Biogasanlagen drohen die Kapazitäten in diesem Bereich stark zu reduzieren. Umrüstungen und die Umstellung auf naturverträglichere Einsatzstoffe wären eine sinnvolle Lösungsvariante. Eine Verlängerung der EEG-Förderung von bestehenden Biogasanlagen über den 20-jährigen Förderzeitraum hinaus ist jedoch gemäß EU-Beihilferecht nicht möglich.

Die Förderung bestimmter NawaRo (Blümmischungen, Silphie etc.) durch einen neuen NawaRo Bonus birgt zudem die Gefahr von unklaren Definitionen und damit einhergehenden Schlupflöchern. Welche Biomassen genau gelten als NawaRo und was passiert mit neuen Kulturen oder Gemischen, die nicht aufgeführt sind. Aktuell dürfen in sogenannten NawaRo Anlagen aufgrund der Genehmigungen keine Abfallstoffe verwertet werden. Aufgrund der schwierigen Definitionslage gilt aber selbst Gras aus Parks oder von Straßenrändern als Abfallstoff, ebenso Landschaftspflegematerial. Sobald jedoch das Landschaftspflegematerial einmal als Einstreu durch den Stall gewandert ist, kann es in die Anlagen eingebracht werden. Die Erfahrungen mit der Anwendung des EEG in der Vergangenheit haben daher gezeigt, dass dies in der derzeitigen Ausgestaltung kein sinnvolles und nutzbares Instrument für den Naturschutz darstellt, da Abfallstoffe nicht ausreichend gefördert werden.

Die energetische Nutzung von Landschaftspflegematerial sollte ökonomisch angereizt werden, ohne jedoch zu einer naturschutzfachlich ungewünschten Intensivierung der Nutzung zu führen. Es sind die notwendigen Rahmenbedingungen zu schaffen, dass die Erlöse aus dem Biomasseverkauf auch wieder dem Naturschutz und der Flächenpflege zugutekommen. Dies ist gemäß der aktuellen Rechtslage und Verwaltungspraxis nicht der Fall.

Um die Nutzung von Gülle und Landschaftspflegematerial sowie weiteren Abfall- und Reststoffen attraktiv zu machen, muss ein Förderinstrumentarium entwickelt werden, welches die Klimaschutzleistung in den Vordergrund stellt. Eine solche Fördermöglichkeit muss zwingend die bestehende Biogas-Infrastruktur berücksichtigen, um dringend notwendige Folgekonzepte nach der EEG-Förderung zu offerieren. Es besteht sonst die Gefahr, die bereits aufgebauten Kapazitäten in diesem Sektor zu verlieren. Gerade in Anbetracht der Potenzialabschätzung aus der Agora Studie KN2050 wäre das fatal.

In diesem Förderinstrument sollte auch die Förderung von naturschutzfachlich wertvollen oder unschädlichen Einsatzstoffen geregelt und unterstützt werden. Dazu bedarf es einer Förderung, die unabhängig vom Methan- und Stromertrag erfolgt, damit die gewünschte Lenkungswirkung und Naturschutzleistung erzielt wird und nicht nach möglichen Schlupflöchern gesucht wird. Durch die dem EEG zugrunde liegende Förderung nach Strommenge sind immer die Einsatzstoffe attraktiv, die den höchsten Stromertrag bringen. Den größten Klimaschutzeffekt und die geringsten negativen Auswirkungen auf Natur und Landschaft haben aber Rest- und Abfallstoffe sowie extensiv produzierte Biomasse. Die Fokussierung auf den Stromertrag führt auch zu einer Maximierung der Stromproduktionsleistung und lässt keine Fahrweise entsprechend der Wärmebedarfe zu. Biogasanlagen verlieren so einen ihrer stärksten Vorteile – die Regelbarkeit zum Ausgleich der volatilen EE-Anlagen und zur Deckung der aktuellen Bedarfe.

Ziel von Biogasanlagen sollte es zukünftig sein, so viele Methanemissionen z. B. aus Gülle zu vermeiden wie möglich. Das ist für den Klimaschutz noch effizienter als die reine Vermeidung von CO₂-Emissionen durch erneuerbare Energien, da die gesamte THG Emissionsvermeidung bei güllebasierten Biogasanlagen deutlich größer ist als bei den verbreiteten NaWaRo Biogasanlagen. Da sich unter dem EEG die Wirtschaftlichkeit jedoch anhand der Stromproduktion ergibt, tritt die Klimaschutzleistung und der naturschutzfreundliche Betrieb in den Hintergrund.

Sobald die Förderanreize auf Methanproduktion oder Stromproduktion ausgerichtet sind, werden Gülle und Reststoffe uninteressant. Die Förderung von bestimmten Einsatzstoffen sollte sich also am Naturschutz-Mehrwert sowie am Klimaschutzpotenzial orientieren.

Nachhaltigkeitsstandards für Anbaubiomasse zur anschließenden Vergärung

Abstrakte Beschreibung der Stellschrauben

Für die erfolgreiche und störungsarme Vergärung von Gülle ist eine Ko-Fermentation von Reststoffen beziehungsweise eine Strukturbeigabe in Biogasanlagen notwendig. Dieser Einsatz ist naturverträglich, regional und nachhaltig zu gestalten. Als Einsatzstoffe bieten sich z. B. Paludikulturen, mehrjährige Blümmischungen, Zwischenfrüchte oder Früchte aus extensivem Anbau auf ertragsschwachen Standorten an.

Damit güllebasierte Anlagen wirtschaftlich betrieben werden können, braucht es neben der Vermarktung von Strom und Wärme auch die Förderung des Einsatzes von Gülle sowie die Unterstützung nachhaltiger und naturverträglicher Anbaubiomasse.

Zu berücksichtigen sind auch die ILUC Effekte (Indirect Land Use Change). Diese beschreiben die Auswirkungen, die durch den Anbau von Energiepflanzen indirekt entstehen können. Konkret sind vor allem die Auswirkungen von Landnutzungsumbrüchen gemeint, die ohne den gezielten Anbau von Energiepflanzen wahrscheinlich nicht stattgefunden hätten.

Konkrete Beschreibung der Instrumente und Aufzeigen des Handlungsbedarfs

Geregelt wird die Ko-Fermentation von Reststoffen sowie die Nutzung von NawaRos aktuell im Wesentlichen über EEG und das Abfallrecht aus dem sich dann die notwendigen Zulassungen für die Energie-Anlagen ableiten. Diese Instrumente setzen jedoch keine ausreichenden und zielgenauen Steuerungsanreize.

Zukünftig sollte gänzlich auf NawaRo Boni im EEG verzichtet werden, da diese Fehlanreize schaffen können und Schlupflöcher fast unumgänglich sind. Alternativ müssen Instrumente entwickelt werden, die den Einsatz von naturverträglich produzierten Biomassen sowie den Einsatz von Reststoffen regeln und honorieren. Entsprechende Förderprogramme und Vorgaben fehlen bisher.

Eine Möglichkeit für die Definition der Naturverträglichkeit wäre ein Biomasse-Siegel: Naturverträglich angebaute Biomasse, welches neben dem Genehmigungsprozess und für die Bestimmung der Förderung auch in der Kommunikation eingesetzt werden könnte und nach klaren Standards vergeben wird.

6.7. Naturschutzkompatible und flächeneffiziente Technologien fördern

Abstrakte Beschreibung der Stellschrauben

Neben der Gebäudeeffizienz, dem Ausbau von Wärmenetzen und der Steuerung biogener Energieträger im Wärmesektor unter Berücksichtigung von Naturschutzaspekten sollten auch weitere Wärmeerzeugungstechnologien aus Naturschutzsicht analysiert werden. In den folgenden Abschnitten wird diese Analyse vorgenommen und der Anpassungsbedarf bei den regulatorischen Rahmenbedingungen herausgearbeitet.

In diesem Abschnitt 6.7 werden die besonders naturschutzkompatiblen Technologien identifiziert und die entsprechenden Rahmenbedingungen entwickelt.

In Abschnitt 6.8 wird auf die räumliche Verteilung der Projektstandorte Bezug genommen. Die Raumplanung ist aus Naturschutzsicht relevant, da die Standortwahl großen Einfluss auf die Wirkung auf Natur und Landschaft nimmt.

In Abschnitt 6.9 wird dargestellt, wie bei der konkreten Ausgestaltung von Projekten Naturschutzaspekte besser berücksichtigt werden können.

Aus Naturschutzsicht ist das zukünftig eingesetzte Technologieportfolio zur Erzeugung klimaneutraler Wärme sehr relevant. In welchem Ausmaß Wärmepumpen oder synthetische Gase, Solarthermie oder Festbiomasse eingesetzt werden, entscheidet sowohl über den Flächenverbrauch für die Wärmeerzeugung als auch über die Auswirkungen auf Natur und Landschaft.

Die Auswirkung auf Fläche und Natur/Landschaft sind unmittelbar miteinander verknüpft. „Die hohe und dezentral verteilte Flächeninanspruchnahme durch erneuerbare Energien ist eine wesentliche Ursache für die vielfältigen Auswirkungen auf Natur und Landschaft.“, wird im Report Erneuerbare Energien des BfN angeführt (Bosch, Jessel, Ammermann et al. 2020). Weiter heißt es darin, dass die Fläche beim Ausbau erneuerbarer Energien, also auch erneuerbarer Wärme, „so sparsam und effizient wie möglich zu nutzen“ sei. Je größer die in Anspruch genommene Fläche zur Erzeugung einer Wärmeeinheit, desto größer sind die potenziellen Wirkungen auf Natur und Landschaft. Zudem spielen auch die Intensität der Flächennutzung und die Eingriffe in die natürlichen Ökosysteme wichtige Rollen.

Insofern sollten aus Naturschutzsicht besonders flächeneffiziente sowie naturschutzfreundliche Technologien gefördert werden. Im Gegensatz dazu sollten ineffiziente Technologien eher vermieden werden. Die biogenen Energieträger werden an anderer Stelle in den Abschnitten 6.4 und 6.5 behandelt und daher in den folgenden Abschnitten ausgeklammert.

Werden die Zwischenergebnisse aus Kapitel 5 zusammengeführt, zeigt sich, dass bzgl. der Wärmeerzeugung insbesondere folgende Technologien aus Naturschutzsicht vorteilhaft sind (vgl. Tab. 21):

- **Wärmepumpen:**
Es werden verschiedene Wärmequellen wie Oberflächengewässer, Luft, Erdwärme genutzt. Insbesondere in Abgrenzung zum weniger effizienten Einsatz von Strom zur Herstellung von synthetischen Brennstoffen oder in PtH-Anlagen sind Wärmepumpen aus Flächeneffizienz- sowie Naturschutzsicht vorteilhaft. Ein Hemmnis für Wärmepumpen sind die hohen Strombezugskosten für deren Betrieb.
- **Solarthermie:**
Anlagen können potenziell eine positive Wirkung für den Naturschutz entfalten und sind im Technologienvergleich sehr flächeneffizient. Bei der Bewertung kommt es vor allem auf die Standortwahl sowie auf die Ausgestaltung der Solarthermieanlage an. (vgl. Abschnitte 6.8 und 6.9). Ein Hemmnis für Solarthermie ist vor allem die schwierige Flächenfindung für Freiflächenanlagen.
- **Abwärme:**
Unvermeidbare Abwärme wird produziert und kann nutzbar gemacht werden, ohne dass relevante zusätzliche Flächen verbraucht werden. Hemmnisse für die Abwärmenutzung sind das räumliche und in einigen Fällen auch zeitliche Mismatch zwischen Abwärmedarbot und potenziellen Wärmesenken (Wärmenetzen), das besondere Projektrisiko (u.U. Reduktion bzw. Ausfall der Abwärmeproduktion) sowie teilweise unklare rechtliche Begriffsdefinitionen von Abwärme in den Förderbedingungen.

Diese Technologien werden bislang noch nicht in relevantem Umfang eingesetzt, dies liegt auch an den beschriebenen Hemmnissen.

Konkrete Beschreibung der Instrumente und Aufzeigen des Handlungsbedarfs

Die Bundesförderung Effiziente Wärmenetze (BEW) wird die finanziellen Rahmenbedingungen für Wärmepumpen und Solarthermieanlagen in Wärmenetzen verbessern, da neben der investiven Förderung auch betriebliche Förderungen für diese beiden Technologieoptionen vorgesehen sind. Aus naturschutzfachlicher Sicht ist diese Entwicklung positiv zu bewerten, da insbesondere für Wärmepumpen die hohen Strombezugskosten ein großes wirtschaftliches Hemmnis darstellen.

Folgende Instrumente bzw. instrumentelle Anpassungen werden darüber hinaus vorgeschlagen, um die genannten Technologien im Zuge der Wärmewende auszubauen und in breiterem Umfang zu nutzen:

- Die Reduktion bzw. Abschaffung der EEG-Umlage ist eine Anpassung, durch die der Betrieb von Wärmepumpen wirtschaftlicher wird.
- Solarthermieanlagen können sinnvollerweise mit saisonalen Wärmespeichern kombiniert werden. Insbesondere Aquiferwärmespeicher haben geringe Auswirkungen auf Fläche, Natur und Landschaft. Gerade für diesen Speichertyp sind allerdings Erkundungsbohrungen und Testzirkulationen während der Voruntersuchungen erforderlich. Auch diese sollten im Rahmen von Machbarkeitsstudien und Transformationsplänen im BEW gefördert werden.
- Die Abwärmenutzung kann gesteigert werden, indem Risikoabsicherungsmechanismen durch staatliche Bürgschaften oder Fonds geschaffen werden.
- Es bedarf einer Klarstellung, dass Abwärme in Form von Abwasser jeglicher Art (nicht nur Klärwerksabwasser, sondern auch aus Industrieprozessen) sowie gasförmige Abwärme

(Abluft, Rauchgase) als Umweltwärme deklariert und damit förderfähig ist. Dazu sind entsprechende Ergänzungen in § 3 Abs. 2 Nr. 30 GEG und in § 2 Nr. 9a KWKG erforderlich.

- Abwärmeproduzenten sollten in räumlicher Nähe zu entsprechenden Wärmesenken angesiedelt werden. Es kann beispielsweise im Zuge der Genehmigungsverfahren für neue Anlagen nach BImSchG als Bedingung inkludiert werden, dass anfallende unvermeidbare Abwärme lokal nutzbar sein muss. Auch bei stadtplanerischen Entscheidungen (Ausweisung neuer Gewerbe- und Industriegebiete) kann die Nutzbarmachung von Abwärme eine Rolle spielen, z. B. bei der Ansiedlung von Rechenzentren.
- Die Nutzung von klimaneutralen Gasen in dezentralen Verbrennungssystemen zur Erzeugung von Gebäudewärme würde den Ersatz von Erdgas im Verteilnetz mit synthetischem Methan oder Biomethan in großem Stil erforderlich machen. Langfristig müsste entweder 100 % klimaneutrales Methan eingespeist werden oder komplett auf Wasserstoff umgestellt werden. Werden aktuell beim Heizungsaustausch neue monovalente Gaskessel installiert, führt dies zu einem Lock-in und kann nachteilige Auswirkungen auf Natur, Fläche und Landschaft bewirken. Um der flächenmäßig sehr ineffizienten dezentralen klimaneutralen Gasversorgung entgegenzuwirken, sollten daher keine neuen dezentralen Gasheizungen installiert werden. Die Förderung entsprechender Anlagen im BEG sollte kritisch hinterfragt werden. Ordnungsrechtliche Vorschriften, wie beispielsweise ein Verbot des Einbaus neuer Gasheizungen ab 2026 (analog zu der Regelung für Ölheizungen) kann sinnvoll sein. Ebenso können Verbrennungsverbote als Festsetzungen in Bebauungsplänen eine Option sein, um die Installation neuer Gasheizungen zu vermeiden.

6.8. Naturschutzorientierte räumliche Verteilung und Standortwahl

Die räumliche Verteilung und die Auswahl konkreter Projektstandorte für Wärmeerzeugungsanlagen ist für deren Wirkung auf Natur, Landschaft und Fläche entscheidend. Welche Flächen oder Standorte sollen für die Anlagen genutzt werden, sodass nachteilige Auswirkungen bestmöglich vermieden werden können?

Abstrakte Beschreibung der Stellschrauben – Solarthermie

Diese Frage ist beispielsweise bei der Standortwahl für Solarthermieanlagen relevant. Aus Naturschutzsicht eignen sich insbesondere bereits versiegelte Flächen für die Installation von Solarthermieanlagen. Die Nutzung von Dachflächen ist daher aus Naturschutzsicht generell positiver zu bewerten als Freiflächenanlagen. Um große Wärmemengen solar zu erzeugen und durch Skaleneffekte günstige Wärmegegestehungskosten zu erzielen, sind jedoch Freiflächenanlagen geeigneter als Dachanlagen.

Ungeeignete Standorte für Solarthermie-Freiflächenanlagen sind Flächen mit einer hohen Bedeutung für den Naturschutz, also z. B. artenreiche Flächen und Schutzgebiete. Freiflächenanlagen können jedoch mitunter vorteilhaft wirken, wenn zuvor intensiv bewirtschaftetes Ackerland umgewidmet wird. In dem Fall findet eine Extensivierung der Flächennutzung statt. Zuvor regelmäßig gedüngte Böden können sich erholen. Werden bei der Ausgestaltung der Solarthermieanlage weitere naturschutzrelevante Faktoren berücksichtigt, können neue Lebensräume entstehen und ein Mehrwert für den Naturschutz ist erzielbar (vgl. KNE 2021a).

Konkrete Beschreibung der Instrumente und Aufzeigen des Handlungsbedarfs – Solarthermie

Für Solarthermieanlagen sind daher folgende Anpassungen aus Naturschutzsicht sinnvoll:

- Zunächst sollten Dächer für Solarthermieanlagen genutzt werden, wenn möglich. Die Einführung einer bundesweiten Solarpflicht (PV oder ST) für Neubauten, wie sie bereits in einigen Bundesländern und Kommunen existiert, ist daher sinnvoll. Bei Bestandsgebäuden

ist die Installation von Aufdach-Solarthermieanlagen häufig schwieriger, da z. B. im Vergleich zu PV-Anlagen höhere statische Lasten anfallen.

- Die Multicodierung von Flächen in Form von aufgeständerten Solarthermieanlagen (z. B. für Parkplatzüberdachungen) ist vergleichsweise teuer, da Gerüste mit Leckage-Sicherungssystemen errichtet werden müssen. Um diese aus Naturschutzsicht vorteilhafte Multicodierungs-Konzepte zu ermöglichen, könnten speziell angepasste höhere Fördersätze für entsprechende Systeme angeboten werden.
- Für Freiflächenanlagen sind die Raumordnung und das Planungsrecht wichtige Faktoren. Die Raumordnungspläne bzw. -programme der verschiedenen Bundesländer sehen teilweise unterschiedliche Anforderungen an die Standorte von Solarfreiflächenanlagen vor. In vielen Programmen werden jedoch landwirtschaftlich genutzte Flächen als Standorte für Solar-FFA kategorisch ausgeschlossen. Vor dem Hintergrund, dass die Nutzung von Industrie- und Gewerbeflächen aus Kostengründen selten infrage kommt, sind jedoch Landwirtschaftsflächen häufig die einzige realistische Alternative. Aus Naturschutzsicht ist die Umwidmung von intensiv bewirtschafteten Ackerflächen in Dauergrünland mit Solar-FFA vorteilhaft, denn es kommt nur zu einer punktuellen Versiegelung und zu einer Extensivierung der Nutzung. Daher sollte die Raumordnung explizit (als weiteres „Positiv-Kriterium“ für Solarthermie) hervorheben, dass neben Konversionsflächen, bereits versiegelten Flächen, Altdeponien und entlang von Infrastrukturachsen auch intensiv bewirtschaftete Ackerflächen mit geringer Bodenschutzwürdigkeit und geringer Bedeutung für Natur und Landschaft für die solare Nutzung geeignet sind.

Erste Schritte in diese Richtung gehen beispielsweise Baden-Württemberg mit der Freiflächenöffnungsverordnung (FFÖ-VO 2017, s. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2021)) für PV-FFA und Mecklenburg-Vorpommern mit dem beschlossenen Antrag „Potenziale der Photovoltaik heben – Nutzung auf Ackerflächen ermöglichen“ (Enhardt, S. 2021). Der Grundgedanke ist, dass mehr Flächen für den Ausbau der PV benötigt werden und dass dafür auch Ackerflächen genutzt werden sollen. Wenn Ackerflächen oder Grünlandflächen in „benachteiligten Gebieten“ (BW FFÖ-VO; vgl. Abb. 49) liegen bzw. Ackerflächen max. 40 Bodenpunkte haben (M-V), können dort Freiflächenanlagen errichtet werden.

Bei der Identifikation und Freigabe der Flächen für Solaranlagen sollten jedoch neben der landwirtschaftlichen Ertragsfähigkeit, welche durch die Berücksichtigung der Bodenpunkte Ausdruck findet, auch Belange des Natur- und Landschaftsschutzes einfließen. Es sollten daher Bewertungskriterien für die Intensität der Bewirtschaftung gefunden werden, die es erlauben, aus Naturschutzsicht zu beurteilen, ob die Umwandlung der Ackerfläche in eine Grünfläche mit Solaranlage naturschutzfachliche Vorteile birgt.

Es wird neben der Anpassung dieser Verordnungen auch deren Öffnung für Solarthermie angeraten. Zudem sollten auch in anderen Bundesländern Ackerflächen, die aus naturschutzfachlicher und landschaftlicher Sicht unbedeutend sind, für die Errichtung von Solarthermie-Freiflächenanlagen nutzbar sein.

Weiterhin ist zu prüfen, ob die Extensivierung von landwirtschaftlichen Nutzflächen durch die Umwandlung in Grünlandflächen mit naturschutzfachlich vorteilhaft umgesetzten Solarthermieanlagen (vgl. 6.9) oder durch ähnliche Verbesserungen für Natur und Landschaft durch die Errichtung einer Solarthermieanlage als Kompensationsmaßnahme (Ersatzmaßnahme nach § 15 Abs. 2 Satz 1 BNatSchG) geltend gemacht werden kann. Dies würde u.U. eine naturschutzfreundliche Ausgestaltung der Anlagen (vgl. 6.9) anreizen und die schwierig Flächenfindung in den Kommunen erleichtern.

