

Hochschule Bremen
Fakultät 2: Architektur, Bau und Umwelt
Zukunftsfähige Energie- und Umweltsysteme M.Eng.
Sommersemester 2022

Masterarbeit zum Thema:

Wasserverfügbarkeit im Kontext der Wandlung des Energiemarktes -
Bewertung des Wasserbedarfes von Energiebereitstellungstechnologien in
Deutschland

Vorgelegt von: Pia Niebel
[REDACTED]
[REDACTED] Magdeburg
Matrikelnummer: [REDACTED]
E-Mail: pniebel@stud.hs-bremen.de

Vorgelegt am: 17.10.2022
Erstprüfer: Prof. Dr. Jürgen Knies
Zweitprüfer: Sebastian Jentsch, M.Sc.

**Aufgabenstellung zur Masterarbeit
von Frau Pia Niebel (Matr.-Nr. 5008943)**

**„Wasserverfügbarkeit im Kontext der Wandlung des Energiemarktes–
Bewertung des Wasserbedarfes von Energiebereitstellungstechnologien in
Deutschland“**

Der Strukturwandel, sowie der Ausbau an erneuerbaren Energien, führt in den kommenden Jahren und Jahrzehnten zu einer tiefgreifenden Umstrukturierung des Energiemarktes. Die bisher, als auch in Zukunft eingesetzten Technologien zur Erzeugung, Speicherung und Nutzung der Energien sind dabei oftmals an die Ressource Wasser gebunden. Beispielsweise für die Dampfnutzung in Kohlekraftwerken, aber auch im Rahmen der Wasserstoffherzeugung in Form der Elektrolyse. Durch die Wandlung des Energiemarktes werden sich perspektivisch auch die Wasserbedarfe verschieben, was eine Anpassung von wasserwirtschaftlichen Systemen zur Folge hat.

Die Neuausrichtung des deutschen Energiemarktes kann zudem das Potenzial einer Reduzierung des Verbrauchs an deutschen Wasserressourcen bieten. Zudem bietet die wasserwirtschaftliche Infrastruktur eine Vielzahl günstiger Voraussetzungen, um energiewirtschaftlich relevante Systemdienstleistungen im Rahmen der Energiewende zur erbringen.

Ziel der Arbeit ist es, die aktuelle Bedarfssituation von Wasser im Kontext der gesamtdeutschen Energieerzeugung darzustellen, sowie mögliche Verschiebungspotentiale für die Ressource Wasser auf Basis des Ausbaus an erneuerbaren Energien zu identifizieren. Die möglichen Auswirkungen sollen dabei erläutert und Empfehlungen zur Lösung von Versorgungsproblematiken abgeleitet werden.

Teilschritte der Bearbeitung:

- Literaturrecherche zur Energieerzeugung in Deutschland mit Fokus auf die erforderlichen Wasserbedarfe
- Recherche und Bewertung der Ausbaustrategien erneuerbarer Energien in Deutschland
- Identifikation von neuen Wasserbedarfsmengen durch Aufschlüsselung der Wasserbezüge durch die regenerative Energiewirtschaft
- Darstellung der Konkurrenzsituationen des Wasserbedarfs zwischen Energiebereitstellungstechnologien und Ableitung von Szenarien zur Lösung möglicher Versorgungsproblematiken
- Schriftliche Darlegung und Diskussion, sowie Präsentation der Ergebnisse

Erklärung über das eigenständige Erstellen der Arbeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen wurden, sind durch Angaben der Herkunft kenntlich gemacht.

Diese Erklärung erstreckt sich auch auf in der Arbeit enthaltene Grafiken, Skizzen, bildliche Darstellungen sowie auf Quellen aus dem Internet.

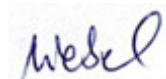
Die Arbeit habe ich in gleicher oder ähnlicher Form auch auszugsweise noch nicht als Bestandteil einer Prüfungs- oder Studienleistung vorgelegt.

Ich versichere, dass die eingereichte elektronische Version der Arbeit vollständig mit der Druckversion übereinstimmt.

Pia Niebel

Matrikelnr.: XXXXXXXXXX

Bremen, den 17.10.2022



Unterschrift Studentin

Kurzfassung

Die Eindämmung der globalen Klimakrise soll über die Reduktion der Treibhausgasemissionen bis hin zur Klimaneutralität erfolgen. Neben dem Ziel, mehr erneuerbare Energien zu integrieren, muss auch das Wasserthema mit betrachtet werden. Energie- und Wasserversorgung stehen in enger Wechselwirkung, aber es fehlen reale und verlässliche Daten zu den Wasserbedarfen von Energiebereitstellungstechnologien. In der vorliegenden Masterthesis werden technologieabhängige Wassernutzungen und -verbräuche untersucht. Leitfrage ist, ob die angestrebten Ausbauziele für die Energiewirtschaft vereinbar mit der Wasserverfügbarkeit in Deutschland sind und welche Folgen sich aus der Energiewende unter Einbezug der Klimafolgen ergeben.