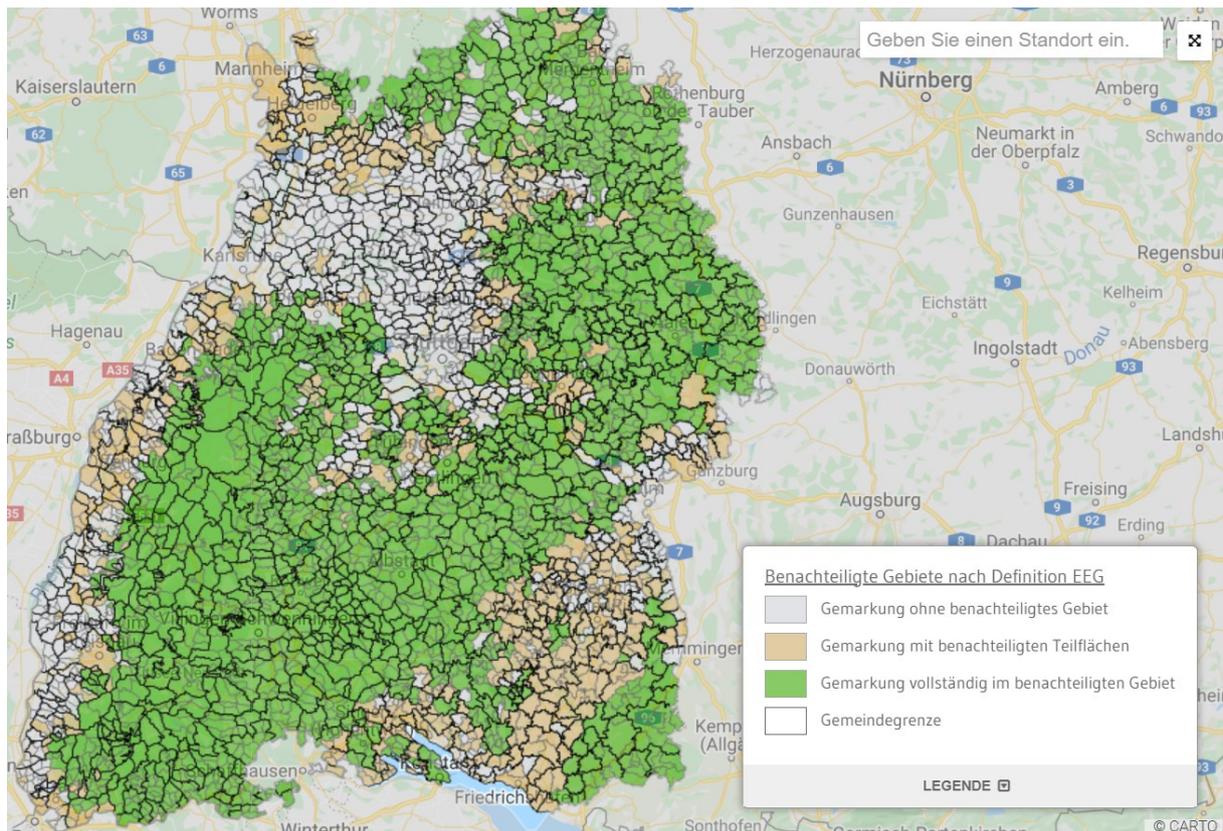


Abb. 49: Kennzeichnung der benachteiligten Gebiete in Baden-Württemberg. Quelle: Energieatlas BW (<https://www.energieatlas-bw.de/sonne/freiflaechen/benachteiligte-gebiete-in-baden-wuerttemberg>)

Abstrakte Beschreibung der Stellschrauben – Großwärmepumpen

Bei Wärmepumpen könnte eine übergreifende Standortplanung bzw. Potenzialanalyse insbesondere für Oberflächengewässer-Wärmepumpen und ggf. für Erdsonden-Wärmepumpen sinnvoll sein.

Werden Oberflächengewässer mittels Wärmepumpen genutzt, um Nutzwärme zu erzeugen, so wird dem Gewässer Wärme entzogen. Auch die Kühlung von Gebäuden mittels Wärmepumpen, die Gewässer nutzen, ist möglich – dann würde dem Gewässer Wärme zugeführt. Dies ist jedoch in Deutschland ein eher seltener Anwendungsfall. Da Gewässerwärmepumpen demnach in den meisten Fällen Wärme entziehen, ergeben sich folgende Anforderungen aus naturschutzfachlicher Sicht.

Zum einen stellt die Abkühlung von Gewässern eine ökologische Veränderung dar. Für Gewässerwärmepumpen werden in Genehmigungsverfahren zulässige Temperaturdifferenzen für die maximal zulässige Abkühlung festgelegt. In den meisten Fällen übertrifft das entziehbare Wärmepotenzial die Nachfrage um ein Vielfaches. Werden jedoch viele Wärmepumpen mit großen Leistungen installiert, kann dies zu einer Abkühlung des Gewässers führen, selbst wenn jede Wärmepumpe für sich genommen die Anforderungen erfüllt. Dies könnte insbesondere für kleinere Seen mit einer potenziell hohen Wärmenachfrage relevant sein, während Flüsse und Küstengewässer durch den Wasseraustausch weniger betroffen sind.

Zum anderen stellt der Abkühlungseffekt eine Möglichkeit dar, die zunehmende Erwärmung der Oberflächengewässer und die mit der thermischen Belastung einhergehenden ungünstigen Veränderungen auszugleichen. Wie beispielhaft in Abb. 50 erkennbar ist, übersteigt zudem der Wärmeeintrag in Gewässer den Wärmeentzug derzeit um ein Vielfaches. Kraftwerkprozesse nutzen Fluss- oder Seewasserkühlung für die Kondensation ihres Arbeitsmediums.

In regionale raumplanerische Überlegungen könnte also auch einfließen, an welchen Standorten eine Abkühlung des Gewässers aus naturschutz- und umwelttechnischer Sicht günstig wäre. Inwiefern Groß-Wärmepumpen an Oberflächengewässern tatsächlich als Anpassungsmaßnahme einen Beitrag leisten können, bleibt zu untersuchen.

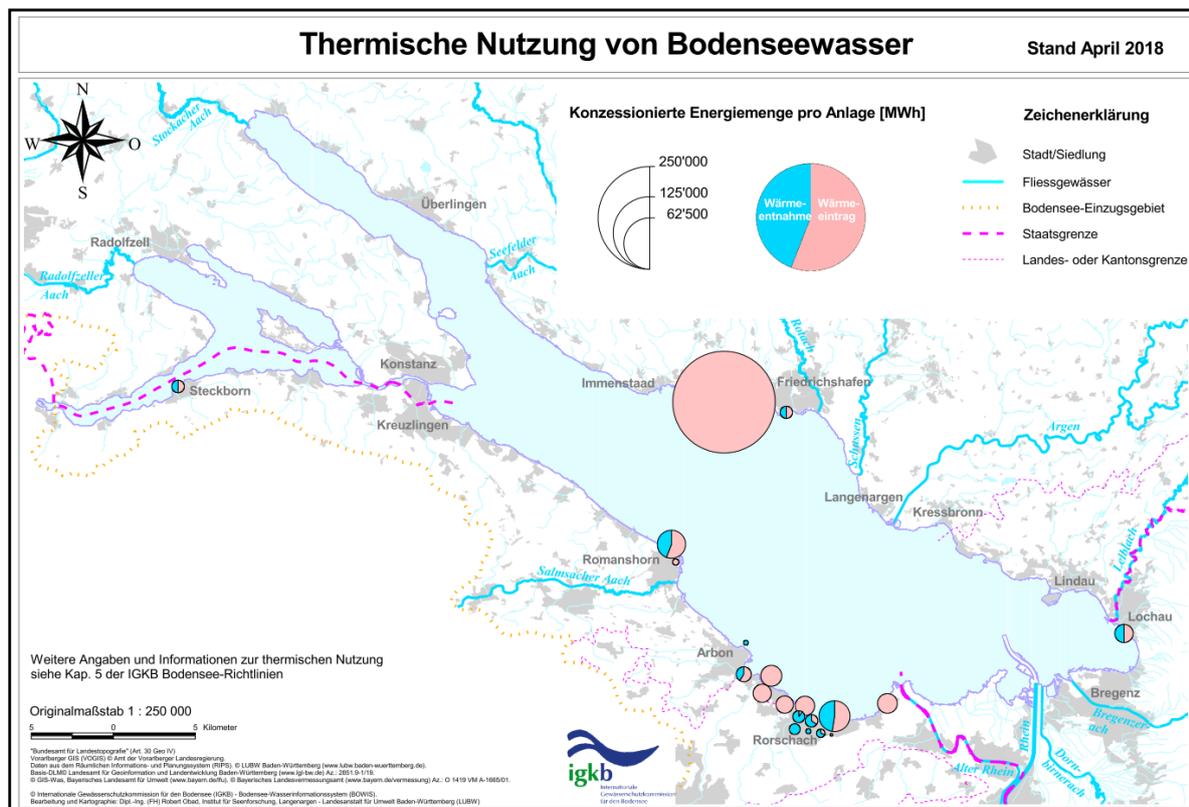


Abb. 50: Thermische Nutzung von Bodenseewasser, Planungskarte. Quelle: IGKB (2018)

Konkrete Beschreibung der Instrumente und Aufzeigen des Handlungsbedarfs – Großwärmepumpen

Nach dem Vorbild der Planung für die thermische Gewässernutzung des Bodensees (IGKB 2014) sollten für Seen mit hohen Wärmenachfragepotenzialen übergreifende räumliche Strategien zur Wärmeentnahme entwickelt werden. Zudem sollten genehmigte Wärmepumpen in Betrieb in einem zentralen Register für den jeweiligen See geführt werden. Auf diese Weise können die summierten Abkühlungseffekte berücksichtigt werden (Gaudard et al. 2019). Zudem kann in die Planung einfließen, an welchen Stellen im Gewässer ein Teilstrom problemlos zu entnehmen und wieder einzuleiten ist. Im Rahmen der kommunalen Wärmeplanung und bei der Erstellung von Transformationsplänen und Machbarkeitsstudien kann hierauf Bezug genommen werden.

Neben der thermischen Wirkung sollten bei der Standortwahl für Gewässer-Wärmepumpen auch weitere Faktoren berücksichtigt werden. Es sind die aus Naturschutzsicht geeigneten Stellen für die Teilstromentnahme und -wiedereinleitung zu wählen. Entsprechende Überlegungen sollten bereits im Rahmen der kommunalen Wärmeplanung und von Transformationsplänen beachtet werden.

Es ist daher sinnvoll, regionale bzw. gewässerbezogene räumliche Pläne zu erstellen, um die Wärme- und Kälteeinträge sowie mögliche Schnittpunktstellen für die Wassernutzung in den Gewässern zu verorten. Die thermische Plankarte des Bodensees sowie bereits im Rahmen der Genehmigung von Kraftwerken erstellte Wärmelastpläne für Gewässer können als erste

Anschauung dafür dienen. Eine detailliertere Planung der thermischen Nutzung des Bodensees wird durch die Machbarkeitsstudie zur thermischen Nutzung von Bodensee und Rhein durch das Kanton Thurgau ab Oktober 2021 verfügbar sein (Kanton Thurgau 2021). In dieser Studie wird das Potenzial des Binnensees unter Berücksichtigung technischer, naturschutzfachlicher und gewässerökologischer Bedingungen wie beispielsweise die Vermeidung von Fisch-Schongebieten bestimmt. Eine detaillierte räumliche Planung unter Berücksichtigung von Naturschutzaspekten vereinfacht, standardisiert und plausibilisiert nachfolgende Genehmigungsverfahren. Es ist anzuraten, insbesondere für relevante Gewässer (d. h. große Gewässer mit hoher anliegender Wärmenachfrage) räumliche Machbarkeitsstudien und Planungen durchzuführen.

Oberflächennahe Geothermie (Erdwärmesonden) und Aquiferwärmespeicher haben ebenfalls Auswirkungen auf die Natur. Die Auswirkungen von erdgekoppelten Wärmepumpensystemen und Aquiferwärmespeichern auf die Umwelt (z. B. mikrobielle Gemeinschaften im Aquiferwärmespeicher, Grundwasserfauna, etc.) werden derzeit in einem Forschungsprojekt des UBA mit dem Titel „Umweltwirkungen und umweltverträglicher Ausbau der oberflächennahen Geothermie“ untersucht (aktuell noch keine Veröffentlichung). Auch die räumliche Planung der thermischen Bewirtschaftung des Untergrundes wird erforderlich, wenn dieser zunehmend als Wärmequelle oder -speichermedium genutzt wird. Dies liegt auch darin begründet, dass eine thermische „Überbuchung“ der Ressource Untergrund zu einem übermäßigen Wärmeentzug und geringeren Wärmeerträgen führen kann. Es kann sinnvoll sein, die thermische Bewirtschaftung des Untergrundes mit der kommunalen Wärmeplanung zu verzahnen. Dies sollte jedoch nicht zu einer relevanten zeitlichen Verzögerung der kommunalen Wärmeplanung führen.

6.9. Naturschutzorientierte Ausgestaltung von Wärmeerzeugungsanlagen

Abstrakte Beschreibung der Stellschraube

Neben der Auswahl der Technologie zur erneuerbaren Wärmeerzeugung und der Standortwahl im Sinne der Naturverträglichkeit gibt es weiteren Spielraum, um Naturschutz und EE-Wärme zu vereinen und Synergieeffekte zu erzielen. Wird an einem konkreten Standort die Anlage geplant, errichtet und betrieben, sollten dabei wichtige Naturschutzaspekte berücksichtigt werden. Um die Identifikation sowie die Umsetzung und Einhaltung dieser projektbezogenen Elemente sicherzustellen, sind instrumentelle Änderungen einzuleiten.

Jede Technologie und jede spezifische Anlage kann mehr oder weniger naturschutzorientiert ausgestaltet werden. Welche Gestaltungsmöglichkeiten bestehen innerhalb konkreter Projekte? Wie kann deren breite Implementierung umgesetzt werden? Das Ziel aus Naturschutzsicht sollte sein, dass naturverträgliche Anlagen zum Standard werden, anstatt einzelne Leuchtturmprojekte zu initiieren.

Von den in Abschnitt 6.7 vorgestellten naturschutzkompatiblen Technologien wird der Fokus hier auf die Solarthermie und Oberflächengewässer-Wärmepumpen gelegt. Bei diesen Technologien besteht das Potenzial, Anlagen so auszugestalten, dass Natur und Landschaft nur minimal beeinträchtigt werden. In einigen Fällen sind sogar Synergien mit dem Naturschutz möglich: der erforderliche Eingriff in die Natur zur Errichtung der Anlage kann zum Anlass genommen werden, Naturschutzmaßnahmen durchzuführen. Auch für die übrigen Technologien lässt sich eine naturverträgliche Ausgestaltung vor allem durch die Etablierung der Standards in Form von Förderbedingungen, durch angepasste Vorschriften bei Genehmigungsverfahren oder durch Planungsleitfäden stärken.

Konkrete Beschreibung der Instrumente und Aufzeigen des Handlungsbedarfs

Solar-Freiflächenanlagen

Für Solar-Freiflächenanlagen gibt es bereits Erkenntnisse, welche Elemente zur Naturverträglichkeit beitragen (vgl. Abschnitt 5.1.6). Der NABU veröffentlichte ein Standpunktpapier, in dem Kriterien für Solarparks zusammengetragen werden (NABU 2010). Die für Photovoltaik formulierten Kriterien lassen sich vielfach auf solarthermische Freiflächenanlagen übertragen. Folgende Gestaltungsmöglichkeiten werden darin empfohlen:

- Querungsmöglichkeiten für Großsäuger (Korridore) vorsehen
- Durchlässigkeit der Umzäunung für Kleinsäuger und Amphibien (Bodenabstand oder ausreichende Maschengröße in Bodennähe sowie Verzicht auf den Einsatz von Stacheldraht insbesondere im bodennahen Bereich)
- Gesamt-Versiegelungsgrad geringhalten (inkl. aller Gebäudeteile sollten nicht über 5 % der Fläche versiegelt sein; Entsiegelungen können angerechnet werden)
- Die Tiefe der Modulreihen sollte maximal 5 Meter betragen – ab 3 Metern sollte innerhalb der Modulreihen ein Regenwasserabfluss mit ortsnaher Versickerung vorgesehen werden. „Standortbezogen kann sich in diesem Zusammenhang die Anlage eines Feuchtbiotops anbieten. Für nachgeführte Anlagen gelten die vorgenannten Einschränkungen nicht.“ (NABU 2010)
- Extensiven Bewuchs unter Kollektoren vorsehen
- Breite Grünstreifen um die Anlage schaffen, z. B. heimischer Heckenbewuchs
- Wahl der Pflanzen: Berücksichtigung lokaler Faktoren (heimische Pflanzenarten bevorzugen)
- Ggf. Offenbereiche innerhalb der Anlage vorhalten (Hintergrund: Während der Randbereich von FFA sich zu einem Lebensraum für einzelne Arten entwickelt, hat der mittlere Bereich von Anlagen einen eher geringen Wert als Lebensraum)
- Im Betrieb extensive Pflege durch Beweidung oder Mahd
- Neben Pflege: Monitoring, Zertifizierung durch Dritte erforderlich

Ebenfalls existiert ein weiterführender, noch umfangreicherer Leitfaden des KNE (KNE 2021b) zu dem Thema.

Bei Genehmigungsverfahren für FFA wird geprüft, ob der gewählte Standort aus Naturschutzsicht zulässig ist.

Als Weiterentwicklung des regulatorischen Rahmens wird vorgeschlagen, dass bei erteilten Genehmigungen standardmäßig naturschutzfachliche Auflagen verordnet werden. Ist die Einführung von bundesweit geltenden Naturschutzauflagen für Freiflächenanlagen nicht umsetzbar, können alternativ die Förderbedingungen für Solarthermieanlagen angepasst und um die beschriebenen Aspekte ergänzt werden. So wird auch im Fall von ausbleibenden bzw. geringen Naturschutzauflagen im Zuge der Genehmigung sichergestellt, dass die Anlagen entsprechend naturschutzkompatibel ausgestaltet sind und sich eine positive Wirkung für den Naturschutz ergibt.

In die bestehenden Förderprogramme für Solarthermieanlagen sollten daher die beschriebenen Faktoren bzw. eine Auswahl der wichtigsten und geeigneten Faktoren als Förderbedingungen aufgenommen werden. Insbesondere für die zukünftige Förderung investiver sowie betrieblicher Art für Solarthermie, die in der neuen Bundesförderung Effiziente Wärmenetze vorgesehen ist, sollten entsprechende Bedingungen aufgenommen werden und zusätzliche Investitionen zur Erfüllung der Kriterien sollten als Fördertatbestände aufgenommen werden. Dafür müssen quantifizierbare bzw. überprüfbare Kriterien aufgestellt werden. Denkbar ist beispielsweise die Aufnahme folgender Regelungen:

- Falls eine Umzäunung erforderlich ist, soll eine für Kleinsäuger und Amphibien durchlässige Umzäunung vorgesehen werden.
- Bei Freiflächenanlagen muss ein bewachsener Randstreifen vorgesehen werden. Die Breite des Grünstreifens sollte sich nach der Größe der Gesamtanlage richten und erst ab einer gewissen Anlagengröße verpflichtend sein. Ein Zwei-Meter breiter Randstreifen für eine Solaranlage mit 3 Hektar Grundfläche würde unter 5 % der Gesamtfläche einnehmen.
- Für nicht nachgeführte Anlagen sollte die Tiefe der Kollektoranlagen den o.g. Bedingungen genügen oder es sollten entsprechende Regenwasserabflüsse vorgesehen werden.
- Unter den Kollektoren muss eine Bepflanzung bzw. Aussaat, beispielsweise mit Magerwiese, vorgesehen werden.

Insbesondere für sehr große Freiflächenanlagen sind die Barrierewirkung und die weiteren Auswirkungen auf den Naturschutz zu untersuchen. Gerade bei großflächigen, zusammenhängenden Freiflächenanlagen kann es aus Naturschutzsicht sinnvoll sein, ganze Korridore freizuhalten und von einer Umzäunung dieser abzusehen, um die Durchlässigkeit für mittlere und große Säugetiere zu ermöglichen.

Wärmepumpen

Die Ausgestaltung von Wärmepumpen unter Berücksichtigung von Naturschutzaspekten ist bislang gerade für Oberflächengewässer-Wärmepumpen in geringerem Ausmaß erforscht, als dies für Solarfreiflächenanlagen der Fall ist. Für Solarthermie-Freiflächenanlagen besteht aufgrund der Vorarbeiten zu PV-Freiflächenanlagen bereits eine größere Wissensbasis.

Es gibt jedoch Ansätze, um die Naturverträglichkeit dieser Wärmepumpen zu verbessern. Das Ziel dieser Ansätze ist stets, die Schnittstelle zwischen Wärmepumpe und Gewässer zu optimieren, sodass die gewässerökologischen Auswirkungen minimiert werden.

Hierfür sollten zunächst indirekte Wärmeübertragungssysteme anstelle von direkten Systemen verwendet werden (vgl. Abb. 51). Während bei direkten Systemen das Oberflächenwasser die Wärme im Wärmetauscher direkt an das Arbeitsmedium der Wärmepumpe (natürliches oder synthetisches Kältemittel) abgibt, ist bei indirekter Wärmeübertragung ein Zwischenkreislauf dazugeschaltet. An diesen Wasserkreislauf wird die Gewässerwärme übertragen, und dann erst an den Kältemittelkreislauf. Im Falle einer Leckage gelangt das Kältemittel somit in den Zwischenkreislauf anstatt in das Gewässer. Auch wenn durch die Verwendung eines Zwischenkreislaufs die Effizienz der Wärmeübertragung verringert wird, sollte in jedem Fall ein indirektes System installiert werden, um stoffliche Einträge ins Gewässer durch Leckagen zu vermeiden. Zudem sollten Leckage-Warnsysteme installiert werden.