Die verwendete Methodik basiert auf der Vorgehensweise einer Ökobilanzierung, erweitert durch eine Nachhaltigkeitsbewertung. Ausgehend von der Beispielregion Bremen wird eine Skalierung auf Deutschland vorgenommen. Die Datengüte für den Wasserbedarf in Bremen unter Einbezug der im Rahmen der vorliegenden Arbeit erhobenen aquatischen Kennzahlen ist mit 0,75 als belastbar einzuschätzen. Auf Basis von Literaturwerten sind die Ergebnisse für Bremen hingegen nur bedingt belastbar (0,375). Bei der Skalierung der Werte für Deutschland ist die Güte mit 0,125 bestimmt, was ebenso eine bedingte Belastbarkeit darstellt.

Der Wasserbedarf konnte nicht für alle Energiebereitstellungstechnologien in Bremen erhoben werden. Es wird ökologisch, ökonomisch und sozio-kulturell herausgearbeitet, dass erneuerbare Energiebereitstellungstechnologien und somit auch die Ausbauziele nachhaltiger sind als der aktuelle Energiemix.

Fazit der Arbeit ist eine notwendige Verbesserung der Transparenz und Datengrundlage des Wasserbedarfes im Energiesektor. Eine Möglichkeit ist die Integration der aquatischen Kennzahlen als obligatorischer Bestandteil von Umweltberichten von Kraftwerken. Eine weitere Handlungsempfehlung stellt ein deutschlandübergreifend gesteuertes und definiertes, rechtlich bindendes, jährliches Wasserbudget dar. Die Masterarbeit zeigt mögliche Methodiken und die mit zu beachtenden Perspektiven und Kriterien für nachhaltige Wassermanagementsysteme auf. Die Ausarbeitung soll die Aufmerksamkeit auf das Wasserthema richten und erhöhen und zu einer Sensibilisierung aller beteiligten Akteur*innen verhelfen.

Abstract

The global climate crisis is to be contained by reducing greenhouse gas emissions and achieving climate neutrality. In addition to the goal of integrating more renewable energies, the issue of water must be considered. Energy and water supply are interrelated with each other, but there is currently a lack of reliable data on water demands of energy supply technologies. This Master's thesis investigates technology-dependent water usage and consumption. The central question is whether the planned expansion targets for the energy industry are compatible with the water availabilities in Germany and what are the consequences of the energy transition, considering the effects of climate change.

The methodology used is based on the procedure of a life cycle assessment with an added sustainability assessment. With the starting point Bremen, a scaling is made to Germany. The data quality for the water demand in Bremen, considering the collected aquatic indicators within this thesis, is estimated to be reliable at 0.75. Based on literature indicators, however, the results for Bremen are only to a limited extent reliable (0.375). When scaling the values to Germany, the quality of data is determined to be 0.125 which also represents a limited extent of reliability.

It was not possible to determine the water demand for all energy supply technologies in Bremen. Ecologically, economically, and socio-culturally, it is being worked out that renewable energy supply technologies and thus the expansion targets are more sustainable than the current energy mix.

The conclusion of this paper is a necessary improvement of the transparency and data base of water demand in the energy sector. One option is the integration of aquatic indicators as an obligatory part of the environmental reports of power plants. Another recommendation for action is a nationally managed and defined, legally binding annual water budget. The master thesis shows possible methodologies and the perspectives and criteria to be considered for sustainable water management systems. The elaboration is intended to focus and increase attention on the water topic and to help raise the awareness among all actors involved.

Inhaltsverzeichnis

1.	Motivation	1
2.	Zielsetzung	3
3.	Forschungsfragen und -thesen	4
4.	Methodik	5
4.1	Allgemeines einer Ökobilanz	6
4.2	Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens	7
4.3	Sachbilanz	8
4.4	Wirkungsabschätzung	11
4.5	Qualitative Auswertung	13
4.6	Lösungsstrategien	18
5.	Energieversorgung in Deutschland	19
5.1	Aktuelle Energieversorgung in Deutschland	19
5.1.1	Energiefluss	19
5.1.2	Stromdesign	22
5.1.3	Wärmesektor	23
5.2	Rechtliche Rahmenbedingungen der Energiewirtschaft	24
5.3	Ausbauziele der Energiewirtschaft	25
5.3.1	Vergleich verschiedener Ausbauprognosen	25
5.3.2	Wasserstoffstrategie	27
5.4	Relevanz aktueller Geschehen: Krieg in der Ukraine	29
5.5	Umweltauswirkung der Energieträger	30
6.	Klimatische Rahmenbedingungen	32
7.	Wasserwirtschaft Deutschland	35
7.1	Rechtliche Rahmenbedingungen der Wasserwirtschaft	35
7.2	Einflussfaktoren auf Oberflächen- und Grundwasser	37
7.3	Natürliche Gegebenheiten	38
7.3.1	Wasserkreislauf	38

7.3.2	Wasserbilanz Deutschlands	39
7.3.3	Grundwasserarten	41
7.3.4	Wasserqualität	43
7.3.5	Wasservorkommen Deutschland.....	45
7.4	Klimatischer Einfluss auf die Wasserbilanz Deutschlands	47
7.5	Wassernutzung in Deutschland	50
7.5.1	Wassergewinnung nach Wasserarten	50
7.5.2	Wassernutzungsindex.....	52
8.	Energie-Wasser-Nexus.....	54
8.1	Wechselwirkungen von Energie- und Wasserversorgung	54
8.2	Wasserbedarf der Energiebereitstellungstechnologien	57
9.	Beispielregion Bremen.....	62
9.1	Rechtliche Rahmenbedingungen	62
9.2	Energieversorgung in Bremen	64
9.2.1	Status Quo der Energielandschaft	64
9.2.2	Wasserstoffstrategie Bremen	69
9.3	Wasserversorgung in Bremen.....	70
9.3.1	Klimatische Rahmenbedingungen	70
9.3.2	Hydrogeologie Bremens	71
9.3.3	Grundwasservorkommen	73
9.3.4	Trinkwasserversorgung in Bremen	78
9.3.5	Oberflächennahes Wasser	79
9.4	Wasserbilanz Bremen	82
9.5	Aquatische Kennzahlen für Bremer Kraftwerke	84
10.	Nachhaltigkeitsbewertung der Ausbaupfade	89
10.1	Quantitativer Wasserbedarf in Bremen.....	89
10.2	Quantitativer Wasserbedarf in Deutschland	91
10.3	Qualitative Bewertung der Ausbaupfade	96

11.	Konfliktsituationen Wasser	100
11.1	Konfliktursachen und -arten	100
11.2	Trinkwasser- Nutzungskonflikte	101
11.3	Ableitungen von Lösungsstrategien.....	103
11.3.1	Rechtliche und planerische Maßnahmen.....	103
11.3.2	Transportoptionen Wasserstoff	104
11.3.3	Wasseraufbereitung	106
11.3.4	Betroffenheit nach Sektoren	112
12.	Fazit der Forschungsarbeit	114
12.1	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	114
12.2	Diskussion und Ausblick.....	118
	Literaturverzeichnis.....	I
	Anhangsverzeichnis.....	XXXIII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Methodik der Maserthesis Teil 1.	5
Abbildung 2: Methodik der Maserthesis Teil 2.	6
Abbildung 3: Phasen einer Ökobilanz (DIN EN ISO 14040 Seite 16).....	7
Abbildung 4: Flussbild und Systemgrenzen Energiebereitstellung.	8
Abbildung 5: Kommunikationskreis Masterthesis.....	10
Abbildung 6: Energieflussbild Deutschland 2020 (AG Energiebilanzen e.V., 2021a).	20
Abbildung 7: Primärenergieverbrauchsmix 2021 (Werte für 2020) (Agora Energiewende, 2022b). ...	21
Abbildung 8: Bruttostromerzeugung nach Energieträgern in Deutschland 2021 (BDEW, 2021).	22
Abbildung 9: Bruttostromerzeugung, absolute Differenzen nach Energieträgern von 2020 auf 2021 (BDEW, 2021).....	23
Abbildung 10: Endenergieverbrauch Wärmesektor in Deutschland im Jahr 2020 in Mrd. kWh (Agentur für erneuerbare Energien e.V., 2021).	23
Abbildung 11: Nettowärmeerzeugung in Deutschland 2021 nach Energieträgern (BMWK, 2022).....	24
Abbildung 12: Emissionsverlauf in Deutschland 1990- 2045/2050 nach altem und neuen Klimaschutzgesetz (BCG & BDI e.V., 2021).	26
Abbildung 13: Energiebedarf nach Energieträgern in Deutschland 2018-2050 (dena, 2021).	27
Abbildung 14: Elektrolysekapazitäten von Wasserstoffprojekten (einzeln und kumuliert) (Lübcke, 2022).	28
Abbildung 15: Spezifische Treibhausgasbilanz der Brutto-Stromerzeugung aus EE im Jahr 2018 nach Energieträgern (UBA, 2019d).....	30
Abbildung 16: Temperatur und Niederschlag im Trockenjahr 2018 in Deutschland (DVGW, 2020)....	33
Abbildung 17: Dreistufiger Verwaltungsaufbau der Wasserwirtschaft nach (Kluth & Smeddinck, 2020).	36
Abbildung 18: Wirkungskette Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser (Klimakompetenznetzwerk Niedersachsen, 2019).	37
Abbildung 19: Wasserkreislauf (Wisotzky et al., 2021).....	39
Abbildung 20: Jährliche Niederschlagshöhe in Deutschland im Referenzzeitraum 1961-1990 (BMU & UBA, 2017).	40