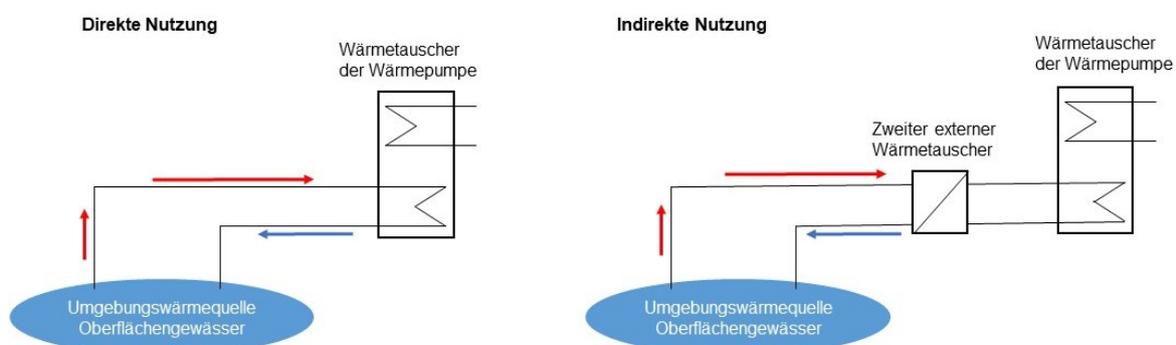


Abb. 51: Vergleich des direkten Systems mit einem indirekten System. Quelle: Hamburg Institut.

Die Entnahme von Wasser erfolgt optimalerweise unterirdisch durch Bohrungen. In der Schweiz wird dies bereits vielfach so umgesetzt, vorrangig aufgrund geringerer Risiken gegenüber einer oberirdischen Entnahme und mittlerweile weniger teuren Bohrkosten. Die unterirdische Wasserentnahme entlastet zudem sensible Uferbereiche, die Lebensräume für viele Tierarten darstellen können.

Weiterhin bestehen zahlreiche andere Ansätze, um die Naturverträglichkeit der Wasserentnahme- und Wiedereinleitung zu erhöhen. Zur Wiederherstellung der Durchflussmorphologie können Jet-Aufsätze verwendet werden. Fisch-Scheuchanlagen sowie Filteranlagen, die mittels schonenden Back-Flushing gereinigt werden, sorgen dafür, dass Lebewesen nicht nachteilig beeinflusst werden.

Bislang liegen noch wenig Informationen dazu vor, inwieweit Fischlarven, Plankton und andere Kleinstlebewesen durch Wärmetauscher geschädigt werden und wie groß der dadurch entstehende Einfluss auf das Ökosystem Gewässer ist. Auch hier besteht also Forschungsbedarf. Forschungsprojekt, in dem die Auswirkungen von Gewässer-Wärmepumpen auf den Naturschutz detailliert empirisch untersucht werden, sind erforderlich.

Zugleich sorgt die Entwicklung und Verbesserung verschiedener Wärmepumpentechnologien für höhere Effizienzen, dies ist auch im Sinne des Naturschutzes vorteilhaft (geringerer Einsatz von Strom). Es ist daher immer vorteilhaft, effiziente Anlagen mit hohen JAZ einzusetzen.

Bei Oberflächengewässer-Wärmepumpen werden bislang keine allgemeingültigen Standards bei den Genehmigungsverfahren angewendet. Stattdessen werden bei den lokalen Behörden Kriterien entwickelt. Je nach Standort können also verschiedene naturschutzfachliche Kriterien aufgestellt werden, die bei der Planung und Genehmigung der Anlage beachtet werden müssen. Da es bislang noch sehr wenige Anlagen in Deutschland gibt, die Fluss-, See- oder Meerwasser zur Wärmezeugung nutzen, gibt es noch wenig Erfahrung, welche Kriterien standardmäßig Beachtung finden sollten.

Es lassen sich folgende Handlungsempfehlungen ableiten:

- Auswertung der bislang vorliegenden Genehmigungen und genehmigter Oberflächengewässer-Wärmepumpen, ggf. Sammelstelle bereits genehmigter WP zur Auswertung, Erfahrungen aus der Schweiz einbeziehen durch einen entsprechenden Austausch zum Thema Naturschutz bei Oberflächengewässer-Wärmepumpen;
- Forschung zur Auswirkung von Oberflächenwasser-Wärmepumpen auf die Natur und Entwicklung von Maßnahmen zur Verbesserung der Naturverträglichkeit;
- Entwicklung eines Leitfadens (ggf. inkl. Mustergenehmigung) für die Etablierung von Best-Practice;
- Definition von standardmäßigen Naturschutzvorgaben (baulicher Art) bei der Genehmigung von Oberflächengewässer-Wärmepumpen, die als Bedingung für die Genehmigung gelten.

7. Forschungsbedarf

Zur Entwicklung der Wärme- und Kältebereitstellung in Deutschland bis 2050 (Kapitel 4):

Für die Prognose des Wärmesektors liegen zahlreiche Studien vor, in denen die Zielszenarien Klimaneutralität modelliert und nach volkswirtschaftlichen Kriterien optimiert werden. Es bedarf jedoch eines umfänglichen aktualisierten Szenarios, welches basierend auf den regulatorischen Ausgangsbedingungen die Entwicklungen bis 2030 und 2050 untersucht. Das letzte entsprechende Szenario (Prognos AG, Fraunhofer ISI, GWS, IINAS 2020) berücksichtigte die Maßnahmen des Klimaschutzprogramms 2030. Es ist eine Aktualisierung der Szenarien bzw. Studien im Hinblick auf neue Klimaschutzziele und veränderte politische Rahmenbedingungen erforderlich.

Zur Auswirkung der Technologien, Effizienzmaßnahmen und Infrastrukturen im Wärmesektor auf Natur, Landschaft und Fläche (Kapitel 5):

Die Auswirkungen von Oberflächengewässer-Wärmepumpen auf die Natur (Gewässerökologie, Kleinstlebewesen in Gewässern, etc.) sind bislang noch nicht umfänglich untersucht worden. Es werden empirische Untersuchungen vorgeschlagen. Darauf basierend sollten Maßnahmen zur Verbesserung der Naturverträglichkeit dieser Wärmepumpen entwickelt werden.

Die Auswirkung von Freiflächen-Solarthermieanlagen auf die Natur ist nicht hinreichend empirisch untersucht. Insbesondere für sehr große Freiflächenanlagen sollten entsprechende Untersuchungen durchgeführt werden, welche die Barrierewirkung dieser Anlagen für Tiere, die Auswirkung auf deren Lebensräume und die Auswirkungen auf das Ökosystem des jeweiligen Standortes untersuchen.

Die Auswirkungen von erdgekoppelten Wärmepumpensystemen und Aquiferwärmespeichern auf die Umwelt (z. B. mikrobielle Gemeinschaften im Aquiferwärmespeicher, Grundwasserfauna, etc.) werden derzeit in einem Forschungsprojekt des UBA mit dem Titel „Umweltwirkungen und umweltverträglicher Ausbau der oberflächennahen Geothermie“ untersucht (aktuell noch keine Veröffentlichung). Die Ergebnisse sollten zukünftig berücksichtigt werden.

Zur Ableitung von Stellschrauben für eine naturverträgliche Wärmewende und Handlungsempfehlungen Kapitel 6):

Es gibt Bedarf an Potenzialstudien für die Biomasseverfügbarkeit, welche Naturschutzaspekte einbeziehen. In die Analysen zur Ermittlung des Potenzials sollten die unter naturschutzfachlichen Gesichtspunkten auszuschließenden Flächen (Primärwälder, Grünflächen, Flächen mit hoher Biodiversität, Biotopverbundflächen, etc.) berücksichtigt werden.

Es bleibt zu prüfen, ob mit dem aktuell bestehenden Rechtsrahmen bereits Solarthermieanlagen in bestimmten Fällen als Ersatzmaßnahme nach § 15 Abs. 2 Satz 1 BNatSchG geltend gemacht werden können, wenn durch die Anlage positive Auswirkungen auf Natur und Landschaft ausgehen.

Quellenverzeichnis

- Abel, L. (2018): Evaluation und systematische Erfassung von Wärmepumpensystemen in Fließgewässern. (URL: https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/8626/1/BachelorThesis_LukasAbel.pdf, letzter Zugriff: 12.08.2020)
- AG Energiebilanzen (2012): Energie in Zahlen.
- AGEE-Stat (Stand 3/2020)
- Agentur für erneuerbare Energien (2020): Erneuerbare Energien 2020. Potenzialatlas Deutschland. (URL: https://www.unendlich-viel-energie.de/media/file/319.Potenzialatlas_2_Auflage_Online.pdf, letzter Zugriff: 16.11.2021)
- Agora Energiewende (2018): Gesamtkosten von synthetischem Methan.
- Agora Energiewende (2021): Das Klimaschutz-Sofortprogramm – 22 Eckpunkte für die ersten 100 Tage der neuen Bundesregierung. (URL: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_06_DE_100Tage_LP20/A-EW_229_Klimaschutz-Sofortprogramm_WEB.pdf, letzter Zugriff: 19.09.2021)
- BDEW (2015): Grundlagenpapier Primärenergiefaktoren. (URL: https://www.bdew.de/media/documents/20150422_Grundlagenpapier-Primaerenergiefaktoren.pdf, letzter Zugriff: 16.11.2021)
- BDEW (2019): Entwicklung des Wärmeverbrauchs in Deutschland. Basisdaten und Einflussfaktoren. (URL: https://www.bdew.de/media/documents/20190529_Waermeverbrauchs-analyse-Foliensatz-2019_42oo8Va.pdf, letzter Zugriff: 21.03.2020)
- BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2020): Power-to-Heat. Ein Baustein der Sektorkopplung für die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung und zur Systemintegration von Strom aus Erneuerbaren Energien. (URL: https://www.bdew.de/media/documents/Stn_20200427_Power-to-Heat.pdf, letzter Zugriff: 21.08.2020)
- BDI (2018): Klimapfade für Deutschland.
- Berry et al. (2021): Scientist Letter to Biden, Von der Leyen, Michel, Suga & Moon Regarding Forest Bioenergy (February 11, 2021) (URL: https://www.klimareporter.de/images/dokumente/2021/02/ScientistLetter_WoodBurning_2021.pdf, letzter Zugriff: 19.09.2021)
- Bettgenhäuser et al. (2011): Klimaschutz durch Reduzierung des Energiebedarfs für Gebäudekühlung. (URL: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/3979.pdf>, letzter Zugriff: 19.09.2021)
- BMJV (2006): Energiesteuergesetz (EnergieStG). (URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/energiestg/EnergieStG.pdf>, letzter Zugriff: 18.02.20)
- BMJV (2008): Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG). (URL: https://www.gesetze-im-internet.de/eew_rmeg/, letzter Zugriff: 18.02.20)
- BMJV (2011): Gesetz über den Handel mit Berechtigungen zur Emission von Treibhausgasen (TEHG). (URL: https://www.gesetze-im-internet.de/tehg_2011/TEHG.pdf, letzter Zugriff: 18.02.20)
- BMJV (2015): Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG). (URL: https://www.gesetze-im-internet.de/kwkg_2016/KWKG.pdf, letzter Zugriff: 18.02.20)

- BMJV (2019): Gesetz über einen nationalen Zertifikatehandel für Brennstoffemissionen (BEHG). (URL: <http://www.gesetze-im-internet.de/behg/BEHG.pdf>, letzter Zugriff: 18.02.20)
- BMU (2016): Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. (URL: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf, letzter Zugriff: 15.02.20)
- BMU (2019): Klimaschutzprogramm der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. (URL: <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klimamassnahmen-data.pdf?download=1>, letzter Zugriff: 21.02.20)
- BMWi (2014a): Ein gutes Stück Arbeit. Die Energie der Zukunft. Erster Fortschrittsbericht zur Energiewende. (URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/fortschrittsbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=15, letzter Zugriff: 17.02.20)
- BMWi (2014b): Ein gutes Stück Arbeit. Mehr aus Energie machen. Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz. (URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/nationaler-aktionsplan-energieeffizienz-nape.pdf?__blob=publicationFile&v=10, letzter Zugriff: 17.02.20)
- BMWi (2015): Energieeffizienzstrategie Gebäude. Wege zu einem nahezu klimaneutralen Gebäudebestand. (URL: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/energieeffizienzstrategie-gebäude-2015.pdf%3F__blob%3Dpublication-File%26v%3D3, letzter Zugriff: 17.02.20)
- BMWi (2017): Zweiter Fortschrittsbericht zur Energiewende. Die Energie der Zukunft. Berichtsjahr 2017. (URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/fortschrittsbericht-monitoring-energiewende.pdf?__blob=publicationFile&v=26, letzter Zugriff: 17.02.20)
- BMWi (2018): Richtlinie für die Förderung der Energieeffizienz und Prozesswärme aus Erneuerbaren Energien in der Wirtschaft – Zuschuss und Kredit, (URL: <https://www.bundesanzeiger.de/pub/de/amtliche-veroeffentlichung?1>, letzter Zugriff: 31.8.2021)
- BMWi (2020): Integrierter Nationaler Energie- und Klimaplan (NCEP). (URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads//integrierter-nationaler-energie-klimaplan.pdf?__blob=publicationFile&v=8, letzter Zugriff: 31.8.2021)
- BMWi (2021): Dialog Klimaneutrale Wärme. (URL: [dialog-klimaneutrale-waerme-zielbild-bausteine-weichenstellung-2030-2050.pdf](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads//dialog-klimaneutrale-waerme-zielbild-bausteine-weichenstellung-2030-2050.pdf) (bmwi.de), letzter Zugriff: 16.02.2021)
- BMWi, BMU (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. (URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010.pdf?__blob=publicationFile&v=5, letzter Zugriff: 17.02.20)
- Boesten, S.; Ivens, W.; Dekker, S.; Eijndems, H. (2019): 5th generation district heating and cooling systems as a solution for renewable urban thermal energy supply.
- Böhmer et al. (2013): Ermittlung der Wachstumswirkungen der KfW-Programme zum Energieeffizienten Bauen und Sanieren. (URL: <https://www.kfw.de/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-alle-Evaluationen/Wachstumseffekte-EBS-Endbericht.pdf>, letzter Zugriff: 23.10.2020).
- Booth, M.; Mackey, B.; Young, V. (2020): It's time to stop pretending burning forest biomass is carbon neutral. (URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcbb.12716>, letzter Zugriff: 19.09.2021)

- Born, H., Schimpf-Willenbrik, S., Lange, H., Bussmann, G., Bracke, R. (2017): Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes - Bestandsaufnahme und Trends.
- Bosch, U.; Jessel, B.; Ammermann, K.; Balzer, S.; Böttner, S.; Erdmann, G. et al. (2020): Erneuerbare Energien Report – Die Energiewende naturverträglich gestalten! (URL: https://www.bfn.de/fileadmin/BfN/erneuerbareenergien/Dokumente/BfNERneuerbareEnergienReport2019_barrierefrei.pdf, letzter Zugriff: 21.10.2020)
- Böttcher, H.; Hennenberg, K.; Hünecke, K.; Fehrenbach, H.; Rettenmaier, N.; Bischoff, M.; Reise, J. (2020): Naturschutz und fortschrittliche Biokraftstoffe (BfN-Skript). (URL: <https://www.bfn.de/fileadmin/BfN/service/Dokumente/skripten/Skript580.pdf>, letzter Zugriff: 19.09.2021)
- Bröer, G. (2020): Solarthermieanlagen als Biotop – Solarnutzung von Flächen sollte ökologischen Mehrwert bringen. Infoblatt Solare Wärmenetze Nr. 6. (URL: <https://www.solar-district-heating.eu/de/wissensportal/wissensdatenbank/>, letzter Zugriff: 21.10.2020.)
- Bröer, G. (2020): Wie heiß ist der erneuerbare Wärmemarkt? In: Solarthemen 20.08.2020 (URL: <https://www.solarserver.de/2020/08/20/wie-heiss-ist-der-erneuerbare-waerme-markt/>, letzter Zugriff: 21.10.2020.)
- BSH (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie) (2020): Entwurf Flächenentwicklungsplan 2020 für die deutsche Nord- und Ostsee. (URL: https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Meeresfachplanung/Fortschreibung/_Anlagen/Downloads/Entwurf_FEP_2020.pdf?__blob=publicationFile&v=6, letzter Zugriff: 08.12.2020)
- Bücken, M.; Freischlad, H.; Kalunka, J. et al. (2017): Potenziale der Sektorkopplung und Nutzung von Strom aus Erneuerbaren Energien im Wärmebereich in Sachsen-Anhalt.
- BUND (2012): Land- und Forstwirtschaftliche Biomasse und Naturschutz in Baden-Württemberg. Hintergrundpapier des BUND Landesverband Baden-Württemberg e.V. (URL: https://www.bund-bawue.de/fileadmin/bawue/Dokumente/Themen/Klima_und_Energie/BUND_BW_Biomasse_und_Naturschutz_Hintergrundpapier.pdf, letzter Zugriff: 08.12.2020)
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt und Raumforschung (2016): Ökologische Baustoffwahl- Aspekte zur komplexen Planungsaufgabe „Schadstoffarmes Bauen“. (URL: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/zukunft-bauen-fp/2014-16/band-04.html>, letzter Zugriff: 23.10.2020)
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2012): Ergebnisse der Bundeswaldinventur 2012. (URL: https://www.bundeswaldinventur.de/fileadmin/SITE_MASTER/content/Downloads/BMEL_BWI_Bericht_Ergebnisse_2012_RZ02_web-4.pdf, letzter Zugriff: 18.12.2020)
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2017): Naturschutz und Bioenergie. (URL: <https://www.bmu.de/themen/natur-biologische-vielfalt-arten/naturschutz-biologische-vielfalt/naturschutz-und-energie/naturschutz-und-bioenergie/>, letzter Zugriff: 03.06.2020)
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2007): Leitfaden zur Berücksichtigung von Umweltbelangen bei der Planung von PV-FFA. Online verfügbar unter: https://www.bauberufe.eu/images/doks/pv_leitfaden.pdf, letzter Zugriff am 21.10.2020.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2019): Erneuerbare Energien in Zahlen. (URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/erneuerbare-energien-in-zahlen-2018.pdf?__blob=publicationFile&v=22, letzter Zugriff:21.02.2020)

- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2021): ENTWURF Förderrichtlinie BEW, Stand 16.07.2021 „Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Wärmenetze“. (URL: https://www.agfw.de/fileadmin/AGFW_News_Mediadateien/Energiewende_Politik/20210716_BEW-RL_Entwurf.pdf, letzter Zugriff: 19.09.2021)
- Bundesnetzagentur (2016): Bericht über die Flächeninanspruchnahme für Freiflächenanlagen. (URL: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/PV-Freiflaechenanlagen/Bericht_Flaecheninanspruchnahme_2016.pdf?__blob=publicationFile&v=2, letzter Zugriff: 23.10.2020)
- Bundesregierung (2019a): Energieeffizienzstrategie 2050. (URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienzstrategie-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=12, letzter Zugriff: 17.02.20)
- Bundesregierung (2019b): Entwurf eines Gesetzes zur Einführung eines Bundes-Klimaschutzgesetzes und zur Änderung weiterer Vorschriften. (URL: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Gesetze/gesetzesentwurf_bundesklimaschutzgesetz_bf.pdf, letzter Zugriff: 18.02.20)
- Bundesregierung (2020a): Die Nationale Wasserstoffstrategie. (URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=16, letzter Zugriff: 03.08.20)
- Bundesregierung (2020b): Gesetz zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechts für Gebäude und zur Änderung weiterer Gesetze. (Gebäudeenergiegesetz–GEG)
- Bundesregierung (2021): Referentenentwurf der Bundesregierung Verordnung zur Neufassung der Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung und der Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung. (URL: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Glaeserne_Gesetze/19._Lp/biomasse_biokraft_vo/Entwurf/biomasse_biokraft_vo_refe_bf.pdf, letzter Zugriff: 19.09.2021)
- Bundesverband neue Energiewirtschaft e.V. (2019): Solarparks – Gewinne für die Biodiversität. (URL: https://www.bne-online.de/fileadmin/bne/Dokumente/20191119_bne_Studie_Solarparks_Gewinne_fuer_die_Biodiversitaet_online.pdf, letzter Zugriff: 21.10.2020)
- Bürger, V.; Hesse, T.; Palzer, A. et al. (2017): Klimaneutraler Gebäudebestand 2050. Energieeffizienzpotenziale und die Auswirkungen des Klimawandels auf den Gebäudebestand. (URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-11-06_climate-change_26-2017_klimaneutraler-gebaeudebestand-ii.pdf, letzter Zugriff: 07.10.2020)
- Christidis, A.; Mollenhauer, E.; Tsatsaronis, G.; Schuchardt, G.; Holler, S.; Böttger, D.; Bruckner, T. (2017): EnEff-Wärme: Einsatz von Wärmespeichern und EnEff-Wärme: Einsatz von Wärmespeichern und Power-to-Heat-Anlagen in der Fernwärmeerzeugung. Hg. v. Technische Universität Berlin.
- Daniel-Gromke, J.; Rensberg, N.; Denysenko, V. et al. (2020): Optionen für Biogas-Bestandsanlagen bis 2030 aus ökonomischer und energiewirtschaftlicher Sicht. (URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-01-30_texte_24-2020_biogas2030.pdf, letzter Zugriff: 09.10.2020)
- DBFZ (2019): Wärmenutzung von Biogasanlagen. (URL: https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/DBFZ_Reports/DBFZ_Report_32.pdf, letzter Zugriff: 23.10.2020)

- Gromke, J. (2017): Anlagenbestand Biogas und Biomethan – Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland (DBFZ Report Nr. 30). (URL: https://www.researchgate.net/profile/Jaque-line_Daniel-gromke/publication/323561241_Anlagenbestand_Biogas_und_Biomethan_-_Biogaserzeugung_und_-nutzung_in_Deutschland_DBFZ_Report_Nr_30/links/5a9db1cca6fdccff6d1a1779/Anlagenbestand-Biogas-und-Biomethan-Biogaserzeugung-und-nutzung-in-Deutschland-DBFZ-Report-Nr-30.pdf?_sg%5B0%5D=DDn4QZfkZ4X2XWKDMWuJhyvXpCBRh1KrCunKSR04rW5k44VNspTXsC2bat5d9UrDEkvh-aT0Sw2sJLyTNlgtww.x1G9V9Ebk4XH79BxY7nA5Sp6C86G-X2WreEO3wyM-K1XrioCIAtiz-ULx1DkSu_ZW-GODMYVwm31emjOM1i5GQ&_sg%5B1%5D=bQz5x1B9IBZm-pOriSajege7U4UGzEWXzKVHnXOa6yy5MTck2_S8wPYx1JxH-U2YjrvP6mbCWNMRM1d-h_8IBlbzNjg0Gh6LRErm-PzZzn2P0k.x1G9V9Ebk4XH79BxY7nA5Sp6C86G-X2WreEO3wyM-K1XrioCIAtiz-ULx1DkSu_ZW-GODMYVwm31emjOM1i5GQ&_iepl=, letzter Zugriff: 18.12.2020)
- DBFZ, UFZ, Öko-Institut, IINAS (2015): Meilensteine 2030. Elemente und Meilensteine für die Entwicklung einer tragfähigen und nachhaltigen Bioenergiestrategie. (URL: https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/Studien/18_MS2030_final_max.pdf, letzter Zugriff: 23.04.2020)
- Degenhart, H.; Holstenkamp, L.; Kohrs, A.; Neidig, P.; Opel, O.; Schomerus, T.; Strodel, N. et al. (2019): Entwicklung der Einsatzfelder für mitteltiefe Aquiferwärmespeicher in Norddeutschland unter wirtschaftlich/finanziellen, geologisch/technischen, umweltchemischen und rechtlich/förderpolitischen Aspekten.
- Demuth, B.; Schumacher, J. (2019): Klima- und Naturschutz: Hand in Hand. Heft 2: Fassadendämmung – Klima- und Naturschutz am Gebäude. (URL: https://www.landschaft.tu-berlin.de/fileadmin/fg218/Publikationen/Hefte_Energiekonzepte/KlimaNatSch_Handbuch_H2_Fassaden.pdf, letzter Zugriff: 22.10.2020)
- Demuth, M.; Maack, A.; Schumacher, J. (2019): Klima- und Naturschutz: Hand in Hand. Heft 6: Photovoltaik-Freiflächenanlagen. (URL: https://www.landschaft.tu-berlin.de/fileadmin/fg218/Publikationen/Hefte_Energiekonzepte/KlimaNatSch_Handbuch_H6_FreiPV.pdf, letzter Zugriff: 21.10.2020)
- dena (2021): Begrenzte Umlage der BEHG-Kosten - Investitionsanreize stärken. dena-Positionspapier. (URL: [dena-POSITIONSPAPIER_Begrenzte_Umlage_der_BEHG-Kosten_-_Investitionsanreize_staerken.pdf](https://www.dena.de/SharedDocs/positionspapier/DE/Positionspapier/Begrenzte_Umlage_der_BEHG-Kosten_-_Investitionsanreize_staerken.pdf), letzter Zugriff: 16.03.2021)
- DENEFF (2020): Stellungnahme der Deutschen Unternehmensinitiative Energieeffizienz e. V. zum BMU-Eckpunktepapier zum BMU/BMJV/BMF-Eckpunktepapier zur Begrenzung der Umlagefähigkeit der CO₂-Bepreisung im Gebäudesektor.
- Deutsch, M.; Buck, M.; Graichen, P.; Vornholz, F. (2018): Die Kosten von unterlassenem Klimaschutz für den Bundeshaushalt. Die Klimaschutzverpflichtungen Deutschlands bei Verkehr, Gebäuden und Landwirtschaft nach der EU-Effort-Sharing-Entscheidung und der EU-Climate-Action-Verordnung. (URL: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2018/Non-ETS/142_Nicht-ETS-Papier_WEB.pdf, letzter Zugriff: 26.03.2020)
- Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) im Umweltbundesamt (2020): Nationales Emissionshandelssystem – Hintergrundpapier. (URL: https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/nehs/nehs-hintergrundpapier.pdf?__blob=publicationFile&v=3, letzter Zugriff: 03.08.2020)

- Deutsche Umwelthilfe (2019): Dämmen mit nachwachsenden Rohstoffen – Mehr als nur Wärmedämmung. (URL: https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Energieeffizienz/190711_D%C3%A4mmen_mit_NawaRo-Mehr_als_nur_W%C3%A4rmed%C3%A4mmung.pdf, letzter Zugriff: 19.10.2020)
- Deutsche Umwelthilfe (2020) Ökologisch und leistungsstark – Dämmen mit nachwachsenden Rohstoffen 2020
- Deutscher Bundestag (2019): Grenzwerte für Wasserstoff in der Erdgasinfrastruktur. (URL: <https://www.bundestag.de/resource/blob/646488/a89bbd41acf3b90f8a5fbfbc8616df4/WD-8-066-19-pdf-data.pdf>, letzter Zugriff: 07.10.2020)
- Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ) (2019): Technoökonomische Analyse und Transformationspfade des energetischen Biomassepotentials (TATBIO). Endbericht. (URL: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Studien/technoekonomische-analyse-und-transformationspfade-des-energetischen-biomassepotentials.pdf?__blob=publicationFile&v=4, letzter Zugriff: 03.06.2020)
- Deutsches Pelletinstitut (2017): Deutschland und der internationale Pelletmarkt. (URL: <http://backup.depi.de/media/filebase/files/infothek/DEPI-Infoblaetter/DEPI-Infoblaetter%20Internationaler%20Pelletmarkt.pdf>, letzter Zugriff: 18.06.2020)
- Döring, P.; Glasenapp, S.; Mantau, U. (2020): Energieholzverwendung in privaten Haushalten 2018. Marktvolumen und verwendete Holzsortimente. Hamburg.
- EASAC (European Academies Science Advisory Council) (2019): Forest bioenergy, carbon capture and storage, and carbon dioxide removal: an update. (URL: https://easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Negative_Carbon/EASAC_Commentary_Forest_Bioenergy_Feb_2019_FINAL.pdf, letzter Zugriff: 19.09.2021)
- Ehlerding, S. (2021): Kritik am Kohleausstieg mit Pellets. (Artikel im Tagesspiegel Background, veröffentlicht am 03.08.2021)
- Energate Messenger (06.07.2018): Teigeler: Wärmespeicher sollten nicht nur ein Topf Wasser sein. (URL: <https://www.energate-messenger.de/news/184343/teigeler-waermespeicher-sollten-nicht-nur-ein-topf-wasser-sein->, letzter Zugriff: 11.11.2021)
- Enkhardt, S. (2021): Mecklenburg-Vorpommern will 5000 Hektar Ackerland für Photovoltaik freigeben. Veröffentlicht im pv magazine Juni 2021
- EU (2018a): Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Neufassung). (URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=EN>, letzter Zugriff: 21.03.20)
- EU (2018b): Richtlinie (EU) 2018/2002 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 zur Änderung der Richtlinie 2012/27/EU zu Energieeffizienz. (URL: <https://www.clearingstelle-eeg-kwkg.de/sites/default/files/Richtlinie%20%28EU%29%202018.2002.pdf>, letzter Zugriff: 21.03.20)
- Europäische Kommission (2016): Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. An EU Strategy on Heating and Cooling. (URL: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/1_EN_ACT_part1_v14.pdf, letzter Zugriff: 21.03.2020)

- Europäische Kommission (2020): A Renovation Wave for Europe – greening our buildings, creating jobs, improving lives. (URL: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/swd_-_a_renovation_wave_for_climate_neutrality_and_recovery.pdf?fbclid=IwAR0szuaCub-HuPCL-kPab6ED6ZSSb6NaymVexXJmOR2aHhBbLB0WsXXLznGM, letzter Zugriff: 27.10.2020)
- Ewald, J.; Rothe, A.; Hansbauer, M. et al. (2017): Energiewende und Waldbiodiversität. (BfN Skript 455) (URL: https://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/rohstoffpflanzen/dateien/e-wald_bfn-skripten_455_energiewende_waldbiodiversitaet.pdf, letzter Zugriff: 11.11.2021)
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (Ifd.): Daten und Fakten – Faustzahlen. (URL: <https://biogas.fnr.de/daten-und-fakten/faustzahlen>, letzter Zugriff: 09.10.2020)
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Ifd.): Biomassepotenziale.
- Fachverband Biogas (2019): Branchenzahlen (2019)
- Fehrenbach, H.; Reißmann, D. (2020): Flächenbelegungen und Flächennutzungsänderungen in der Ökobilanzierung: Eine Methode zur Wirkungsabschätzung.
- FfE Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH (2014): Faktenblatt Power to Heat. (URL: https://www.ffegmbh.de/download/informationen/528_ihk_hessen_waerme/fb_power-to-heat.pdf, letzter Zugriff: 07.10.2020)
- Fleuchaus, Paul; Godschalk, Bas; Stober, Ingrid; Blum, Philipp (2018): Worldwide application of aquifer thermal energy storage – A review.
- FNR (2018): FNR-Jahresbericht 2017/18. (URL: https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/FNR_Jahresbericht_2017-18_Web.pdf, letzter Zugriff: 11.11.2021)
- FNR (2018b): Rohstoffmonitoring Holz – Daten und Botschaften. (URL: https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Handout_Rohstoffmonitoring_Holz_Web_neu.pdf, letzter Zugriff: 23.10.2020)
- Fraunhofer IWES (Ifd.): Windmonitor Onshore. (URL: http://windmonitor.iee.fraunhofer.de/windmonitor_de/3_Onshore/5_betriebsergebnisse/1_volllaststunden/, letzter Zugriff: 19.08.2020)
- Garthe, S.; Schwemmer, H.; Müller, S. (2018): Seetaucher in der Deutschen Bucht: Verbreitung, Bestände und Effekte von Windparks. (URL: https://www.ftz.uni-kiel.de/de/forschungsabteilungen/ecolab-oekologie-mariner-tiere/laufende-projekte/offshore-wind-energie/Seetaucher_Windparkeffekte_Ergebnisse_FTZ_BIONUM.pdf, letzter Zugriff: 16.11.2021)
- Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg (DBI) (2021): Grüne Flüssiggasversorgung: Aktueller Stand und Entwicklungsmöglichkeiten. (URL: https://www.dvfg.de/fileadmin/user_upload/downloads/studien-gutachten/DBI-Studie_Gruene_Fluessiggasversorgung.pdf, letzter Zugriff: 19.09.2021)
- Gaudard, A.; Wüest, A.; Schmid, M. (2019): Using lakes and rivers for extraction and disposal of heat: Estimate of regional potentials. (URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148118313016?via%3Dihub>, letzter Zugriff: 19.09.2021)
- Gerbert, P.; Herhold, P.; Burchardt, J. et al. (2018): Klimapfade für Deutschland. (URL: <https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-fuer-deutschland/>, letzter Zugriff: 22.03.2020)

- Gerhardt, N.; Ganal, I.; Jentsch, M. et al. (2019): Entwicklung der Gebäudewärme und Rückkopplung mit dem Energiesystem in -95 % THG-Klimazielszenarien. (URL: https://www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Veroeffentlichungen/2019/2019_Feb_Bericht_Fraunhofer_IEE_-_Transformation_Waerme_2030_2050.pdf, letzter Zugriff: 22.03.2020)
- Gerhardt, N.; Richts, C.; Hochloff, P. (2014): Power-to-Heat zu Integration von ansonsten abgeregeltem Strom aus Erneuerbaren Energien. (URL: https://www.agora-energie-wende.de/fileadmin2/Projekte/2013/power-to-heat/Agora_PtH_Langfassung_WEB.pdf, letzter Zugriff: 21.08.2020)
- Groß, B.; Zipp, A.; Guss, H. et al. (2012): Analyse und Bewertung von Instrumenten zur Markteinführung stationärer Brennstoffzellensysteme (URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/analyse-und-bewertung-von-instrumenten-zur-markteinfuehrung-stationaerer-brennstoffzellensysteme.pdf%3F__blob%3Dpublication-File%26v%3D3, letzter Zugriff: 20.10.2020)
- Günther, D., Miara, M., Langner, R. et al. (2013): WP Monitor – Feldmessung von Wärmepumpenanlagen.
- Hamburg Institut (2016): Planungs- und Genehmigungsleitfaden für Freiflächen-Solarthermie. (URL: https://www.hamburg-institut.com/images/pdf/forschungsberichte/160721_Planungsleitfaden_2%20%20Auflage.pdf, letzter Zugriff: 21.10.2020)
- Hanke, S. (2021): Kohlekraftwerke auf dem Holzweg. (Artikel im Tagesspiegel Background, veröffentlicht am 06.04.2021)
- HEATSTORE (2019): Underground Thermal Energy Storage (UTES). state of the art, example cases and lessons learned. (URL: <https://www.heatstore.eu/downloads.html>, letzter Zugriff: 07.10.2020)
- Heiland et al. (2019): Klima- und Naturschutz: Hand in Hand. Ein Handbuch für Kommunen, Regionen, Klimaschutzbeauftragte, Energie-, Stadt- und Landschaftsplanungsbüros. (URL: <https://www.natur-und-landschaft.de/de/news/handbuch-klima-und-naturschutz-hand-in-hand-erschiene-1409>, letzter Zugriff: 23.10.2020)
- Hinz, E. (2015): Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten.
- Holstenkamp, L.; Strodel, N.; Opel, O. et al. (2016): Querschnittstudie Erfolgsfaktoren für mitteltiefe Aquiferwärmespeicher in Norddeutschland. Hg. v. Deutscher Geothermie Kongress. Essen.
- ICOLD (Internationale Kommission für große Talsperren) (lfd.): Talsperren in Deutschland. (URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_Talsperren_in_Deutschland, letzter Zugriff: 08.12.2020)
- Ifeu (2019): Einsatz von Biokraftstoffen im Verkehrssektor bis 2030. (URL: https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/ifeu_Kurzstudie_Potenzialschaetzungen_fuer_Biokraftstoffe_im_Verkehrssektor.pdf, letzter Zugriff: 27.05.2020)
- ILF Consulting Engineers Austria GmbH, AIT Austrian Institute of Technology GmbH for the Joint Research Center of the European Commission (2017): Long term (2050) projections of techno-economic performance of large-scale heating and cooling in the EU. (URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC109006/kjna28859enn.pdf>, letzter Zugriff: 07.10.2020)

- Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB) (2014): Bodensee-Richtlinien 2005 (mit Änderung des Kapitels 5 vom 13.05.2014). (URL: https://www.igkb.org/fileadmin/user_upload/dokumente/die_igkb/Bodensee-Richtlinien_2005_2015.pdf, letzter Zugriff: 19.09.2021)
- IGKB (2018): Thermische Nutzung von Bodenseewasser. (URL: https://www.igkb.org/fileadmin/user_upload/dokumente/bowis/Karte_Thermische_Nutzung_Bodenseewasser_2018.pdf, letzter Zugriff: 19.09.2021)
- Jordan, M; Lenz, V.; Millinger, M. et al. (2019): Future competitive bioenergy technologies in the German heat sector: Findings from an economic optimization approach. (URL: https://www.researchgate.net/publication/335441977_Future_competitive_bioenergy_technologies_in_the_German_heat_sector_Findings_from_an_economic_optimization_approach, letzter Zugriff: 22.05.2020)
- Kaltschmitt, M. (2014): Vorbereitung und Begleitung der Erstellung des EEG-Erfahrungsberichts 2014 gemäß § 65 EEG. Vorhaben IIb Stromerzeugung aus Geothermie.
- Kammer, H. (2017): Thermische Seewassernutzung in Deutschland – Bestandsanalyse, Potenzial und Hemmnisse seewasserbetriebener Wärmepumpen.
- Kanton Thurgau (2021): Machbarkeitsstudie – Thermische Nutzung Bodensee und Rhein. (URL: https://energie.tg.ch/public/upload/assets/121029/20210719_Machbarkeitsstudie_Thermische_Nutzung_Bodensee_Rhein.pdf, letzter Zugriff: 16.11.2021)
- Kern, M.; Raussen, T.; Funda, K. et al. (2010): Aufwand und Nutzen einer optimierten Bioabfallverwertung hinsichtlich Energieeffizienz, Klima- und Ressourcenschutz. (URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4010_0.pdf, letzter Zugriff: 09.10.2020)
- KNE Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende (2021a): Kriterien für eine naturverträgliche Standortwahl für Solar-Freiflächenanlagen. (URL: https://www.naturschutz-energiewende.de/wp-content/uploads/KNE_Kriterienkatalog-zur-naturvertraeglichen-Standortsteuerung-PV-Freiflaechenanlagen.pdf, letzter Zugriff: 04.10.2021)
- KNE Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende (2021b): Kriterien für eine naturverträgliche Gestaltung von Solar-Freiflächenanlagen. (URL: https://www.naturschutz-energiewende.de/wp-content/uploads/KNE_Kriterienkatalog-zur-naturvertraeglichen-Anlagengestaltung-PV-Freiflaechenanlagen.pdf, letzter Zugriff: 04.10.2022)
- Koch, M.; Hennenberg, K.; Hünecke, K. et al. (2018): Rolle der Bioenergie im Strom- und Wärmemarkt bis 2050 unter Einbeziehung des zukünftigen Gebäudebestandes. (URL: https://www.energetische-biomassennutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB114_Bericht_Bio-Strom-W%C3%A4rme.pdf, letzter Zugriff: 16.06.2020)
- Krüger, D. et al. (2000): Parabolic Trough Collectors for District Heating Systems at High Latitudes? - A Case Study.
- Küttel et al. (2002): Temperaturpräferenzen und -limiten von Fischarten schweizerischer Fließgewässer.
- Kun, Z. et al. (2020): Recognizing the importance of unmanaged forests to mitigate climate change. (URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcbb.12714>, letzter Zugriff: 19.09.2020)

- LAG SV (2014): Abstandsempfehlungen für Windenergieanlagen zu bedeutsamen Vogelebensräumen sowie Brutplätzen ausgewählter Vogelarten (Stand April 2015). (URL: <https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/energie/wind/170206-nabu-abstandsempfehlungen.pdf>, letzter Zugriff: 16.11.2021)
- Lassauce et al. (2011): Deadwood as a surrogate for forest biodiversity: Meta-analysis of correlations between deadwood volume and species richness of saproxylic organisms.
- Lenz, V.; Jordan, M.; Oehmichen, K. (2019): Supplementary material to technical and economic data of renewable heat supply systems for different heat sub-sectors. (URL: <https://data.mendeley.com/datasets/v2c93n28rj/2>, letzter Zugriff: 16.06.2020)
- Letter from Scientists to the EU Parliament regarding forest biomass (updated January 14, 2018). (URL: https://pfpi.net/wp-content/uploads/2018/04/UPDATE-800-signatures_Scientist-Letter-on-EU-Forest-Biomass.pdf, letzter Zugriff: 19.09.2021)
- Li, H.; Nord, N. (2018): Transition to the 4th generation district heating - possibilities, bottlenecks, and challenges.
- Mangold, D.; Miedaner, O.; Tziggili, E. et al. (2012): Technisch-wirtschaftliche Analyse und Weiterentwicklung der solaren Langzeit-Wärmespeicherung. (URL: http://www.solites.de/download/literatur/Solites_Technisch-wirtschaftliche%20Analyse%20und%20Weiterentwicklung%20der%20solaren%20Langzeit-W%C3%A4rmespeicherung_Forschungsbericht_FKZ%200329607N_2012.pdf, letzter Zugriff: 07.10.2020)
- Matthes et al. (2018): ZUKUNFT STROMSYSTEM II – Regionalisierung der erneuerbaren Stromerzeugung.
- Mauthner, F.; Herkel, S. (2016): Solar Thermal and Energy Economy in Urban Environments, Report IEA SHC Task 52. (URL: http://task52.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/IEA-SHC-Task52-STC1-Classification-and-Benchmarking_v02.pdf, letzter Zugriff: 07.10.2020)
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2021): Solarparks – Photovoltaik-Freiflächenanlagen. (URL: <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/energie/erneuerbare-energien/sonnenenergie/photovoltaik/photovoltaik-freiflaechenanlagen/>, letzter Zugriff: 19.09.2021)
- NABU (2010): Kriterien für naturverträgliche Photovoltaik-Freiflächenanlagen. (URL: <https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/energie/solarenergie/nabu-kriterien-solarparks.pdf>, letzter Zugriff: 21.10.2020)
- NABU (2015): Naturverträgliche Anlage und Bewirtschaftung von Kurzumtriebsplantagen (KUP). (URL: https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/landwirtschaft/160303-nabu_naturvertraegliche-anlage-kup.pdf, letzter Zugriff: 11.11.2021)
- Neumann, H. (2018): Weltgrößter Wärmespeicher steht in Halle. (URL: <https://www.topagrar.com/energie/news/weltgroesster-waermespeicher-steht-in-halle-9835458.html>, letzter Zugriff: 08.12.2020)
- Noll, F.; Wern, B.; Peters, W. et al. (2020): Naturschutzbezogene Optimierung der Rohstoffbereitstellung für Biomasseanlagen. Bundesamt für Naturschutz Skript 555 (URL: <https://www.bfn.de/sites/default/files/BfN/service/Dokumente/skripten/skript555.pdf>, letzter Zugriff: 09.11.2021)

- Norton et al. (2019): Serious mismatches continue between science and policy in forest bio-energy. (URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcbb.12643>, letzter Zugriff: 19.09.2021)
- Öko-Institut e.V., Fraunhofer ISI (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. (URL: <https://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf>, letzter Zugriff: 28.05.2020)
- Pehnt, M.; Nast, M.; Götz, C. et al. (2017): Wärmenetzsysteme 4.0. Endbericht – Kurzstudie zur Umsetzung der Maßnahme „Modellvorhaben erneuerbare Energien in hocheffizienten Niedertemperaturwärmenetzen“. (URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/endbericht-kurzstudie-waermenetzsysteme-4-0.pdf?__blob=publication-File&v=6, letzter Zugriff: 08.10.2020)
- Pehnt et al. (2018): Untersuchung zu PEF. (URL: <https://gih.de/wp-content/uploads/2019/05/Untersuchung-zu-Prim%C3%A4renergiefaktoren.pdf>, letzter Zugriff: 20.09.2021)
- Pehnt, M. (2020): Ifeu/AGFW - Gutachten Bundesförderprogramm Effiziente Wärmenetze (BEW).
- Pehnt et al. (2021): Neukonzeption des Gebäudeenergiegesetzes (GEG 2.0) zur Erreichung eines klimaneutralen Gebäudebestandes. Ein Diskussionsimpuls // im Auftrag des Umweltministeriums Baden-Württemberg. (URL: https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/2021_04_GEG_2.0_BET_V2__4_.pdf, letzter Zugriff: 20.09.2021)
- Pörtner et al. (2021): Scientific outcome of the IPBES-IPCC cosponsored workshop on biodiversity and climate change. (URL: <https://zenodo.org/record/5101125#.YVsBGmLP02z>, letzter Zugriff: 04.10.2021)
- Prognos (Ifd.): Die Modelllandschaft der Prognos AG im Detail. (URL: <https://www.prognos.com/leistungen/modelle/prognos-modelle-im-detail/>, letzter Zugriff: 17.06.2020)
- Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2020): Klimaneutrales Deutschland. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität. (URL: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/projekte/2020/2020_10_KNDE/A-EW_195_KNDE_WEB.pdf, letzter Zugriff: 16.11.2021)
- Prognos AG, Fraunhofer ISI, GWS, IINAS (2020): Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050. Dokumentation von Referenzszenario und Szenario mit KSP 2030. (URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/klimagutachten.pdf?__blob=publicationFile&v=8, letzter Zugriff: 17.06.20).
- Purr, K.; Günther, J.; Lehmann, H. et al. (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. (RESCUE-Studie).
- PwC (2015): Energiewende-Outlook: Kurzstudie Wärme. (URL: <https://www.pwc.de/de/energiewende/assets/pwc-ewo-kurzstudie-waerme-2015.pdf>, letzter Zugriff: 16.11.2021)
- Reichmuth, M.; Schiffer, A. (2012): Technologien zur Produktion regenerativer Energie – Potenziale und Standortanforderungen. (URL: <https://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/ina/vortraege/2012/2012-Energielandschaft-Reichmuth-Schiff-ler.pdf>, letzter Zugriff: 08.12.2020)
- Riegger, M. (2008): Saisonaler Erdsonden-Wärmespeicher Crailsheim. (URL: http://www.solites.de/download/literatur/bbr_09_2008_Riegger.pdf, letzter Zugriff: 23.10.2020)
- Ritter D., Schmitt B., Vajen K. (2019): Analyse und Erschließung des Marktes für solare Prozesswärme in Deutschland.