Abbildung 21: Porengrundwasserleiter (links); Kluftgrundwasserleiter (Mitte); Karstgrundwasserleiter (rechts) (Baur et al., 2019).	42
Abbildung 22: Mengenmäßiger Grundwasserzustand (Berichtsportal WasserBLICK & BfG, 2022) (links) und Chemischer Grundwasserzustand (BKG et al., 2019) (rechts).....	43
Abbildung 23: Nitratkonzentrationen im Sickerwasser in mg/l (Mittelwerte der Kreise) (Hirschfeld et al., 2016).	44
Abbildung 24: Anteile der Branchen an den 10 relevantesten Wasser-Schadstoffen (ideas into energy gGmbH & German Water Partnership e.V., 2021).	45
Abbildung 25: Ergiebigkeit Grundwasservorkommen in Deutschland (BMU & UBA, 2017).	46
Abbildung 26: Prognostizierte Änderungen der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung in NRW (DVGW, 2020).	47
Abbildung 27: Potentielles Wasserdargebot in Deutschland (BMU & UBA, 2017).....	48
Abbildung 28: Wasserförderung nach Wasserarten 2019 (StaBuA, 2022).	50
Abbildung 29: Öffentliche Wasserversorgung der Bundesländer nach Wasserarten (Statistisches Bundesamt & BKG, 2019).	51
Abbildung 30: Wassernutzungsindex in Deutschland 1991-2017 (UBA, 2019b).	52
Abbildung 31: Jährliche Wasserbedarfe in den Kreisen in Liter pro Quadratmeter (Hirschfeld et al., 2016).	53
Abbildung 32: Eigengewinnung von Wasser in Deutschland 2019 nach (Destatis, 2021).	54
Abbildung 33: Wasserversorgung 2016 nach Wasserarten und Wirtschaftszweigen (Destatis, 2018/2019).	55
Abbildung 34: Übersicht der genutzten Wassermengen in Deutschland 2016 (TU Clausthal & Tuttahs & Meyer Ingenieurgesellschaft, 2016).....	56
Abbildung 35: Wasserverbrauch von Energiebereitstellungstechnologien.	59
Abbildung 36: Wasserverbrauch für die Stromproduktion mit verschiedenen Energieträgern.....	59
Abbildung 37: Wassernutzung nach Bereitstellungstechnologien.	60
Abbildung 38: Prozessschritte Energieproduktion.....	60
Abbildung 39: Anteile der Energieträger am Endenergieverbrauch in Prozent im Jahr 2020 im Bundesland Bremen (Statistisches Landesamt Bremen, 2022a).	64

Abbildung 40: Standorte swb AG Kraftwerke (swb Erzeugung AG & Co. KG & swb Entsorgung GmbH & Co. KG, 2021).	65
Abbildung 41: Strom- und Wärmeerzeugung in Bremen im Jahr 2020.	68
Abbildung 42: Jahresmittel der bodennahen Lufttemperatur und die Jahressumme der Niederschläge in Bremen 1951-2015 (GERICS, 2020).	71
Abbildung 43: Hydrogeologische Teilgebiete in Bremen und Niedersachsen (Nds. Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz, 2015b).....	72
Abbildung 44: Grundwasservorkommen nach Ausdehnung und Produktivität (BGR, o.D.b).....	73
Abbildung 45: Grundwasserstand Bremen Herbst 2011 (mNN) (GDfB, 2020).	74
Abbildung 46: Ergiebigkeitsklassen von Grundwasservorkommen in Bremen und Niedersachsen (Vierhuff, o.D.).	75
Abbildung 47: Entnahmebedingungen in den Grundwasserführenden Gesteinen Niedersachsen und Bremen (Nds. Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz, 2016b).	75
Abbildung 48: Bodenfeuchteprofil in Bremen unter Gras (DWD, 2022b).	76
Abbildung 49: Versalzung des Bremer Grundwassers (LBEG, o.D.).	77
Abbildung 50: Chemischer Zustand der Grundwasserkörper (FGG Weser et al., 2021).....	77
Abbildung 51: Bezugsquellen für das Trinkwasser Bremens in Niedersachsen (SKUMS, 2013).....	79
Abbildung 52: Wasserstand der Weser/ Intschede [cm], Stand 13.07.2022 9:45 Uhr (Bundesanstalt für Gewässerkunde, 2022).....	80
Abbildung 53: Abflusshöhe Deutschland 1961-2017 (UBA, 2019f).....	81
Abbildung 54: Chemischer Zustand der Oberflächenwasserkörper in Bremen und Umgebung (FGG Weser et al., 2021).....	81
Abbildung 55 Klimatische Wasserbilanz im Sommerhalbjahr für Niedersachsen und Bremen (LBEG, 2017).	83
Abbildung 56: Kühlwassermengen Kraftwerke swb Bremen, Stand 2020 nach (swb Erzeugung AG & Co. KG & swb Entsorgung GmbH & Co. KG, 2021).....	84
Abbildung 57: Trinkwasserverbrauch Kraftwerke swb Bremen, Stand 2020 nach (swb Erzeugung AG & Co. KG & swb Entsorgung GmbH & Co. KG, 2021).....	86
Abbildung 58: Primärenergieverbrauch Bremen Stand 2019 nach (Statistisches Landesamt Bremen, 2021a).	89