- Roider, H. (2020): Höhere Fördersätze für grüne Wärme im Jahre 2020. In: Energie & Management 07.01.2020. (URL: https://www.bhkw-infozentrum.de/bhkw-news/43746_Hoehere-Foerdersaetze-fuer-gruene-Waerme-im-Jahre-2020.html, letzter Zugriff: 27.10.2020)
- Rosin, Z.; Pärt, T.; Low, M. (2021): Village modernization may contribute more to farmland bird declines than agricultural intensification. (URL: <https://conbio.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/conl.12843>, letzter Zugriff: 10.11.2021)
- Salomon et al. (2017): Fachartikel zum Forschungsvorhaben „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen und Fernwärmeleitungen“. (URL: https://www.agfw.de/index.php?eID=tx_securedownloads&p=510&u=0&g=0&t=1603533504&hash=c33356a99fd8b9d4213044a609cc8451d262deec&file=fileadmin/user_upload/Forschung_u_Innovation/Laufende_Projekte/FW-Vegetation/180619_FW-Vegetation_Auszug_durch_Forschung_fit.pdf, letzter Zugriff: 23.10.2020)
- Salomon, M.; Grimm, S.; Stützel, T. (2020): Abschlussbericht „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen/Baumwurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen“.
- Sandbag (2019): Playing With Fire. An assessment of company plans to burn biomass in EU coal power stations. (URL: https://ember-climate.org/wp-content/uploads/2019/12/2019-SB-Biomass-report-1.7b_DIGI.pdf, letzter Zugriff: 02.05.2020)
- Sandrock, M.; Maaß, C.; Weisleder, S.; Westholm et al. (2020): Kommunaler Klimaschutz durch Verbesserung der Effizienz in der Fernwärmeversorgung mittels Nutzung von Niedertemperaturwärmequellen am Beispiel tiefergeothermischer Ressourcen. Hg. v. Umweltbundesamt, in Druck.
- Sandrock, M; Möhring, P. (2020): Flächen einfach mehrfach nutzen: Wie Multicodierung zur Lösung der Solarthermie-Flächenkonflikte beiträgt. Infoblatt Solare Wärmenetze Nr. 8. (URL: https://www.hamburg-institut.com/images/pdf/fachbeitraege/Infoblatt__Nr9_final.pdf, letzter Zugriff: 08.12.2020)
- Scheffelowitz, M.; Daniel-Gromke, J.; Rensberg, N. et al. (2014): Stromerzeugung aus Biomasse (Vorhaben IIa Biomasse). (URL: https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/Berichte/Monitoring_ZB_Mai_2014.pdf, letzter Zugriff: 09.10.2020)
- Schmitt, B.; Ritter, D.; Giovannetti, F. (2017): Solare Prozesswärme. Mit Solarthermie Abläufe in Industrie und Gewerbe unterstützen. (URL: http://www.bine.info/fileadmin/content/Presse/Themeninfos/Themen_0217/themen_0217_internetx.pdf, letzter Zugriff: 21.04.2020)
- Schoof, N.; Luick, R.; Beaufoy, G. et al. (2019): Grünlandschutz in Deutschland. Bundesamt für Naturschutz Skript 539. (URL: https://www.bfn.de/sites/default/files/BfN/service/Dokumente/skripten/skript539_2_auf1.pdf, letzter Zugriff: 09.11.2021)
- Stadler, C. (2020): Dänische Wärmenetze & Know-How – Beispielgebend für Europa! (URL: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiH3MSDyr7tAhVPzaQKHxjwCBgQF-jAAegQIAhAC&url=https%3A%2F%2Fwww.gruppe21-planegg.de%2Fapp%2Fdownload%2F12279680257%2F20200302%2520-%2520Arcon-Sunmark%2520-%2520Gro%25C3%259Fe%2520Solarw%25C3%25A4rme%2520%26%2520saisonale%2520Speicher.pdf%3Ft%3D1590848737&usg=AOvVaw1pDCPwgv1jDDyh6PdRwHXV>, letzter Zugriff: 08.12.2020)

- Stadler, I.; Kraft, A.; Bauer, T. et al. (2020): Wärmespeicher in NRW – Thermische Speicher in Wärmenetzen sowie in Gewerbe- und Industrieanwendungen. (URL: <https://enerko.de/wp-content/uploads/2020/08/EnergieAgentur.NRW-Waermespeicher-in-NRW.pdf>, letzter Zugriff: 08.12.2020)
- Sterchele, P.; Brandes, J.; Heilig, J.; Wrede, D.; Kost, C.; Schlegl, T.; Bett, A.; Henning, H. (2020): Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem – Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen. (URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Wege-zu-einem-klimaneutralen-Energiesystem.pdf>, letzter Zugriff: 22.04.2020)
- Strodel, Nikolai (2018): Wahrscheinlichkeitsbasierte Energiesystem- und Wirtschaftlichkeitsanalyse eines Energieverbundsystems unter Einbindung eines Aquiferwärmespeichers. Verbesserung der Investitionsplanung durch Erhöhung der Prognosefähigkeit und Prognosegenauigkeit. Leuphana Universität Lüneburg, Professur für Finanzierung und Finanzwirtschaft. Lüneburg. (URL: http://opus.uni-lueneburg.de/opus3/frontdoor.php?source_opus=14506&la=de, letzter Zugriff: 07.10.2020)
- SWISSOLAR (2017): Markterhebung Sonnenenergie 2017. (URL: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahU-KEwjXxb6Jxr7tAhVDzaQKHdHrDNc4ChAWMAZ6BAg-NEAI&url=https%3A%2F%2Fpubdb.bfe.admin.ch%2Fde%2Fpublication%2Fdownload%2F9431&usg=AOvVaw1BtJOkv6a9nQ-ECnZETSAh>, letzter Zugriff: 08.12.2020)
- Teuffer, M. (2020): Aus Kiesgrube wird ein Wärmespeicher. (Energate Messenger 11.06.2020) (URL: <https://www.energate-messenger.de/news/203141/aus-kiesgrube-wird-ein-waermespeicher>, letzter Zugriff: 23.10.2020)
- Thamling, N.; Langreder, N. Rau, D.; Wünsch, M.; Maaß, C.; Sandrock, M.; Fuß, G.; Möhring, P.; Purkus, A.; Strodel, N. (2020): Perspektive der Fernwärme – Maßnahmenprogramm 2030. Aus- und Umbau städtischer Fernwärme als Beitrag einer sozial-ökologischen Wärmepolitik. (URL: https://www.hamburg-institut.com/images/pdf/studien/AGFW_Perspektive_der_Fernwaerme_2030_final.pdf, letzter Zugriff: 08.12.2020)
- Thrän, D.; Klepper, G. (2019): Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik. (URL: https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Download/Extern/ESYS_Analyse_Biomasse.pdf, letzter Zugriff: 03.06.2020)
- Thrän, D.; Majer, S.; Gawor, M.; Bunzel, K.; Daniel-Gromke, J. (2011): Optimierung der marktnahen Förderung von Biogas/Biomethan. (URL: http://www.biogasrat.de/wp-content/uploads/2017/12/eeg_2012_studie_biogasrat.e.v._download-1.pdf, letzter Zugriff: 09.10.2020)
- Thünen-Institut für Internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie (2018): Holzbilanzen 2015 bis 2017 für die Bundesrepublik Deutschland und Neuberechnung der Zeitreihe der Gesamtholzbilanz ab 1995. (URL: https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn059939.pdf, letzter Zugriff: 18.06.2020)
- Tröltzsch, P.; Neuling, E. (2013): Die Brutvögel großflächiger Photovoltaik-Anlagen in Brandenburg.
- Umweltbundesamt (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. (URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/treibhausgasneutrales_deutschland_im_jahr_2050_langfassung.pdf, letzter Zugriff: 23.04.2020)

- Umweltbundesamt (2018): Feinstaub aus Holzfeuerungen: Luftqualitätsgrenzwerte eingehalten. (URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-01-30_texte_24-2020_biogas2030.pdf, letzter Zugriff: 11.12.2020)
- Umweltbundesamt (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. RESCUE: Langfassung. (URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet.pdf, letzter Zugriff: 07.05.2020)
- Umweltbundesamt (2020): Erneuerbare Energien in Zahlen. (URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen>, letzter Zugriff: 27.10.2020)
- Umweltbundesamt (2020): Nexus Ressourceneffizienz und Landnutzung – Ansätze zur mehrdimensionalen umweltpolitischen Bewertung der Ressourceneffizienz bei der Biomassebereitstellung.
- Walter, A.; Wiehe, J.; Schlömer, G. et al. (2018): Naturverträgliche Energieversorgung aus 100 % erneuerbaren Energien 2050. (URL: <https://www.bfn.de/fileadmin/BfN/service/Dokumente/skripten/Skript501.pdf>, letzter Zugriff: 20.03.2020)
- Welle, T. et al. (2020): Incorrect data sustain the claim of forest-based bioenergy being more effective in climate change mitigation than forest conservation. (URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcbb.12738>, letzter Zugriff: 11.11.2021)
- WindGuard (2019): Status des Offshore-Windenergieausbaus in Deutschland. Erstes Halbjahr 2019. (URL: https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/pressemitteilungen/2019/Status_des_Offshore-Windenergieausbaus_Halbjahr_2019.pdf, letzter Zugriff: 08.12.2020)
- Wirth et al. (2020): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. (URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>, letzter Zugriff: 19.08.2020)

Anhang: Beschreibung der Technologien, Effizienzmaßnahmen und Infrastrukturen mit dem Fokus auf den technischen und wirtschaftlichen Aspekten

A 1	Power-to-Heat	197
A 2	Wärmepumpe.....	199
A 3	Power-to-Gas	202
A 4	Solarthermie	204
A 5	Biogene Brennstoffe	206
A 6	Tiefengeothermie.....	208
A 7	Gebäudeeffizienz	210
A 8	Wärmenetze und Effizienzmaßnahmen in Wärmenetzen.....	213
A 9	Saisonale Wärmespeicher	214

Es erfolgt eine Beschreibung der Funktionsweise der relevantesten Technologien zur Erzeugung von erneuerbarer Wärme, Effizienzmaßnahmen und Infrastrukturen (TEI). Neben der allgemeinen Funktionsweise werden charakteristische Parameter der Technologien wie etwa die Umwandlungseffizienz und Aspekte der Wirtschaftlichkeit beleuchtet.

A 1 Power-to-Heat

Bei der direkten Stromnutzung zur Wärme- und Kälteerzeugung wird elektrische in thermische Energie umgewandelt. Diese Technologie wird als Power-to-Heat (PtH) oder als direktelektrische Wärmeerzeugung bezeichnet. Der PtH-Begriff wird in einigen Fällen auch als übergeordnete Kategorie für die strombasierte Wärmeerzeugung verwendet und umfasst dann auch Wärmepumpen. Im Rahmen dieses Berichts werden die Bezeichnungen Power-to-Heat und direktelektrische Wärmeerzeugung jedoch als Synonyme für Technologien verwendet, die Strom mit einem Wirkungsgrad von nahezu eins in Wärme umwandeln.

Die PtH-Technologie wird als wichtiges Element der Sektorkopplung gehandelt. Das flexible Zu- bzw. Abschalten von Stromlasten durch ein Hoch- bzw. Herunterfahren der PtH-Anlagen, gesteuert durch ein intelligentes Lastmanagement, kann Stromnetze entlasten und die Abregelung von EE-Stromerzeugungsanlagen verhindern. Insbesondere in Kombination mit Wärmespeichern geht das Konzept für die sinnvolle Kopplung der Sektoren Wärme und Strom auf. Dann kann bei hoher EE-Stromproduktion Wärme erzeugt werden, die zu einem späteren Zeitpunkt verbraucht wird.

Direktelektrische Wärmeerzeugung wird sowohl zentral als auch dezentral eingesetzt. Im dezentralen Bereich sind Nachtspeicherheizungen (im Gebäudebestand) sowie andere elektrische Widerstandsheizungen (z. B. elektrische Durchlauferhitzer zur Warmwasserbereitung) im Betrieb.

Power-to-Heat-Anlagen in höherem Leistungsbereich werden zur Fernwärmeerzeugung eingesetzt. In Deutschland sind ungefähr 36 große PtH-Anlagen mit einer Gesamtleistung von etwa 555 MW installiert. (BDEW 2020) Die zentralen PtH-Anlagen kommen allerdings aufgrund der hohen Betriebskosten für den Strombezug aktuell kaum zum Einsatz. In der Realität findet faktisch keine Fernwärmeerzeugung mittels PtH-Anlagen statt – knapp eine TWh Fernwärme wurde 2015 auf Basis von PtH-Anlagen erzeugt.

Die aktuellen regulatorischen und preislichen Rahmenbedingungen sorgen dafür, dass die Fernwärmeerzeugung mit PtH-Anlagen unwirtschaftlich ist.

Technologie

PtH-Anlagen in Form von Elektrodenkesseln oder Elektroheizkesseln erreichen Wirkungsgrade von circa 99 %. Die hinlänglich erprobten Technologien werden bereits seit circa 100 Jahren eingesetzt und weisen in der Regel eine sehr hohe Ausfallsicherheit mit quasi durchgehender zeitlicher Verfügbarkeit auf. (Bücken et al. 2017) Die Anlagen können stufenlos im Leistungsbereich geregelt werden und sind in der Lage, sehr hohe Laständerungsgeschwindigkeiten zu fahren.

Bei PtH-Anlagen wird anhand der eingesetzten Technologie zwischen Elektrodenkesseln und Elektroheizkesseln unterschieden. In Elektrodenkesseln wird das Wasser aufgeheizt, indem es von Strom durchflossen wird. Das Wasser selbst dient als ohmscher Widerstand und wird direkt im Primärkreislauf erwärmt. In einem Wärmeübertrager wird die thermische Energie an ein (Fernwärme-)System übergeben. Die stoffliche Trennung der Kreisläufe ist aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen an die Konditionierung des Wassers notwendig. Elektrodenkessel werden in der Regel an der Mittelspannung oder Hochspannung angeschlossen und werden üblicherweise im höheren Leistungsbereich eingesetzt. (Christidis et al. 2017)

In Elektroheizkesseln (auch Widerstandserhitzer genannt, hier E-Heizer) erfolgt die Erwärmung des Wassers dagegen indirekt über eine Heizschleife, die durch Widerstandserwärmung mittels Stroms aufgeheizt wird. Das genutzte (Fernwärme-)Wasser kann in diesen PtH-Anlagen direkt durch den Kessel strömen. Die elektrischen Leiter im Inneren des Heizelements müssen isoliert sein und sind in der Regel an der Niederspannung angeschlossen. Übliche Leistungsgrößen von E-Heizern liegen bei bis zu 10 MW, bei höheren Leistungen werden mehrere Module parallel installiert. (Christidis et al. 2017)

Wirtschaftlichkeit

Die Investitionskosten für PtH-Anlagen variieren je nach Leistungsgröße und notwendiger Peripherie bzw. Infrastruktur am Standort stark. In einer Studie der Agora-Energiewende werden die Investitionskosten für Elektroheizkessel mit 75 - 150 €/kW angegeben zuzüglich der Kosten für die elektrische Anbindung von ca. 25 - 150 €/kW (Gerhardt et al. 2014). In einer weiteren umfassenden Studie werden die Investitionskosten für Elektroheizkessel mit 65 €/kW (5 MW_{th}-Anlage) und für Elektrodenkessel mit 88 €/kW (10 MW_{th}-Anlage) bzw. 50 €/kW (40 MW_{th}-Anlage) angegeben. Die spezifischen Investitionskosten sinken für größere Anlagen. (Bücken et al. 2017).

Der Betrieb von PtH-Anlagen ist im Vergleich zur Nutzung konventioneller Energieträger teuer, wenn der Strom extern aus dem allgemeinen Versorgungsnetz bezogen wird. Selbst bei niedrigen oder negativen Stromhandelspreisen infolge eines Überangebots oder Netzengpässen entstehen hohe Kosten beim Strombezug, die sich aus den zu entrichtenden Abgaben und Steuern (EEG-Umlage, Netznutzungsentgelt, Stromsteuer) ergeben und die den Marktstrompreis stark verzerren. Infolgedessen beziehen PtH-Anlagen im hohen Leistungsbereich den Strom häufig von Eigenerzeugungsanlagen (z. B. von hocheffizienten KWK-Anlagen oder PV-Anlagen), um einen wirtschaftlichen Betrieb zu gewährleisten.

In zentralen Anlagen wie Wärmenetzen und in Industrie und Gewerbe werden PtH-Anlagen aus den genannten Gründen häufig in Kombination mit KWK-Erzeugungsanlagen eingesetzt. Die KWK-Anlage kann diese bei geringen Strompreisen an der Börse, z. B. durch ein Überangebot durch EE-Stromeinspeisung, oder bei einem Abruf negativer Regelleistung heruntergefahren werden. Häufig können KWK-Anlagen innerhalb von kurzen Zeiträumen nicht abgeschaltet, sondern nur auf Teillast heruntergeregelt werden, um ein erneutes schnelles Anfahren zum Arbeitspunkt zu gewährleisten. Ist eine PtH-Anlage nachgeschaltet, nutzt diese die verbleibende Stromerzeugung aus der im Teillastbetrieb betriebenen KWK-Anlage und stellt den Strommärkten eine erhöhte Flexibilität zur Verfügung, die auf dem Regelleistungsmarkt entsprechend vergütet wird. Zugleich gleicht die PtH-Anlage die verringerte Wärmeerzeugung aus dem Teillastbetrieb der KWK-Anlage aus. PtH-Anlagen eignen sich auch zum Ausgleich von extremen Wärmebedarfsspitzen, die nur an wenigen Stunden im Jahr auftreten (ca. 20-500 h/a).

Bislang gibt es für die PtH-Anlagen im Bereich der Wärmenetze aufgrund der bestehenden regulatorischen Rahmenbedingungen und den damit verbundenen Umlagen, Abgaben und Steuern auf den Strompreis kein auskömmliches Geschäftsmodell. Die Anlagen werden nur mit sehr wenigen Vollaststunden im Jahr betrieben und leisten bisher nur einen vernachlässigbaren Anteil an der Fernwärmeerzeugung.

A 2 Wärmepumpe

Eine Wärmepumpe dient dazu, Wärme auf einem niedrigen Temperaturniveau von einer Umgebungswärmequelle aufzunehmen (z. B. aus der Umgebungsluft, oberflächennaher Geothermie, Oberflächengewässern, Abwärme und Abwasser), unter Aufwendung von technischer Arbeit auf ein Nutztemperaturniveau anzuheben und auf ein zu beheizendes System mit höherer Temperatur zu übertragen.

Ungefähr 14,6 TWh (8,3 %) der erneuerbaren Wärme in Deutschland wurde 2019 aus oberflächennaher Geothermie und Umweltwärme mittels Wärmepumpensystemen erzeugt. (Umweltbundesamt 2020) In neu genehmigten Wohngebäuden beträgt der Wärmepumpen-Marktanteil knapp 46 %.²⁷ Zentrale Großwärmepumpen sind bislang weniger verbreitet in Deutschland. Eine Studie der Bochum University of Applied Sciences (Born et al. 2017) untersuchte u. a. den Markt für Großwärmepumpen in Deutschland. Born et al. 2017) untersuchte 2017 u. a. den Markt für Großwärmepumpen in Deutschland. Auf Basis der vorliegenden Daten gehen die Autoren für Ende 2016 deutschlandweit von rund 100 Großwärmepumpen aus, wobei die durchschnittliche Leistung von 300 kW vergleichsweise gering ausfällt. In der Studie werden außerdem die hohen möglichen Potenziale von Großwärmepumpen hervorgehoben, die sich bei einer Transformation der Fernwärmenetze hin zu niedrigeren Vorlauftemperaturen ergeben. In niederkalorischen Wärmenetzen eingesetzt können Wärmepumpentechnologien einen besonders effizienten Beitrag zur Wärmeversorgung leisten.

Technologie

Das Funktionsprinzip einer Kompressionswärmepumpe gleicht dem eines umgekehrten Kälteschanks (Wärme-Kraft-Prozess). Für eine hohe Effizienz sollte die Differenz zwischen Quelltemperatur und Nutztemperatur möglichst gering sein. Die Effizienz der Wärmepumpe wird als Arbeitszahl, COP oder Jahresarbeitszahl (JAZ) ausgedrückt. Die JAZ gibt das Verhältnis der jährlich erzeugten Wärmemenge zur jährlich eingesetzten Strommenge an. Gute Systeme mit geringer Temperaturdifferenz zwischen Quelle und Senke (von z. B. 20 K) erreichen JAZ von 4 bis 5.

Bei Wärmepumpen lässt sich zwischen verschiedenen Leistungsbereichen sowie zwischen genutzten Wärmequellen unterscheiden. Großwärmepumpen in industriellem Maßstab werden vor allem zentral zur Erzeugung von Fernwärme oder Nahwärme bzw. dezentral zur Wärmeerzeugung für große Einzelverbraucher eingesetzt. Kleinere Wärmepumpen im unteren Leistungsbereich werden dezentral zur Wärmeversorgung eingesetzt.

Großwärmepumpen unterscheiden sich von kleinen Wärmepumpen durch folgende Kriterien (Lambauer 2008):

- Leistung

Die Leistungsspektren von kleinen Wärmepumpen reichen bis circa 200 kW. Großwärmepumpen, die z. B. für Anwendungen in Wärmenetzen genutzt werden, sind meistens auf größere Heizleistungen ab circa 200 kW ausgelegt.

- Konzept und Planung

Kleine und mittlere Wärmepumpen sind einfache, in Serie gefertigte Anlagen, die für einen bestimmten Wärmebedarf ausgewählt werden. Großwärmepumpen benötigen hingegen mehr planerischen Aufwand und müssen in der Regel große Einzelverbraucher oder mehrere Gebäude über Wärmenetze versorgen. Die Erschließung der Wärmequelle erfolgt bei Großwärmepumpen oft nicht über standardisierte Verfahren.

²⁷ Daten für das Jahr 2019

Unterschiedliche erneuerbare Wärmequelle werden mittels verschiedener Arten von Wärmepumpen erschlossen, von denen die meisten sowohl zentral als Großwärmepumpen als auch dezentral realisiert werden können. Die relevantesten Technologien sind im Folgenden aufgeführt. Wärmepumpen, die industrielle Abwärme (in Form von Abluft, Rauchgasen oder Prozesswärme) oder Abwasser nutzen, werden nicht gesondert aufgeführt.

Luftwärmepumpen

Umgebungsluft kann für die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser genutzt werden. Dazu werden Luftwärmepumpen eingesetzt. Sie entziehen der Umgebungsluft Wärme mittels großflächiger Wärmetauscher mit Ventilatoren, in denen das Kältemittel verdampft wird. Der Kältemitteldampf wird im Kompressor der Wärmepumpe verdichtet, wird im Kondensator verflüssigt und gibt die entstehende Wärme als Nutzwärme ab. Es gibt Bauformen, bei denen Verdampfer und Kompressor in einem gemeinsamen Gehäuse verbaut sind, und Splitgeräte, bei denen der Verdampfer losgelöst vom Standort des Kompressors an einem geeigneten Ort aufgestellt werden kann und das Kältemittel mit Rohrleitungen zum Kompressor transportiert wird. Luftwärmepumpen für den dezentralen Einsatz in Einzelgebäuden gibt es mit Wärmeleistungen bis zu ca. 30 kW. Sie werden überwiegend in Einfamilienhäusern und kleinen Mehrfamilienhäusern eingesetzt. Werden höhere Leistungen benötigt, können mehrere Geräte als Kaskade aufgebaut werden.

Die Nutzung von Luft als Wärmequelle kann nicht nur dezentral, sondern auch zentral erfolgen. Hierfür entziehen große Luft-Wasser-Wärmepumpen der Umgebungsluft Wärme, bringen diese auf ein höheres Temperaturniveau und speisen sie in Wärmenetze ein. Eine Beispielanlage ist in Abb. 52 gezeigt.

Luftwärmepumpen erreichen Jahresarbeitszahlen von 2,9 bis 4,3. (Bürger et al. 2017)



Abb. 52: 1-MW-Großwärmepumpe mit Umgebungsluft als Wärmequelle, die in das Fernwärmenetz des dänischen Ortes Slagslund einspeist. (Quelle: PlanEnergi)

Oberflächennahe Geothermie

Die oberflächennahe Geothermie wird überwiegend mit sogenannten Sole/Wasser-Wärmepumpen erschlossen, die Erdwärmesonden als Wärmequelle nutzen. Dabei ist eine zentrale Erschließung mittels Nah- und Fernwärmenetzen bzw. eine dezentrale Erschließung im

Gebäudebestand möglich. Andere Arten der Wärmeerschließung, wie zum Beispiel Grundwasserbrunnen (Wasser/Wasser-Wärmepumpe) Erdwärmekollektoren, Wärmepfähle oder Wärmekörbe, haben weit geringere Marktanteile.

Bei Erdsonden findet die Wärmeübertragung auf den Kältemittelkreislauf unterirdisch in geschlossenen Systemen statt. Doppel-U-Rohre werden in meist um die 100 m tiefen Bohrlöcher eingelassen und mit einem Betongemisch versiegelt. In den Rohren zirkuliert Sole, die die im Erdreich gespeicherte thermische Energie aufnimmt und sie an die angeschlossene Erdwärmepumpe weitergibt. Letztere nutzt diese Wärme, um ein Kältemittel zum Verdampfen zu bringen.

Im Vergleich mit Luftwärmepumpen werden mit Erdwärme regelmäßig höhere Wirkungsgrade erzielt, da in der Heizperiode die Quellentemperatur (Erde bzw. Grundwasser) höher als die Lufttemperatur ist und somit die mittels Wärmepumpe zu überwindende Temperaturdifferenz geringer ist. Sole/Wasser-Wärmepumpen erreichen Jahresarbeitszahlen von 3,1 bis 5,7. (Bürger et al. 2017)

Oberflächengewässer

Flüsse, Seen und Meere speichern enorme Mengen an Wärme und reagieren verzögert auf die tages- und saisonbedingten Schwankungen der Lufttemperatur. Bei der Erschließung von Oberflächengewässern werden Wärmepumpen eingesetzt, die dem Wasser niederkalorische Wärme entziehen und diese auf ein höheres Temperaturniveau bringen.

Bei der Ausführung solcher Systeme werden zwei Varianten der Oberflächenwasser-Wärmepumpe unterschieden. In offenen Systemen wird dem Oberflächengewässer Wasser entnommen, das durch den Wärmetauscher geleitet wird. In geschlossenen Systemen befindet sich der Wärmetauscher direkt im Gewässer.

Während in anderen europäischen Ländern wie beispielsweise in der Schweiz Wasser-Wasser-Wärmepumpen, die vor allem Umweltwärme aus Seen nutzen, bereits weit verbreitet sind und die Funktionalität und Wirtschaftlichkeit solcher Systeme beweisen, existieren in Deutschland sehr wenige dieser Anlagen. In Deutschland sind lediglich 15 Seewasser-Wärmepumpen (Kammer 2017) und etwa 10 Flusswasser-Wärmepumpen (Abel 2018) in Betrieb. Wärmepumpen, die Meerwasser als Wärmequelle nutzen, sind bislang in Deutschland kaum vorhanden.

Wirtschaftlichkeit

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Leistungsklassen sowie technischen Ausführungen der Wärmepumpen für die Erschließung verschiedener Wärmequellen sind allgemeine Aussagen über die Wirtschaftlichkeit von Wärmepumpensystemen nur bedingt möglich.

Für dezentrale Wärmepumpensysteme stehen Wärmepumpen grundsätzlich in Konkurrenz zu Gas-Brennwertkesseln, Biomassekesseln und solarthermischen Systemen. Im Vergleich zur Erschließung anderer Wärmequellen ist die Anschaffung von Wärmepumpen zur Nutzung von Umgebungsluft kostengünstiger. Allerdings stehen der niedrigeren Anfangsinvestition höhere Kosten im Betrieb gegenüber. Die Jahresarbeitszahl von Luftwärmepumpen ist im Vergleich zu anderen Wärmepumpen geringer, was zu einem höheren Stromverbrauch führt.

Wärmepumpen, die oberflächennahe Geothermie nutzen, sind in der Anschaffung etwas günstiger, hinzu kommt jedoch die Erschließung der Wärmequelle, sodass sie insgesamt höhere Investitionskosten aufweisen. Für die Erschließung kann bei Erdkollektoren grob von 30 €/m² (ca. 1.000 €/kW) ausgegangen werden, wobei dies stark von der Bodenart abhängig ist. Für Erdsonden kann mit etwa 50 bis 70 €/m gerechnet werden, bei einer Entzugsleistung von 40 W/m ergibt dies 1.250 €/kW.

A 3 Power-to-Gas

Erneuerbare Wärme kann mittels erneuerbar erzeugter Brennstoffe erzeugt werden.

Im folgenden Abschnitt wird auf die Herstellungsverfahren, Effizienzen und Wirtschaftlichkeit von grünem Wasserstoff sowie synthetischem Methan eingegangen. Zur Herstellung dieser Brennstoffe wird erneuerbarer Strom benötigt. Die Umwandlungseffizienzen bei der Herstellung von strombasierten Brennstoffen betragen je nach Brennstoff und Verfahren zwischen 45 % und 61 %. (Heinemann et al. 2019)

Wasserstoff – Elektrolyse

Im Juni 2020 hat das Bundeskabinett die Nationale Wasserstoffstrategie beschlossen, um mit Maßnahmen und Fördergeldern den Markthochlauf für Wasserstoff in den Jahren 2020 bis 2030 zu starten und zu stärken. Im Fokus steht dabei die Herstellung von grünem Wasserstoff aus Überschussstrom von Wind- und Solaranlagen. Das erneuerbare Gas kann dabei direkt in verschiedenen Anwendungen im Verkehr und der (chemischen) Industrie genutzt oder in der Gasinfrastruktur transportiert und gespeichert werden. Im Gegensatz zu fossilen Brennstoffen entstehen bei der Verbrennung von Wasserstoff keine schädlichen Emissionen, sondern lediglich Wasser. Wasserstoff kann in Wasserstoffverbrennungsmotoren oder Brennstoffzellen eingesetzt werden.

Die Erzeugung von Wasserstoff kann mittels verschiedener Herstellungsverfahren geschehen. Heutzutage wird der Großteil von Wasserstoff (weltweit 48 %) auf konventionelle Weise mittels Dampfreformierung von Erdgas erzeugt. Die zweitrelevanteste Herstellungsmethode (30 %) ist die auf Basis von Erdöl. Bei Raffinerieprozessen fällt Wasserstoff als Nebenprodukt an. Auch aus Kohle kann mittels Vergasung Wasserstoff erzeugt werden (18 % des weltweiten Wasserstoffs werden so erzeugt).

Erneuerbare Wärme kann letztlich nur über grünen Wasserstoff bereitgestellt werden, der das Produkt von Elektrolyseverfahren ist, die erneuerbar erzeugten Strom zur Spaltung von Wasser nutzen. Im Kernprozess der Elektrolyse wird Wasser unter Zufuhr elektrischer Energie in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Hierzu werden zwei Elektroden in eine leitende Flüssigkeit (Elektrolyt) eingebracht. Da Wasser selbst eine sehr geringe Leitfähigkeit hat, werden dem demineralisierten und deionisierten Wasser in Elektrolysezellen Salze, Säuren oder Laugen zugegeben. Es kommen verschiedene Verfahren, die sich in erster Linie durch den eingesetzten Elektrolyten unterscheiden, zum Einsatz. Bei der alkalischen Elektrolyse werden flüssige, basische Elektrolyten wie wässrige Kaliumhydroxid-Lösungen eingesetzt. Dieses über 100 Jahre alte Verfahren wird seit Mitte des 20. Jahrhunderts in kommerziellen Großanlagen mit bis zu 150 MW bzw. 33.000 Nm³/h genutzt. Bei der PEM-Elektrolyse (Proton Exchange Membrane) ist der Elektrolyt eine protonenleitende Membran bzw. ein polymerer Feststoff. Das Verfahren befindet sich noch in der Entwicklung und wird derzeit nur im kleinen Leistungsbereich bis ca. 30 Nm³/h eingesetzt. Ein weiteres Verfahren ist die Hochtemperaturelektrolyse, bei der Wasserdampf bei 850 bis 1.000 °C an Festoxiden als Elektrolyt elektrochemisch gespalten wird. Das Verfahren befindet sich noch im Stadium der Grundlagenforschung und wird bisher nur bei Spezial- und Nischenanwendungen genutzt.

Die elektrochemischen Prozesse im Elektrolyseur reagieren nahezu verzögerungsfrei auf Lastwechsel. Entscheidend für den dauerhaften und ungestörten Anlagenbetrieb sind daher die Peripheriekomponenten wie Laugenpumpen, Druckregler und Produktgasseparatoren. Häufige Lastwechsel, beispielsweise aufgrund von einer variablen am Strommarkt orientierten Betriebsweise belasten die mechanischen Komponenten und reduzieren die Lebensdauer des Systems. PEM-Elektrolyseure folgen dem Leistungseintrag besser als basische Elektrolyseure, indem sie schnell auf Lastwechsel reagieren, auch im unteren Teillastbereich gut

arbeiten und in der Startphase schnell die Betriebstemperatur erreichen. Sie weisen somit einen technischen Vorteil für den Einsatz in der PtG-Technologie auf, erzeugen dafür aber höhere Investitionskosten. Für den großtechnischen Einsatz sind daher im Hinblick auf geeignete Werkstoffe und verfahrenstechnische Prozesse weitere Entwicklungen notwendig. Durch die kontinuierliche Steigerung der jährlichen Produktionsstückzahlen und den Übergang zur Serienfertigung entstehen hierbei in den kommenden Jahren Kostensenkungspotenziale.

Die Wärmeerzeugung mittels Wasserstoffes geschieht in einer Brennstoffzelle, in der bei einer chemischen Reaktion Wasserstoff in Elektronen und Protonen geteilt wird. Als Reaktionsprodukte entstehen Sauerstoff und Wasser. Neben der Reaktionswärme, die als Nutzwärme verwendet werden kann, entsteht beim Betrieb einer Brennstoffzelle als auch Strom. Der elektrische Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle beträgt ungefähr 0,34 und der Gesamtwirkungsgrad 0,86 (Groß et al. 2012). Der thermische Wirkungsgrad kann demnach auf circa 0,52 festgelegt werden.

Methanisierung

Bei der Methanisierung wird aus dem elektrolytisch hergestellten Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid oder -dioxid durch Kohlehydrierung synthetisches Methan erzeugt. Diese stark exotherme Reaktion wird durch niedrige Temperaturen und hohe Drücke begünstigt. Als Katalysator ist Nickel hinsichtlich Aktivität, Selektivität und Preisstabilität optimal geeignet, allerdings ist der Einsatz im unteren Temperaturbereich begrenzt und eine hohe Reinheit bzgl. Sauerstoff und Schwefelverbindungen erforderlich.

Das heute am weitesten verbreitete Verfahren ist der Festbettreaktor. Hierbei wird eine fest angeordnete Katalysatorschüttung vom Reaktionsgas durchströmt. Der konstruktive Aufbau dieses Systems ist simpel, die Wärmeabfuhr ist jedoch begrenzt, weil es ansonsten zu thermischen Spannungen und zur Degradation des Katalysators kommt. Im Wirbelschichtreaktor wird die Schüttung aus feinkörnigem Feststoff von unten nach oben durchströmt und dabei aufgelockert und fluidisiert. Ein hierbei ist Vorteil der intensive Wärme- und Stoffaustausch, der einen nahezu isothermen Betrieb ermöglicht. Im Gegenzug muss jedoch das Wirbelbettmaterial angetrieben werden, ein höherer Energieaufwand ist erforderlich.

Wirtschaftlichkeit und Effizienz

Synthetische Gase können leitungsgebunden oder mobil transportiert werden.

Der Vorteil des Methans gegenüber dem Wasserstoff liegt darin, dass es als synthetisches Erdgas (SNG) nahezu identische brenntechnische Eigenschaften aufweist und ohne Mengengrenzung in die Erdgasinfrastruktur eingespeist werden kann. Dafür ist jedoch der zusätzliche Umwandschritt und somit ein weiterer Wirkungsgradverlust notwendig. Ein leitungsgebundener Transport von Wasserstoff ist über eine gesonderte Wasserstoffinfrastruktur oder über die Beimischung von Wasserstoff ins Erdgasnetz möglich. Aufgrund der lokal und regional stark unterschiedlichen Gegebenheiten und Anforderungen in den Gasfernleitungs- und -verteilernetzen ist eine Beimischung im Bereich von 1 bis 10 Volumenprozent Wasserstoff im Erdgasnetz realisierbar. (Deutscher Bundestag 2019)

Sowohl für Wasserstoff als auch für synthetisches Methan bestehen verschiedene Optionen, um einen mobilen Transport zu ermöglichen. Je nach Entfernung des Produktionsortes ist entweder eine Verflüssigung oder eine Komprimierung des Gases erforderlich. Die Verflüssigung von Wasserstoff oder Methan ist aufgrund der höheren Energiedichte der Gase im flüssigen Zustand die einzig praktikable Lösung für den Langstreckentransport. Die Verflüssigung erfordert jedoch einen höheren Energieaufwand, sodass sich für die Herstellung von Flüssigwasserstoff mittels alkalischer Elektrolyse ein Gesamtwirkungsgrad von 53 % ergibt (PEM-Elektrolyse: rund 46 %). Zudem ergeben sich in Abhängigkeit der Transportdauer weitere Verluste

durch das Verdampfen des Flüssigwasserstoffs. Die Herstellung von verdichtetem Wasserstoff (250 bar) weist dagegen heute bereits einen Wirkungsgrad von 61 % auf (Elektrolyse und Komprimierung), der langfristig auf ca. 70 % erhöht werden kann.

Beim Methantransport gelten ähnliche Bedingungen: für Langstreckentransporte sollte synthetisches Methan verflüssigt werden. Der Wirkungsgrad heutzutage liegt bei 48 % für die Herstellung von Flüssigmethan mittels alkalischer Elektrolyse und Methanisierung. Die Transportverluste durch Verdampfen sind allerdings geringer als beim Flüssigwasserstoff. Die Herstellung von komprimiertem Methan (250 bar), die bei der Produktion nahe des Einsatzortes in Frage kommt, weist einen Wirkungsgrad von 52 % auf. (Deutscher Bundestag 2019)

Derzeit gibt es noch wenige PtX-Anlagen in Deutschland, die eher Pilotprojekt-Charakter haben. Als nächster Schritt hin zu einer relevanten Produktionsmenge wird voraussichtlich in den kommenden Jahren eine Demonstrationsphase mit mittelgroßen PtX-Anlagen vorherrschen, wie sie z. B. im Rahmen der „Reallabore der Energiewende“ gefördert werden soll. Großskalige PtX-Anlagen benötigen im Idealfall eine Planungs- und Aufbauphase von ungefähr 10 Jahren. Die nationale Wasserstoffstrategie der Bundesregierung sieht einen Ausbau der Kapazität von Wasserstoffproduktionsanlagen auf 5 GW bis 2030 sowie um weitere 5 GW bis spätestens 2040 vor.

Die Herstellungskosten strombasierter Brennstoffe hängen von verschiedenen relevanten Faktoren ab: die Kapitalkosten der Anlagen (insbesondere der Elektrolyseure), die Stromkosten und die Auslastung der verfahrenstechnischen Anlagen. Es besteht momentan noch eine hohe Unsicherheit über die Entwicklung dieser Faktoren. Auch wenn eine erhebliche Kostendegression aufgrund von Lern- und Skaleneffekten sowie verbesserten Förderbedingungen zu erwarten ist, werden strombasierte Brennstoffe in ihrer Herstellung voraussichtlich auch langfristig teurer sein als fossile Alternativen. Da insbesondere die Stromgestehungskosten eine hohe Bedeutung haben, wird damit gerechnet, dass Erzeugungskapazitäten vor allem weltweit an Standorten geschaffen werden, an denen günstige Bedingungen für die Erzeugung von EE-Strom herrschen.

Etwas niedrigere Herstellungskosten weist die Wasserstoffproduktion auf, weil die Kapitalkosten für die Syntheseprozesse wegfallen und wegen der geringeren Umwandlungsverluste etwas niedrigere Strombezugpreise ansetzbar sind. Der Kostenvorteil von Wasserstoff gegenüber anderen strombasierten Stoffen ist gegeben, solange der Wasserstoff nicht für die Speicherung oder für den Langstreckentransport verflüssigt wird. Dann fallen zusätzliche Kapitalkosten für die Verflüssigungstechnologie an und die Umwandlungsverluste sind höher.

Die meisten Studien und Prognosen beziehen sich zudem auf die Herstellungskosten von synthetischen Brennstoffen. Die tatsächliche Preisentwicklung jedoch hängt nicht nur von den Gestehungskosten ab und kann sich erheblich von diesen unterscheiden.

Bei der Wärmeerzeugung mittels strombasierter Brennstoffe kommen zu den Brennstoffkosten auch die Investitions- und Wartungskosten für die Umwandlungsanlagen (z. B. Gaskessel oder gasbetriebene KWK-Anlage, Brennstoffzellenheizung).

A 4 Solarthermie

Solarthermie-Anlagen erzeugen (Prozess-)Wärme für Gebäude und Industrie sowohl dezentral als auch zentral. Dabei können entweder nicht-konzentrierende Flach- oder Vakuumröhrenkollektoren oder konzentrierende Solarkollektoren (CSP), z. B. Parabolrinnen-Kollektoren zum Einsatz kommen. Nicht konzentrierende Kollektoren nutzen sowohl diffuse als auch direkte solare Strahlung, während CSP-Kollektoren nur direkte Strahlung nutzen und nachgeführt werden müssen, um optimale Wirkungsgrade zu erzielen. Aufgrund des aktuell geringen Marktanteiles von CSP-Anlagen in Deutschland wird nicht näher auf diese Technologie

eingegangen. Generell ist es jedoch auch in Deutschland möglich, Parabolrinnenanlagen wirtschaftlich zu betreiben. Insbesondere für die Erzeugung von Wärme auf höherem Temperaturniveau oder Dampf kann der Einsatz von konzentrierender Solarthermie geeignet sein.

Solarthermie machte insgesamt im Jahr 2019 ungefähr 4,3 % oder 7,8 TWh der erneuerbar erzeugten Wärme in Deutschland aus. Deutschlandweit existieren ungefähr 2,4 Millionen dezentrale Aufdach-Solarthermieanlagen.