Abbildung 59: Primärenergieverbrauch Bremen nach EE in PJ, Stand 2019 nach (Statistisches Landesamt Bremen, 2021b).....	89
Abbildung 60: Prozentuale Verteilung Wasserbedarf Bremen Stand 2019.....	91
Abbildung 61: Primärenergieverbrauch Deutschland 2021 und 2045 (AG Energiebilanzen e.V., 2021b) und (Prognos AG et al., 2021).....	91
Abbildung 62: Primärenergieverbrauch Deutschland nach EE in MWh, Stand 2021 nach (AG Energiebilanzen e.V. & BMWi, 2022).....	92
Abbildung 63: Prozentualer Wasserbedarf Deutschland Stand 2021.....	93
Abbildung 64: Prozentualer Wasserbedarf Deutschland Prognose 2045.....	94
Abbildung 65: Wasserentnahmeproggnose Deutschlands bis 2050 (80% Pfad der BDI Studie 2018) (Bormann et al., 2019).....	95
Abbildung 66: Wasserfußabdrücke der Energiebereitstellungstechnologien (*ohne Wasserverbrauchswert).....	97
Abbildung 67: Transportoptionen und deren Potenzial/ Entwicklungsstand im Jahr 2030 (SCI4climate.NRW, 2021).....	105
Abbildung 68: Klassifizierung Entsalzungstechnologien (Panagopoulos, 2021).	109
Abbildung 69: Schematische Illustration der selektiven Nutzung des gesamten solaren Spektrums (Ding & Ho, 2021).....	111
Abbildung 70: Relative (in %) und absolute (in Zahlen) Häufigkeit von Textverweisen auf Ereignisse, die in der Literatur beschrieben wurden und mit geplanten oder bereits umgesetzten Maßnahmen verknüpft sind (IWW, 2019).....	112
Abbildung 71: Wärmenetze Bremen (swb AG & wesernetz Bremen GmbH, 2020).	121
Abbildung 72: Wasser-, Energie- und Nahrungsmittel-Nexus (Hoff, 2011).	124

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Nachhaltigkeitskriterien- und Indikatoren der ökologischen, ökonomischen und sozial-kulturelle Dimension nach (Flörke et al., 2021; Gapp-Schmeling, 2022).	14
Tabelle 2: Kriterium 1.1 THG-Emissionen in $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{ä}}/\text{MWh}$	15
Tabelle 3: Kriterium 1.2 Kumulierter Wasserverbrauch in m^3/MWh	15
Tabelle 4: Kriterium 1.3 Auswirkungen auf die Naturverträglichkeit (Wasserqualität).	15
Tabelle 5: Kriterium 2.1 Redundanz der Energiebereitstellungstechnologien.	15
Tabelle 6: Kriterium 2.2 Energieabhängigkeitsquote von Energieträgern.	16
Tabelle 7: Kriterium 3.1 erwartete Akzeptanz vor Ort.	16
Tabelle 8: Kriterium 3.2 Konfliktpotential der eingesetzten Energiebereitstellungstechnologie.	16
Tabelle 9: CO_2 Faktoren Energieträger (UBA, 2019d; ifeu, 2019b; Quaschnig, 2021; BAFA, 2021). ...	31
Tabelle 10: Wasserwirtschaft rechtlicher Rahmen nach (BMU & UBA, 2017).	35
Tabelle 11: Wasserbedarf von Energiebereitstellungstechnologien aus der Literatur.	58
Tabelle 12: Elektrische Nettonennleistung [MW] Bundesland Bremen Stand 31.05.2022 (Bundesnetzagentur, 2022b).	64
Tabelle 13: Abflusswerte der Mittelweser am Messpunkt Intschede 19941-2020 nach (FGG Weser et al., 2021).	80
Tabelle 14: Aquatische Kennzahlen Bremer Kraftwerke.	88
Tabelle 15: Wasserbedarf in Bremen im Jahr 2019.	90
Tabelle 16: Wasserbedarf in Deutschland im Jahr 2021.	92
Tabelle 17: Wasserbedarf in Deutschland im Jahr 2045.	94
Tabelle 18: Datengüte der aquatischen Kennzahlen der swb Kraftwerke.	119
Tabelle 19: Bewertung Datengüte Berechnung Primärenergieverbrauch Bremen 2019.	119
Tabelle 20: Bewertung Datengüte Primärenergieverbrauch 2021 Deutschland.	120