Zudem sind aktuell in Deutschland ca. 40 solarthermische Großanlagen mit einer Gesamtkollektorfläche von rund 100.000 m² und 70 MW thermischer Leistung installiert. Ungefähr 42 GWh Wärme werden jährlich von diesen zentralen Solarthermieanlagen erzeugt und in Wärmenetze eingespeist (Hamburg Institut). Die Kollektorflächen werden auf Freiflächen, auf Dächern oder Infrastrukturfächen installiert. Solare Fernwärme kann die Anwendungen Raumwärme sowie Brauchwarmwasser decken. Zudem besteht die Möglichkeit, mit Großflächen-solarthermie Prozesswärme bereitzustellen. Dies ist in Deutschland für Temperaturbereiche von 20 °C bis 130 °C realisiert. (Ritter et al. 2019)

Der solare Deckungsgrad beschreibt den jährlichen Anteil in einem Fernwärmenetz, der durch Solarthermie bereitgestellt wird. Er ist von der Größe des Kollektorfeldes, von der Kapazität des Wärmespeichers und von der Verbrauchsstruktur abhängig. Durch die saisonal bedingte Verfügbarkeit decken Solarthermieanlagen vorwiegend den sommerlichen Wärmebedarf (z. B. Trinkwassererwärmung). Mit einem saisonalen Wärmespeicher kann der solare Deckungsgrad erhöht werden. Ohne saisonalen Wärmespeicher liegt der solare Deckungsgrad bei ungefähr 15 % bis 20 %, mit saisonalem Wärmespeicher können mehr als 50 % Deckung erreicht werden.

Technologie

Flachkollektoren bestehen aus dem Absorber, dem Kollektorgehäuse, einer Glasabdeckung und einer Wärmedämmung. Das Absorberblech wandelt die Einstrahlung in Wärme um. Eine Beschichtung sorgt dafür, dass möglichst viel Wärme aufgenommen (hohes Absorptionsvermögen) und möglichst wenig Wärme abgestrahlt wird (geringer Emissionsgrad).

Die Wärmedämmung auf der Rückseite und den Seitenflächen des Gehäuses verringern die Abstrahlverluste. Die Wärme wird über das Wärmeträgermedium im Solarkreislauf weiter zum Speicher oder Verbraucher transportiert. Die Solarflüssigkeit setzt sich aus Wasser und einem Frostschutzmittel (in der Regel Glykol) zusammen, damit die Anlage im Winter nicht durch ausfrierendes Wasser beschädigt wird.

Vorteile von Flachkollektoren liegen in der einfachen und damit wenig störanfälligen Technik und den im Vergleich zu Vakuumröhrenkollektoren niedrigeren Investitionskosten.

Der Nachteil von Flachkollektoren im Vergleich zu Vakuum-Röhrenkollektoren liegt in den größeren Abstrahlungsverlusten, die sich vor allem bei höheren Temperaturen im Kollektorfeld negativ bemerkbar machen.

Unter dem Sammelbegriff Vakuum-Röhrenkollektoren werden verschiedene Technologien und Aufbauten mit teils erheblich abweichenden Eigenschaften zusammengefasst. Gemeinsames Merkmal ist, dass die Isolierung zwischen Absorber und Außenluft durch ein Vakuum hergestellt wird.

Bei direkt durchströmten Vakuumröhrenkollektoren zirkuliert der Wärmeträger direkt im Glasröhrchen mit dem Absorber. Eine andere Röhrenkollektor-Bauweise ist der Heatpipe Kollektor. Hier durchströmt der Wärmeträger nicht direkt das Absorberrohr vom Solarthermie-Kollektor. Es verdampft ein Medium im Rohr und sammelt sich am oberen Ende des Rohrs. Dort wird

die Energie auf den eigentlichen Wärmeträger übergeben und über den Solarkreislauf abtransportiert. Der Dampf kühlt ab und sammelt sich wieder unten im Rohr.

Beim CPC-Kollektor (Compound Parabolic Concentrator) sind zwei Glasröhren als "Thermoskanne" zur Dewar-Röhre ausgebildet. Das Vakuum befindet sich nur innerhalb des Glasbehältnisses. Durch diese Bauweise wird eine typische Schwachstelle von einwandigen Vakuumröhrenkollektoren, die Dichtheit im Glas- und Metallübergang, eliminiert. Die Röhren liegen im CPC-Kollektor vor einem Parabolspiegel beziehungsweise einer Reflektorschicht, die das einfallende Licht auf die Röhren gebündelt zurückwirft und so die Leistung des Röhrenkollektors erhöht.

Der Nachteil von Vakuumröhrenkollektoren liegt in erster Linie in den deutlich höheren Investitionskosten.

Wirtschaftlichkeit

Die Kosten für die Wärmeerzeugung mit Solarthermieanlagen hängt von der Anlagengröße ab. Großflächensolarthermieanlagen sind ungefähr drei bis vier Mal wirtschaftlicher als kleine Dachanlagen.

Folgende Wärmegegestehungskosten sind in einer Studie von AEE INTEC und dem Fraunhofer ISE ermittelt worden (Mauthner et al. 2016):

- Kleine Dachanlagen (5 bis 10 m²): ca. 14,3 – 18,1 ct/kWh,
- Große Dachanlagen (20 bis 300 m²): ca. 8,9 – 13,4 ct/kWh,
- Große Freianlagen (5.000 bis 20.000 m²): ca. 3,7 – 4,6 ct/kWh.

A 5 Biogene Brennstoffe

Biomasse wird als die klimaneutrale Möglichkeit beschrieben, fossile Energieträger zu ersetzen. Die Bioenergiepotenziale für das Jahr 2050, die für energetische Zwecke zur Verfügung stehen, werden von der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe für den Bereich der Landwirtschaft auf insgesamt 988 PJ geschätzt. Die Abschätzung der Energieholzpotenziale wird auf knapp 700 PJ geschätzt.

Von den NawaRos aus der Landwirtschaft sind zwei Drittel noch ungenutzt. Von den Energieholzpotenzialen werden aktuell zwei Drittel genutzt. Zur Bioenergie zählt auch die Energiegewinnung aus Abfällen. 135 PJ werden fast vollständig aus Biomüll und Klärschlamm gewonnen.

Insgesamt beträgt der Anteil der Biomasse für die regenerative Wärmeerzeugung in Deutschland derzeit 86,1 % und liegt bei 175.000 GWh. Biogene Festbrennstoffe haben den größten Anteil und sorgen für 115.000 GWh.

Im Bereich der thermischen Nutzung biogener Brennstoffe kommen im Wesentlichen zwei Verfahren zum Einsatz. Einerseits die Nutzung in Form von Biogas oder Biomethan und andererseits die direkte Verbrennung von fester Biomasse in Heizkesseln.

Biogas wird aktuell in rund 9.000 zumeist landwirtschaftlichen Anlagen in Deutschland produziert. Einige Anlagen jedoch auch in der Abfallwirtschaft. Am weitesten verbreitet ist die direkte Nutzung von Biogas in Blockheizkraftwerken zur kombinierten Produktion von Strom und Wärme mit einem durch das EEG initiiertem Fokus auf die Stromproduktion. Dieser Entwicklungstrend hin zur stromgeführten Betriebsweise der KWK-Anlagen hat dazu geführt, dass die eigentlich sehr effiziente Technologie ihre Stärke nicht vollständig ausspielt. Während bei wärmegeführten Anlagen der Strom flexibel ins Stromnetz eingespeist werden kann, fällt bei stromgeführten Anlagen Wärme häufig dann an, wenn sie nicht genutzt werden kann. Zudem

bleibt ein Großteil der Wärme ungenutzt, da passende Abnehmer an den oft abgelegenen Standorten der Biogasanlagen, fehlen und so eine Wärmenutzung nur schwer realisierbar ist.

Zusätzlich besteht bei der Methanisierung die Möglichkeit, das Biogas aufzubereiten und anschließend ins Erdgasnetz einzuspeisen. Diese Technologie ist noch sehr teuer und kommt daher nur bei großen Anlagen (> 1 MW) zum Einsatz.

Bei der Verbrennung von Biomasse in Heizkesseln kommt in erster Linie Holz zum Einsatz. Neben Stückholz in dezentralen und eher kleinen Öfen werden zunehmend auch Holzpellets (in kleinen und mittleren Anlagen) und Holzhackschnitzel (vor allem in großen Anlagen) eingesetzt. Die Verbrennung von Stroh und ähnlicher Biomasse stellt aktuell eher ein Nischenprodukt dar.

Technologie Biogas

Bei der Ausgestaltung von Biogasanlagen gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Systeme, Techniken und Funktionsweisen. Die häufigste Form der Biogasanlagen in Deutschland ist die Nassfermentation.

Der Gärprozess in solchen Biogasanlagen findet in Fermentern statt. Dies sind luftdichte, wärmeisolierte und beheizte Gärbehälter, denen regelmäßig frische Biomasse zugeführt wird. Die im Fermenter befindlichen Bakterien wandeln die Biomasse zu Biogas und dem Gärrest um. Der Gärrest kann als wertvoller Dünger genutzt werden.

Die zur Biogaserzeugung eingesetzten Rohstoffe werden als Substrat bezeichnet. Geeignet ist jede Art von Biomasse, die unter anaeroben Bedingungen abgebaut wird. Die jeweilige chemische Zusammensetzung ist entscheidend für die erzeugbare Menge Biogas und den Methananteil. Die Methanausbeute der eingesetzten Substrate wirkt sich nicht nur auf den Methanertrag, sondern gemeinsam mit den Substratbeschaffungskosten direkt auf die Wirtschaftlichkeit aus.

Die durchschnittliche Substratzusammensetzung der Biogasanlagen und die Methanerträge für Biomethan sind in Tab. 17 und Tab. 18 gezeigt.

Für die Energieeffizienz der Biogasproduktion und Nutzung wird im Folgenden von einer Nutzung der biogenen Gase im BHKW mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 38 % und einem thermischen Wirkungsgrad von 44 % ausgegangen (Gesamtwirkungsgrad von 82 %). Diese Werte entsprechen mittleren Kennzahlen für Biogas/-methan-BHKWs (FNR lfd.) und stellen das theoretische Potenzial dar. Eine effiziente externe Nutzung der Wärme findet jedoch laut einer Studie der DBFZ (DBFZ 2019) nur zu etwa 40 % statt.

Wirtschaftlichkeit Biogas

Durch das EEG wird in erster Linie die Produktion von Strom gefördert. Die Wärmenutzung trägt oft nur zu einem geringen Teil zum Betriebsergebnis bei. In einigen EEG-Versionen gab es einen KWK-Bonus von rund 2 ct/kWh genutzter Wärme.

Für die Einspeisung in Nahwärmenetze können realistisch bis zu 5 ct/kWh Wärme erzielt werden. Bei höheren Preisen ist die Wärmeproduktion durch Solarthermie oder biogene Festbrennstoffe günstiger.

Entscheidend für die Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage sind also mehrere Faktoren:

- Methanertrag
- Substratkosten
- Stromvergütung
- Wärmevergütung

Biogasanlagen, die noch in der EEG-Laufzeit (20 Jahre) sind, haben durch den Stromverkauf zumeist ein gutes Auskommen. Für die Zeit nach der EEG-Vergütung wird eine sinnvolle Wärmevermarktung und eine angepasste Fahrweise der Biogasanlage (wärmegeführt, saisonal, mit Gasspeichern etc.) unumgänglich sein.

Technologie biogene Festbrennstoffe

Die Verbrennung von biogenen Festbrennstoffen – vornehmlich Holz – findet sowohl in kleinen dezentralen Holzöfen als auch in großen Hackschnitzel-Heizkesseln statt. Das Prinzip der direkten Verbrennung zur unmittelbaren Wärmeproduktion ist allen Anlagen gemein. Mit Ausnahme von kleinen luftgeführten Stückholzöfen (sogenannten Komfortöfen) sind die Systeme wassergeführt und transportieren die Wärme mittels längerer oder kürzerer Leitungen zu den Heizkörpern.

Moderne Holzheizungen auf Pellets- oder Hackschnitzelbasis funktionieren vollautomatisch. Die Anlieferung des Rohstoffes erfolgt mittels LKW in ein separates Lager. Von dort wird das Holz mittels Förderschnecke, Sauggebläse oder Schieber zum Heizkessel transportiert. Die entstehende Wärme wird in großzügig bemessenen Pufferspeichern als warmes Wasser gespeichert und von dort über einen Wärmetauscher an das Heizungssystem oder Wärmenetz übergeben.

Durch den Einsatz intelligenter Regelungstechnik und Lambda-Sonden findet eine effiziente Verbrennung mit sehr hohen Wirkungsgraden (90-96%) statt. Bei größeren Anlagen kommen auch verschiedene Abluffilteranlagen zum Einsatz, um die Belastung mit Luftschadstoffen und Feinstaub weiter zu minimieren.

Wirtschaftlichkeit biogene Festbrennstoffe

Hackschnitzelheizungen kommen zumeist ab einem Leistungsbedarf von 20 kW zum Einsatz. Pelletheizungen können auch für kleinere Einfamilienhäuser (< 10 kW) wirtschaftlich genutzt werden.

Die Anschaffungskosten sind in der Regel deutlich höher als bei herkömmlichen Öl- oder Gasheizanlagen. Die Brennstoffkosten hingegen sind sehr viel niedriger. Dementsprechend hängt die Amortisationszeit für die Anschaffung stark von den Rohstoffpreisen und dem Heizbedarf ab.

Zu den Anschaffungskosten kommen noch die Wartungskosten sowie die Kosten für den Schornsteinfeger hinzu.

Derzeit gibt es verschiedene Förderungen und Prämien für den Einbau einer Holzheizung.

A 6 Tiefengeothermie

Im Schnitt nimmt die Temperatur des Untergrunds pro 1.000 m vertikaler Tiefe um 30 K zu, stellenweise werden noch höhere Temperaturzuwächse erreicht. Die Nutzung von tiefen geothermischen Reservoiren, üblicherweise definiert ab einer Tiefe von 400 m, ist über einen Primärkreislauf von Förder- und Re-Injektionsbohrungen mit Wasser als Wärmeträgermedium möglich. Die tiefengeothermische Wärmeerzeugung bietet den Vorteil einer grundlastfähigen und steuerbaren Energiebereitstellung. Ihre Nutzbarkeit ist allerdings an die räumliche Überschneidung entsprechender Reservoire mit einer ausreichend hohen Wärmenachfrage gebunden, um den hohen Erschließungsaufwand zu refinanzieren.

Die bisherige Nutzung tiefer Geothermie in Deutschland konzentriert sich auf hydrothermale Reservoire in den drei Potenzialzonen norddeutsches Becken, Oberrheingraben und süddeutsches Molassebecken, mit einer starken Konzentration bestehender Projekte auf das

süddeutsche Molassebecken im Großraum München. Im Jahr 2018 waren in Deutschland insgesamt 346 MW_{th} an Fernwärmeerzeugungskapazität aus hydrothermalen Reservoiren, verteilt auf 38 Anlagen mit dem primären Zweck der Fernwärmelieferung mit einer Jahresproduktion von 1.009 GWh_{th} installiert.

Technologie

Bei der Tiefengeothermie werden vorhandene Heißwasserteilsysteme üblicherweise mit einer Dublette (zwei Bohrungen), einer Förderbohrung und einer auf Reservoir-Ebene um mehrere hundert Meter entfernten Re-Injektionsbohrung, erschlossen. Mittlerweile werden neue Projekte im Großraum München mit günstigen geologischen Ausgangsbedingungen auch mit mehreren abgelenkten Bohrungen von einem Bohrplatz aus konzipiert, wodurch punktuell noch höhere Leistungen erschlossen und Skaleneffekte bei der Erschließung genutzt werden können. Die im Förderwasser enthaltene Energie kann bei ausreichendem Temperaturniveau (> 100 °C) und ausreichender Förderrate zur Stromerzeugung in Organic Rankine Cycle (ORC)- oder Kalina-Anlagen genutzt werden. Eine direkte Wärmenutzung über Wärmetauscher und eine Einspeisung in Wärmenetze ist auch bei niedrigeren Temperaturniveaus, die durch die Betriebstemperaturen der Wärmenetze bestimmt werden, möglich (Kaltschmitt 2014). Niedrige Netztemperaturen sind daher für eine effizientere und breitere Erschließung tiefer Geothermie förderlich. Zur Temperaturerhöhung werden in einigen Fällen Aufwertungsoptionen (Wärmepumpen oder Abwärme) genutzt. Dadurch lassen sich geothermische Ressourcen auch nutzen, wenn die Thermalwassertemperatur unter der des Wärmenetzes liegt, allerdings ist die Effizienz in solchen Fällen meist geringer als bei direkter Nutzung. (Sandrock et al. 2020)

Zentrale Parameter für die Effizienz von Tiefengeothermieprojekten auf der Angebotsseite sind eine möglichst hohe Temperaturspreizung zwischen Reservoir und Wärmesenke und die realisierbare Förderrate des Heißwassers, aus deren Kombination sich die erreichbare thermische Leistung ergibt. Die Bohrtiefe und die oberirdische Transportdistanz bestimmen neben der Anlagenauslastung die Wärmegestehungskosten maßgeblich – diese Parameter weisen auf Grund möglicher kleinräumiger geologischer Unterschiede eine vergleichsweise hohe Varianz auf und machen aufwendige Voruntersuchungen bzw. eine umfassende Risikoabsicherung erforderlich.

Wirtschaftlichkeit

Tiefengeothermie-Projekte sind geprägt von eher hohen Investitionskosten und geringeren Betriebskosten. Für die Gesamtkosten bestimmend sind die Kosten der Tiefenbohrung sowie ggf. die der Erschließung eines Fernwärmenetzes. Für den wirtschaftlichen Betrieb einer geothermischen Heizanlage ist es erstrebenswert, die Wärme möglichst ganzjährig zu nutzen. Besonders effizient aus ökonomischer sowie technischer Sicht ist auch die Nutzung der Wärme hintereinander auf verschiedenen Temperaturniveaus (Kaskadenprinzip), beispielsweise in der Kombination Fernwärme (90 – 60 °C), Gewächshäuser (60 – 30 °C) und Fischzucht (unter 30 °C).

Die Bohrkosten hängen von der Bohrtiefe und von den lokalen geologischen Bedingungen ab. An Standorten mit erhöhten Temperaturgradienten können geringere Bohrtiefen erforderlich sein und damit niedrigere Bohrkosten entstehen. Die Investitionskosten für die tiefengeothermische Wärmeerzeugung betragen etwa 1.750 €/kW_{th} (ILF Consulting Engineers Austria GmbH 2017).

A 7 Gebäudeeffizienz

Eine zentrale Stellschraube für die Erreichung der Klimaschutzziele bis 2050 ist die Erhöhung der Energieeffizienz in Gebäuden. Denn die günstigste Energie mit den geringsten negativen Auswirkungen ist immer die, die nicht verbraucht wird. Die wichtigste Energieform im Gebäudereich ist die Wärme. Laut BMWI verbrauchen wir rund 35 Prozent der verbrauchten Endenergie in den eigenen vier Wänden, vor allem für Heizung und Warmwasser. Dabei gilt: Wo viel verbraucht wird, lässt sich auch viel einsparen.

Im Neubaubereich werden die energetischen Standards durch die Energieeinsparverordnung (EnEV) und das erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) definiert und entsprechend umgesetzt.

Für den Gebäudebestand sollte die Sanierungsrate im Bestand im Bereich der energetischen Dämmung von derzeit unter 1 % auf über 2 % gesteigert werden. Maßnahmen sind die Dämmung von Fassaden, Dachstühlen, Kellerräumen und der Austausch von Fenstern.

Dämmung

Derzeit werden für die Dämmung von Fassaden hauptsächlich Dämmstoffe auf Basis fossiler und mineralischer Materialien eingesetzt. Der Marktanteil der mineralischen oder fossilen Dämmstoffe beträgt aktuell noch etwa 95%. Dämmprodukte aus NawaRo haben verschiedene Vorteile im Vergleich zu den üblichen Kunststoffmaterialien. Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen haben in der Regel eine gute Ökobilanz, schonen Ressourcen und sind oftmals regional verfügbar.

Pflanzliche Dämmstoffe tragen zudem zum Klimaschutz bei, da das eingelagerte CO₂ im Dämmstoff über einen langen Zeitraum gebunden bleibt. Nach der Verwendung kann das Dämmmaterial thermisch verwertet werden.

Bei den eingesetzten Materialien wird zwischen einjährigen pflanzlichen Dämmstoffen (z. B. Hanf und Stroh) und mehrjährigen (Holz und holzige Derivate) unterschieden. NawaRos haben unmittelbar Auswirkungen auf Natur und Landschaft.

Der Marktanteil der mineralischen oder fossilen Dämmstoffe beträgt aktuell noch etwa 95 %. Wichtig ist die Klarstellung, dass auch Dämmstoffe auf mineralischer oder fossiler Basis trotz energieintensiven Ausgangsstoffen für die Herstellung der Produkte die Energieeinspareffekte während der Gebäudenutzung in wenigen Jahren amortisieren. Der Einsatz von diesen Dämmstoffen ist gerechtfertigt und für die Erreichung der Klimaziele notwendig.

Die Kosten einer energetischen Sanierung hängen vom konkreten Gebäude ab, von seiner Größe, seiner allgemeinen Beschaffenheit sowie von den gewählten Techniken und verwendeten Materialien. Eine allgemeingültige Einschätzung des Verhältnisses anfänglicher Investitionskosten zu zukünftigen Energieeinsparungen lässt sich deshalb konkret nur im Einzelfall abgeben.

Eine von der KfW bei Prognos in Auftrag gegebene Studie (Böhmer et al. 2013) kommt zu dem Ergebnis, dass die durch die energetische Sanierung vermiedenen Energiekosten nicht nur die energiebedingten Mehrkosten, sondern darüber hinaus auch die Hälfte der ohnehin, also für andere Maßnahmen, anfallenden Sanierungskosten decken.

Zellulose hat die größte Bedeutung bei den ökologischen Dämmstoffen mit einem Marktanteil von 32 %. Ausgangsmaterial ist Altpapier, das in Form von Platten oder als lose Fasern angeboten wird. Der Dämmwert liegt bei 0,040 bis 0,045 Watt pro Meter und Kelvin. Der Recyclingstoff hat keine unmittelbaren Auswirkungen auf Umwelt und Natur.

Holzfaserdämmplatten oder Holzweichfaserplatten werden industriell aus Sägerestholz oder Hackschnitzeln gefertigt. Ihr Marktanteil beträgt 28 %. Holzfaser eignet sich für Dach-, Fassaden- und Innendämmung. Der Dämmwert liegt zwischen 0,040 und 0,055 Watt pro Meter und Kelvin.

Wiesengras zählt zu den einjährigen pflanzlichen Dämmmaterialien. Der Rohstoff ist ökologisch vorteilhaft, da das Ausgangsmaterial schnell wächst und flächenextensiv ist.

Natürlich abgestorbene Pflanzenreste von Seegras werden durch Wellenbewegungen zu Bällen geformt und angespült. Der Rohstoff hat keinerlei sonstige Nutzung. Der Energieaufwand zur Herstellung ist gering, doch die langen Transportwege sind für die Ökobilanz von Nachteil.