Abkürzungen

BHKW.....*Blockheizkraftwerk*
bspw. *beispielsweise*
ca. *circa*
CID *climatic impact-driver*
CO₂.....*Kohlenstoffdioxid*
CO₂ä *Kohlenstoffdioxid-Äquivalente*
EE *Erneuerbare Energien*
EU *Europäische Union*
GHD *Gewerbe, Handel, Dienstleistungen*
GIS..... *Geoinformationssystem*
GuD..... *Gas- und Dampfturbinenkraftwerk*
GW *Gigawatt*
GWK..... *Grundwasserkörper*
HW *Heizkraftwerk*
HWW *Harzwasserwerke*
kg *Kilogramm*
KSG *Klimaschutzgesetz (Bundesebene)*
KW *Kraftwerk(e)*
kWh *Kilowattstunde*
KWK *Kraft-Wärme-Kopplung*
l *Liter*
LKW..... *Lastkraftwagen*
LOHC.....*flüssig organische Wasserstoffträger*
m² *Quadratmeter*
m³ *Kubikmeter*

MHKW *Müllheizkraftwerk*
Mio..... *Million(en)*
MKK..... *Mittelkalorik-Kraftwerk*
Mrd. *Millarde/n*
Mt *Megatonne*
MWh *Megawattstunde*
NEP..... *Netzentwicklungsplan*
nFK *nutzbare Feldkapazität*
nm *Nanometer*
NN *Normalnull*
Nr. *Nummer*
OOVV *Oldenburgisch-Ostfriesische
Wasserverband*
PJ *Petajoule*
PtG *Power to Gas*
PtX..... *Power to X*
PV..... *Photovoltaik*
s *Sekunde(n)*
THG *Treibhausgas*
TVV..... *Trinkverband Verden*
UBP *Umweltbelastungspunkte*
WP..... *Wärmepumpen*
WW *Wasserwerk*
z.B. *zum Beispiel*

Glossar

EU-Richtlinien

Verordnung 2018/842/EU des europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Festlegung verbindlicher nationaler Jahresziele für die Reduzierung der Treibhausgas (THG)-Emissionen im Zeitraum 2021 bis 2030 als Beitrag zu Klimaschutzmaßnahmen zwecks Erfüllung der Verpflichtungen aus dem Übereinkommen von Paris sowie zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 525/2013 **-Klimaschutzverordnung-**

Verordnung 2021/1119/EU des europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Juni 2021 zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 401/2009 und (EU) 2018/1999 (ABl. L 243 S. 1-17) **-Europäisches Klimagesetz-**

EU Legislativpaket des europäischen Parlaments und des Rates und der Europäischen Kommission vom 24. Dezember 2018 **-Clean Energy Package-** (Saubere Energie für alle Europäer)

Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (ABl. L 327 S. 1-73) **-WRRL-**

Die Richtlinie 2006/118/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Dezember 2006 zum Schutz des Grundwassers vor Verschmutzung und Verschlechterung **-GWRL-**

Richtlinie 2008/105/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über Umweltqualitätsnormen im Bereich der Wasserpolitik und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien des Rates 82/176/EWG, 83/513/EWG, 84/156/EWG, 84/491/EWG und 86/280/EWG sowie zur Änderung der Richtlinie 2000/60/EG ((ABl. L 348 S.84) **- UNQ-RL-**

Richtlinie des Rates vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser (91/271/EWG), geändert durch die Verordnung (EG) Nr. 1137/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Oktober 2008 (ABl. L 135 S. 40) **-Kommunale Abwasser-Richtlinie-**

Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. November 2010 über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung) (Neufassung) **-IE-RL-**

Richtlinie (EU) 2020/2184 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2020 über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Neufassung) **-Trinkwasser-Richtlinie-**

Richtlinie 91/676/EWG des Europäischen Parlaments und des Rates zum Schutz der Gewässer vor Verunreinigung durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen **-Nitrat-Richtlinie-**

Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken **-HWRM-RL-**

Richtlinie 2008/56/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Juni 2008 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Meeresumwelt (Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie) **-MSRL-**

Gesetze

Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3905) geändert worden ist **-KSG-**

Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz vom 21. Dezember 2015 (BGBl. I S. 2498), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 8. Juli 2022 (BGBl. I S. 1054) geändert worden ist **-KWKG-**

Gesetz zur Reduzierung und zur **Beendigung der Kohleverstromung** und zur Änderung weiterer Gesetze vom 8. August 2020 (BGBl. I S. 1818), das zuletzt durch Artikel 3b des Gesetzes vom 3. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2682) geändert worden ist **-Kohleausstiegsgesetz-**

Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3901) geändert worden ist **-WHG-**

Grundwasserverordnung vom 9. November 2010 (BGBl. I S. 1513), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 4. Mai 2017 (BGBl. I S. 1044) geändert worden ist **-GrwV-**

Oberflächengewässerverordnung vom 20. Juni 2016 (BGBl. I S. 1373), die zuletzt durch Artikel 2 Absatz 4 des Gesetzes vom 9. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2873) geändert worden ist **-OGewV-**

Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen vom 18. April 2017 (BGBl. I S. 905), die durch Artikel 256 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist **-AwSV-**

Abwasserabgabengesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 18. Januar 2005 (BGBl. I S. 114), das zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 22. August 2018 (BGBl. I S. 1327) geändert worden ist **-AbwAG-**

Abwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Juni 2004 (BGBl. I S. 1108, 2625), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 20. Januar 2022 (BGBl. I S. 87) geändert worden ist **-AbwV-**

Düngegesetz vom 9. Januar 2009 (BGBl. I S. 54, 136), das zuletzt durch Artikel 96 des Gesetzes vom 10. August 2021 (BGBl. I S. 3436) geändert worden ist -**DüngG**-

Düngeverordnung vom 26. Mai 2017 (BGBl. I S. 1305), die zuletzt durch Artikel 97 des Gesetzes vom 10. August 2021 (BGBl. I S. 3436) geändert worden ist -**DüV**-

Bremisches Klimaschutz- und Energiegesetz vom 26. März 2015 (Brem.GBl. 2015, 124), das zuletzt durch Geschäftsverteilung des Senats vom 20. Oktober 2020 (Brem.GBl. S. 1172) geändert worden ist, die Fortschreibung des KEP in einer Mitteilung des Senats an die Bremische Bürgerschaft (Landtag) erschien am 18. Dezember 2018 -**BremKEG**-

Bremisches Wassergesetz vom 08.12.2020 (Brem.GBl. 2011, 262), das zuletzt durch Artikel 6 Nummer 5 des Gesetzes vom 24.11.2020 (Brem.GBl. S. 1486, 1581) geändert worden ist -**BremWG**-

Vereinbarung zur Zusammenarbeit in einer **Regierungskoalition** für die 20. Wahlperiode der Bremischen Bürgerschaft 2019-2023 vom 13. August 2019 -**Koalitionsvertrag**-

Raumordnungsgesetz vom 22. Dezember 2008 (BGBl. I S. 2986), das zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 20. Juli 2022 (BGBl. I S. 1353) geändert worden ist -**ROG**-

DIN-Normen

DIN EN ISO 14040: 2021-02, Umweltmanagement- Ökobilanz- Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040: 2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020

DIN EN ISO 14044: 2021-02; Umweltmanagement- Ökobilanz- Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2007 + Amd2 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020

DIN 4049-1: 1992-12, Hydrologie; Grundbegriffe

DIN 4049-3: 1994-10, Hydrologie; Grundbegriffe – Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie

1. Motivation

Die globale Klimakrise hat verschiedene regionale Auswirkungen auf diverse Wirtschafts- und Industriezweige. Der Weltklimarat zeigt in seinem sechsten Sachstandsbericht (IPCC, 2021), dass der Klimawandel eine Gefahr für den Planeten und das Wohl der Menschheit darstellt und mehr als 3,3 Mrd. Menschen von den Auswirkungen der Klimakrise betroffen sein werden.

Diese Dringlichkeit des Handelns spiegelt sich seitens der Politik in beschlossenen Maßnahmen gegen die weitere Welterwärmung wider. Laut Abschnitt 2 §3 (2) Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) ist bis zum Jahr 2045 die Minderung der THG-Emissionen bis zu der Klimaneutralität von Deutschland zu erreichen.

Im Jahr 2021 wurden rund 762 Mio. Tonnen THG freigesetzt. Das entspricht, verglichen mit dem Vorjahr, einem Anstieg um 33 Mio. Tonnen beziehungsweise 4,5 %. Speziell im Energiewirtschaftssektor sind die größten Emissionssteigerungen zu verzeichnen (BMWK & UBA, 2022). Damit fällt Deutschland deutlich hinter das Klimaziel zurück (Hein et al., 2021). Für die Erfüllung der Klimaschutzziele in Deutschland ist ein Wandel in der deutschen Energiewirtschaft notwendig, bei dem Technologien mit geringem CO₂-Ausstoß im Fokus stehen und gefördert werden.