Gründächer und Fassadenbegrünung

Auch Gründächer und Fassadenbegrünung können zur Steigerung der Energieeffizienz eingesetzt werden.

Unter dem Begriff der Stadtnatur werden Lebensräume und Biotope zusammengefasst, die in urbanen Räumen entstehen. Gründächer und Fassadenbegrünungen sind Teil dieser neu geschaffenen Lebensräume an Gebäuden. Dachbegrünungen und Fassadenbegrünungen übernehmen dabei unterschiedliche Funktionen, die sich unmittelbar auf Lebensräume, aber auch auf Energieaspekte am Gebäude bzw. auf das Mikroklima um das Gebäude herum auswirken. Dies hat Einfluss auf den Energiebedarf und die Effizienzleistung der Gebäude. Im Folgenden wird beschrieben, welche unterschiedlichen Gründächer bzw. Fassadenbegrünungen Stand der Technik sind und wie sich dies auf die Energieeffizienz und den Wärme-/ Kühlbedarf auswirkt.

Fassaden- und Dachbegrünungen sind für alle Gebäudetypen anwendbar und eignen sich sowohl für Wohngebäude wie auch gewerblich genutzte Gebäude. Architektonisch können Gebäude mit Gründächern und Fassadenbegrünungen im Urbanen Raum eine abmildernde Landschaftswirkung haben.

Extensive Dachbegrünungen

Extensivbegrünungen zeichnen sich durch einfach angelegte und gestaltete Dächer mit pflegeleichten und trockenheitsangepassten Pflanzen aus. Die Dachbegrünungen können mit geringem Aufwand betrieben werden. Niedriger Pflanzenwuchs und geringe Aufbauhöhe sorgen für ein geringes Gewicht je m² Dachfläche. Extensive Dachbegrünungen können sowohl für Flachdächer wie auch für Satteldächer (Dächer mit Neigung) realisiert werden. Pflanzen, die sich für extensiv genutzte Bepflanzungen eignen, sind aus der Familie der Dickblattgewächse, Nelkengewächse, Lippenblütler (z. B. echter Dost), Rosengewächse (z. B. Frühlingsfingerkraut), Süßgräser oder Lauchgewächse (z. B. Schnittlauch). Die Substratauflage beträgt 8 bis 10 cm.

Einfach-intensive und intensive Dachbegrünung

Für diesen Typ der Bepflanzung muss die Substratauflage deutlich größer sein als bei einer Extensivbegrünung und beträgt in den beiden Kategorien eine Stärke von 15 bis 25 cm bzw. von bis zu 80 cm. Zusätzlich zu den genannten Arten in der Extensivbegrünung werden bei einer intensiven Begrünung Gräser, niedrigwachsende Stauden und Sträucher angepflanzt. Die Dachlast beträgt bis zu 250 kg/m². In der Kategorie intensiv-begrünte Flächen können flachwurzelnde (Tellerwurzel) Bäume wachsen, z. B. auf Tiefgaragendächern. Wegen der hohen Last von über 300 kg/m² eignen sich hierfür aus statistischen Gründen Flachdächer bzw. Dächer mit einer Neigung von maximal 5°.

Wegen des erhöhten Pflegeaufwands der intensiven Begrünung fallen die Unterhaltskosten dafür höher aus.

Fassaden:

Bei Fassadenbegrünungen werden zwei Begrünungstechniken unterschieden. Bodengebundene Begrünungen wurzeln im Boden und ranken (z. B. Hopfenarten) bzw. erklimmen (z. B. Efeu, Wilder Wein) die Fassaden mit oder ohne zusätzliche Hilfen. Ein spezielles Bewässerungssystem ist nicht nötig. Mit dem Bodenanschluss und einem möglichen Gründach ist über die Fassadenbegrünung eine Verbindung möglich.

Wandgebundene Begrünungen unterscheiden sich von bodengebundenen Systemen dadurch, dass zusätzliche Pflanzkübel/- Container an der Fassade angebracht sind. Alternativen (seltener) sind Techniken mit Wandmatten und Wandplatten bzw. senkrecht aufgebaute zusätzliche Wandverschalungen.

Bewässerungssysteme müssen zusätzlich geplant werden, die Kosten für eine wandgebundene Begrünung fallen höher aus.

Fassaden- und Dachbegrünungen sind für alle Gebäudetypen anwendbar und eignen sich sowohl für Wohngebäude wie auch gewerblich genutzte Gebäude. Architektonisch können Gebäude mit Gründächern und Fassadenbegrünungen im Urbanen Raum eine abmildernde Landschaftswirkung haben.

Fassaden- und Dachbegrünungen wirken sich unmittelbar auf die Dämmleistung eines Gebäudes aus. So können Heizkosten reduziert werden und im Sommer Kühleffekte durch die Verdunstung und Verschattung erzielt werden.

Jedoch können nur einfach-intensive und intensive begrünte Dächer eine entsprechende Verdunstungsleistung erbringen. Extensive Dachbegrünungen, die am weitesten verbreitete Begrünungsart, werden vorwiegend als Trockenstandorte konzipiert. Extensive Dachbegrünungen haben bei trocken-heißer Witterung im Sommer wegen der geringen Substratauflage die geringsten Kühleffekte, da der Feuchtegehalt bei einer Substratdicke von max. 10 cm eher gering ist.

Über das KfW-Programm „Energieeffizientes Sanieren“ werden die Anlage von Gründächern mit gefördert. Es wird allerdings darauf hingewiesen, dass das Kriterium für eine Förderung die Einhaltung des U-Wertes von 0,14 ist. Inwiefern ein Gründach mit dazu beitragen kann und welche technischen Voraussetzungen erfüllt sein müssen, wird dabei nicht näher beschrieben. Dies erlaubt dem Vorhabensträger die freie Wahl der Dämmung und ermöglicht auch die Anlage eines Gründachs.

Die Bewertung der Dämmmaßnahme erfolgt über einen Sachverständigen oder akkreditierten Energieberater.

Besonders interessant ist die Kombination aus Dachbegrünung und energetischer Nutzung der Solarenergie. Die Installation von Solaranlagen ist bei extensiven Dachbegrünungen möglich oder je nach Aufständervarianten auch bei einfach-intensiven Dachbegrünungen mit niedrig wachsenden Gräsern und Stauden möglich. Eine Verschattung der Anlagen sollte vermieden werden. Für den Einsatz von PV-Anlagen auf Gründächern spricht das höhere Wasserrückhaltevermögen der Dächer und die damit verbundenen Verdunstungsleistungen, die zur Kühlung der PV-Anlage beitragen können. Die Kühleffekte können den Wirkungsgrad einer Photovoltaikanlage von bis zu 3 % erhöhen.

Inwiefern die Kombination von einer solarthermischen Anlage mit einem Gründach sich auswirkt, ist hingegen nicht ausreichend untersucht. Fassadenbegrünungen erlauben keine Fassaden-PV und werden daher nicht betrachtet.

A 8 Wärmenetze und Effizienzmaßnahmen in Wärmenetzen

Neben der Erschließung erneuerbarer Energiequellen zur Wärmeerzeugung und der Erhöhung der Gebäudeeffizienz besteht auch Potenzial in der Weiterentwicklung der netzgebundenen Verteilung von Wärme. Besondere Bedeutung hat die Transformation der Bestandsnetze zu niedrigeren Temperaturen.

Auch im Neubau dominieren derzeit noch Wärmenetze mit hohen Temperaturen. Langfristig wird die Entwicklung zu intersektoralen Smart-Grids (ab Wärmenetze 4. Generation) mit bidirektionaler Erzeuger- und Verbraucherstruktur führen. Diese Wärmenetze können die Wärmequellen und -senken durch eine verbesserte Speichertechnik auf niedrigem Temperaturniveau aufeinander abstimmen.

Der Um- und Ausbau der zentralen Wärmeversorgung über Wärmenetze ermöglicht die verstärkte Integration erneuerbarer Energiequellen sowie die Nutzung von Abwärme. Viele erneuerbare Wärmetechnologien sind wirtschaftlicher und effizienter, wenn sie als zentrale Erzeugereinheiten in Verbindung mit Wärmenetzen betrieben werden. Abwärme aus Industrie und Gewerbe sowie tiefe Geothermie und Großwärmepumpen können faktisch nur über Wärmenetze genutzt werden, bei anderen Technologien, wie z. B. bei der Solarthermie, sind auf diese Weise energetische und ökonomische Vorteile erzielbar.

Um die beschriebenen klimafreundlichen Technologien zur Fernwärmeerzeugung nutzen zu können, sind die Wärmenetze so zu gestalten, dass möglichst niedrige Hindernisse zur Einbindung der Wärme aus EE-Anlagen bestehen. Das betrifft vor allem die Betriebsparameter der Netze wie das Druck- und insbesondere das Temperaturniveau, die so gering wie möglich sein sollten.

LowEx-Netze und kalte Wärmenetze

Bei der Entwicklung der Netzsysteme geht die Entwicklung langfristig hin zu Wärmenetzen, die mit niedrigeren Netztemperaturen auskommen (LowEx-Netze). In den vergangenen Jahren wurden bereits zahlreiche solche Netze realisiert, ihr Anteil an der Fernwärme sowie ihre Trassenlänge ist insgesamt jedoch noch sehr gering. Typischerweise haben LowEx-Netze Vorlauftemperaturen von etwa 40 bis 65 °C und Rücklauftemperaturen von 25 bis 40 °C. Neben der effizienteren Einbindung von erneuerbaren Wärmequellen reduzieren sich auch die Wärmeleitungsverluste bei diesen Netzen drastisch.

Vergleichsweise neu ist die Entwicklung von kalten Wärmenetzen, die ein Medium zu den Gebäuden leiten, das erst dort über dezentrale Wärmepumpen auf Nutztemperatur gebracht wird. Typische Vorlauftemperaturen sind 15 bis 25 °C. Das Wärmenetz-Medium weist eine so niedrige Temperatur auf, dass das Rohrnetz ohne Wärmedämmung und nur mit geringer dynamischer Beanspruchung durch Temperaturwechsel realisiert werden kann. Bei den einzelnen Verbrauchern kann dann durch den Einsatz von Wärmepumpen Wärme auf höherem Temperaturniveau erzeugt werden.

Hybriden Wärme- und Kältenetze der fünften Generation (5GDHC) sind dezentrale, bidirektionale und kalte Netze, die einen Austausch der Wärme bzw. Kälte zwischen den angeschlossenen Gebäuden ermöglichen. Die grundlegende Idee des hybriden Konzepts ist, dass der Fokus nicht auf einem zentralen Erzeuger(park) liegt, der Wärme bzw. Kälte auf einem bestimmten Temperatur- und Druckniveau bereitstellt, sondern stattdessen viele dezentrale Subakteure interagieren und Energie miteinander austauschen. (Boesten et al. 2019)

Effizienzmaßnahmen in Wärmenetzen

Die Vorlauftemperatur wird nach verschiedenen Kriterien (z. B. Kundenbedürfnis, Netzkapazität, Temperaturbeständigkeit der Rohrleitungen) determiniert. In der Regel wird die

Vorlauftemperatur gleitend über die Außentemperatur gefahren und im Sommer abgesenkt. Eine Absenkung der Netzvorlauftemperatur verringert zwar die Wärmeverluste, bleibt aber in ihrem Senkungspotenzial zumeist beschränkt auf die für die Einhaltung der Trinkwasserhygiene erforderlichen minimalen Temperaturen. Erfolgt die Trinkwarmwassererwärmung dezentral (beispielsweise über Durchlauferhitzer) oder wird ein Filtrationsverfahren (z. B. Ultrafiltration) angewendet, können die Temperaturen weiter abgesenkt werden.

Die Rücklauftemperatur wird auch auf Kundenseite festgelegt. Typ, Qualität und Betriebsweise des kundenseitigen Wärmeverteilsystems nehmen Einfluss auf die Rücklauftemperatur. Versorger können über tarifliche Strukturen Anreize setzen für möglichst niedrige Rücklauftemperaturen. Auch die Digitalisierung der Messung an Kundenanlagen bietet erhebliche Potenziale zur Identifizierung unnötig hoher Rücklauftemperaturen bei Kunden.

Auch wenn die Absenkung der Vorlauftemperatur für die Einbindung erneuerbarer Niedertemperaturwärmequellen besonders vorteilhaft ist, so kann in der Praxis die Vorlauftemperatur nur in Abhängigkeit der Rücklauftemperatur abgesenkt werden, um die Wärmelieferung konstant zu halten. Zunächst sollte die Absenkung der Rücklauftemperaturen von einzelnen (Groß-)Kunden über Netzteile bis hin zum gesamten Verteilnetz stattfinden. Erst wenn ein Netzabschnitt auf niedrigere Rücklauftemperaturen abgesenkt wurde, können die Vorlauftemperaturen in gewachsenen Netzen schrittweise gesenkt werden.

Zudem müssen die Heizanlagen auf der Kundenseite in der Lage sein, mit niedrigeren Vorlauftemperaturen betrieben zu werden. Große Heizflächen wie beispielsweise Fußbodenheizungen können eher mit niedrigen Vorlauftemperaturen betrieben werden, während kleine Radiatoren höhere Vorlauftemperaturen benötigen.

Neben der Absenkung der Rücklauftemperatur und der Vorlauftemperatur kann auch die Versorgung eines Sekundärnetzes aus dem Rücklauf einer Primärnetzes zu einer Absenkung des Temperaturniveaus führen und zu einer gesteigerten Effizienz führen. (Li et al. 2018)

A 9 Saisonale Wärmespeicher

Wärmespeicher können sowohl die Wirtschaftlichkeit bei immer volatileren Strompreisen in einem KWK-basierten Wärmesystem erhöhen als auch in einem von erneuerbaren Energien geprägten Wärmesystem zeitlich fluktuierende Wärmequellen einbinden. Für hohe Anteile an erneuerbaren Energien und Abwärme ist die Speicherung von Wärme nötig, um das ungleichmäßig verteilte Wärmedargebot an die Wärmenachfrage anzupassen. Viele Energiequellen fallen gleichmäßig über das ganze Jahr an (Industrieabwärme, Müllverbrennung, Umweltwärme) oder sind konzentriert auf das Sommerhalbjahr (Solarthermie). Ohne saisonale Verschiebung des Dargebots zur Wärmelast im Winterhalbjahr würden sich die Energiequellen teilweise gegenseitig kannibalisieren und deren Nutzung würde spezifisch teurer.

Während Tages- und Kurzzeitspeicher zur Versorgungssicherheit und Steigerung der Flexibilität bei KWK-Anlagen dienen und sich als oberirdische Stahlspeicher in der Fernwärmewirtschaft immer stärker durchsetzen, spielen Langzeit-Wärmespeicher eine wichtige Rolle bei der Integration von saisonal schwankenden EE-Wärmequellen wie der Solarthermie.

Vier Bauarten haben sich weitestgehend etabliert und sind Stand der Technik.

Behälterwärmespeicher

Der Behälterwärmespeicher ist nahezu unabhängig von geologischen Standortbedingungen und kann auch bei verhältnismäßig kleinen Baugrößen von $< 3.000 \text{ m}^3$ eingesetzt werden. Mit zunehmender Größe verbessert sich i. d. R. das Oberflächen-zu-Volumenverhältnis, was zu geringeren Wärmeverlusten führt. In der Regel werden reine Heißwasserspeicher als

Behälterspeicher aus Stahlbeton oder Betonfertigteilen ausgeführt werden und teilweise in das Erdreich eingebaut bzw. in die Landschaft des Baugebiets integriert.

Die Speicher werden drucklos im Temperaturbereich bis ca. 95 °C betrieben und nutzen Wasser als Speichermedium. Es werden hohe volumenspezifische Speicherkapazitäten von 60-80 kWh/m³ erreicht. In Deutschland wurden Behälter-Wärmespeicher in Hamburg, Friedrichshafen, Hannover und München mit Volumina zwischen 2.750 und 12.000 m³ realisiert.

Erdbeckenwärmespeicher

Erdbeckenwärmespeicher nutzen Wasser oder ein Gemisch aus Kies oder Sand und Wasser als Speichermedium. Sie werden in Erdbecken oder Gruben verbaut und bestehen aus einem großen, abgeschlossenen und (teil-)gedämmten Erdbecken. Eine entsprechende Dämmwirkung wird vor allem durch die wasserdichte Auskleidung des Erdbeckens durch eine Dichtefolie erzielt.

Wird als Wärmeträgermedium ein Gemisch aus Wasser und Sand oder Kies verwendet, verbessern sich die Baustatik des Speichers und die mögliche Belastbarkeit für die Nutzbarkeit des Speicherdeckels. Jedoch resultiert aus der geringeren spezifischen Wärmekapazität des Gemisches ein gegenüber Heißwasserspeichern um bis zu 50 % größeres erforderliches Speichervolumen. Zudem entsteht durch die höhere thermische Leitfähigkeit des Gemisches gegenüber reinem Wasser ein geringeres Schichtungsvermögen. Je höher der Kiesanteil, desto stärker wirken sich diese Effekte aus.

In Deutschland wurden in Augsburg, Steinfurt, Chemnitz und Eggenstein Kies-Wasser-Wärmespeicher mit Volumina von 1.500-8.000 m³ umgesetzt. Die spezifische Wärmespeicherkapazität von Kies-Erdbeckenwärmespeichern beträgt etwa 30-50 kWh/m³. Reine Wasser-Erdbecken-Wärmespeicher nach dänischem Vorbild erreichen Speicherkapazitäten von 60-80 kWh/m³, unter zusätzlicher Rückkühlung über eine Wärmepumpe kann die Kapazität deutlich erhöht werden.

Erdsondenwärmespeicher

Erdsondenwärmespeicher nutzen das Erdreich bzw. das Gestein im Untergrund als Speichermedium. Erdsonden werden in vertikal oder schräg verlaufenden Bohrungen ins Erdreich eingegossen und verfüllt. Um die Wärme in den bzw. aus dem Untergrund zu leiten, werden die Erdwärmesonden mit einem Wärmeträgermedium (z. B. Glykol) durchflossen. Die Baukosten für Erdsonden-Wärmespeicher sind gering und können technisch an ein wachsendes System angepasst werden.

Zugleich hat dieser Speichertyp mit 15-30 kWh/m³ das geringste volumenbezogene Speichervermögen und erfährt eine relativ schnell abfallende Entladeleistung, weswegen Systeme mit Erdsonden-Wärmespeichern zumeist über einen zusätzlichen Pufferspeicher verfügen.

Erdsondenwärmespeicher sind in Deutschland in Neckarsulm, Crailsheim und Attenkirchen (Hybrid-Speicher) mit Volumina von 9.350-63.360 m³ realisiert.

Aquiferwärmespeicher

Aquiferwärmespeicher nutzen für die Speicherung natürliche grundwasserführende Formationen im Untergrund und sind zumeist über eine Dublette (zwei Bohrungen) erschlossen. Die spezifischen Speicherkosten von Aquifer-Wärmespeichern sind im Vergleich zu Erdsonden Speichern etwa um den Faktor 5-10, im Vergleich zu oberirdischen Speichern etwa um den Faktor 20 niedriger. (Holstenkamp, Strodel et al. 2016). Die mittlere volumetrische Wärmespeicherkapazität dieses Speichertyps liegt in Abhängigkeit der Porosität etwa zwischen 30-40 kWh/m³. Weiterhin entschärfen Aquifer-Wärmespeicher durch den sehr geringen

oberirdischen Raumbedarf die innerstädtische Flächennutzungskonkurrenz und ermöglichen die Speicherung von sehr großen Energiemengen bei moderaten Wärmeverlusten.

Ein wesentliches Hemmnis für den breiten Marktzugang dieses Speichertyps sind das sogenannte Fündigkeitsrisiko²⁸ und die hohen Anfangsinvestition im Vorfeld einer möglichen Umsetzung, z. B. für Probebohrungen und Zirkulationstests. Im Gegensatz zu Explorationsbohrungen der Kohlen-Wasserstoff-Industrie, die durch einen Risikofonds abgesichert werden können, trägt das Investitionsrisiko für die geothermische Nutzung von Aquiferen als Speicher allein der Betreiber. Unternehmen der Kohlen-Wasserstoff-Industrie machen in der Regel das Privat- und Betriebsgeheimnis geltend, so dass die für die Speichernutzung notwendigen Untergrund- und Bohrlochinformationen nur käuflich erworben werden können. Alternative, geophysikalische Vorerkundungen durch 3D-Reflexionsseismik-Messungen können im siebenstelligen Euro-Bereich liegen und stellen ebenfalls ein Investitionshemmnis dar. (Strodel 2018)

Derzeit gibt es in Deutschland Untersuchungen zur standortspezifischen Aquifer-Wärmespeicherung in Berlin, Lüneburg, Dingolfing und Karlsruhe (Holstenkamp, Strodel et al. 2016). Europaweit gibt es nach Schätzungen etwa 3.000 in Betrieb befindliche Aquiferspeicher, wovon etwa 100 in Wärmenetze eingebunden sind. (Fleuchaus et al. 2018) Über 99 % dieser Aquifer-Speicher werden mit einer durchschnittlichen Einspeichertemperatur von unter 25 °C betrieben. Aquifer-Wärmespeicher mit nutzbaren Speichertemperaturen von über 30 °C wurden in sechs Projekten umgesetzt. (HEATSTORE 2019)

Wirtschaftlichkeit

Die Langzeit-Wärmespeicherung ist gegenwärtig bis auf wenige Ausnahmen nur durch die dargestellten sensiblen Wärmespeicher als Saisonspeicher wirtschaftlich realisierbar und konkurrenzfähig. Grundsätzlich sind Saisonspeicher von dem Dilemma betroffen, dass die Wirtschaftlichkeit maßgeblich von der Zyklanzahl bestimmt wird (Rathgeber 2016). Je größer die Zahl der Speicherzyklen ist, desto eher wird eine wirtschaftliche Betriebsweise eines Speichers erreicht. Per Definition ist ein saisonaler Wärmespeicher auf wenige Zyklen im Jahr beschränkt und die wirtschaftliche Betriebsweise ist im Regelfall nur durch Skaleneffekte und/oder gutes Effizienzverhalten erreichbar.

²⁸ Das Risiko, ein geothermisches Reservoir mit einer oder mehreren Bohrungen in nicht ausreichender Quantität (z. B. Förderrate) oder Qualität (z. B. ungünstige Zusammensetzung des Formationswassers) zu erschließen.