Neben dem meistpublizierten Zusammenhang von Klimakrise und THG-Emissionen sind weitere Faktoren miteinzubeziehen, denn große Teile der europäischen und somit auch deutschen Energie- und Stromproduktion sind von der Wasserverfügbarkeit abhängig (Lohrmann et al., 2021).

Laut dem Earth Overshoot Day hat die Menschheit seit dem 28. Juli 2022 alle biologischen Ressourcen inklusive Wasser verbraucht, die die Erde im Laufe eines Jahres regenerieren kann. Bei einer Gleichverteilung der Ressourcen der Erde auf alle Länder gemäß der Zahl ihrer Einwohner*innen, hätte Deutschland seinen Anteil im Jahr 2022 bereits Anfang Mai aufgezehrt, so Berechnungen des Global Footprint Networks (UBA, 2022a).

Der Klimawandel führt weltweit zu Veränderungen im Wasserkreislauf und unserer Nutzung von Wasser (Riedel et al., 2021). Energie- und Wasserversorgung stehen in Wechselwirkung, da einerseits die Wasserversorgung ein großer Energieverbraucher ist, aber auch Energie produzieren, speichern und einsetzen kann (Baur et al., 2019). „Wasser ist die unverzichtbare Grundlage allen Lebens und insbesondere der menschlichen Zivilisation.“ (Baur et al., 2019, S. 3). Unter diesem Aspekt ist die Aufführung einer Wasserkrise unter den zehn schwerwiegendsten globalen Risiken in den nächsten 10 Jahren, bewertet nach Eintrittswahrscheinlichkeit und Auswirkungsausmaß, umso alarmierender. Als Ursache sind die Überbeanspruchung und/ oder das Missmanagement der kritischen natürlichen Ressource angegeben (The World Economic Forum, 2022).

Laut den Zielen der UN für nachhaltige Entwicklung (United Nations, 2019) sind sowohl eine Verfügbarkeit von Wasser, als auch saubere Energie für alle Menschen in der Agenda 2030 festgeschrieben (SGD 6 und 7). Eine Versorgung mit Wasser und Energie ist gleichermaßen von entscheidender Bedeutung und beide Bereiche sind eng miteinander verbunden (Niet et al., 2021).

Für die Energiewende ist dementsprechend die Untersuchung der Wasservorkommen relevant und kann als limitierender Faktor betrachtet werden (Bormann et al., 2019). Generell sind erneuerbare Energiebereitstellungstechnologien dafür bekannt, weniger Wasser zu verbrauchen als vergleichbare fossile Kraftwerke (KW), was erneut die Fokussierung auf genannte natürliche Energieressourcen bestärkt (Lohrmann et al., 2021). Neben dem Wasservolumen sind die benötigten Wasserqualitäten, einschließlich des jeweils erforderlichen Aufwands zur Rohwasser- und Abwasseraufbereitung, mit in die Standortbetrachtung einzubeziehen (Bormann et al., 2019). Der aktuelle UN- Weltwasserbericht (United Nations, 2022) fokussiert sich besonders auf die Bedeutung des Grundwassers, stellt jedoch auch die Herausforderungen und Chancen im Zusammenhang mit der Entwicklung, Bewirtschaftung und Governance von Wasserressourcen weltweit her.

Trotz der aufgezeigten engen Verknüpfung, dem Wasser-Energie-Nexus, fehlen reale und verlässliche Datengrundlagen im Bereich Wasser und Energie, wodurch Wasserverbräuche für den aktuellen Stand, als auch bezogen auf die Ausbauziele im Energiesektor nur abgeschätzt werden können (Larsen & Drews, 2019). Es existieren Forschungsdefizite im Bereich der Potenzialanalysen bezogen auf den Wasserbedarf für die Energie- und Stromproduktion (Lohrmann et al., 2021). Betrachtungen basierend auf dem Volumen des Wassers sind unzureichend, da weitere lokale Einflüsse der Wassernutzung wie beispielsweise (bspw.) Wasserqualität mit einbezogen werden müssen (Semmling et al., 2019).

Der Betrachtungsrahmen bereits vorgenommener Untersuchungen bezogen auf Wasserverfügbarkeit ist meist international oder global mit Fokus auf Regionen mit Wasserknappheit. Deutschland ist jedoch als wasserreiches Land charakterisiert, wobei die Wasservorkommen regional stark unterschiedlich sind (Bormann et al., 2019).

An diesem Punkt setzt die vorliegende Masterthesis an und untersucht technologieabhängige Wasserbedarfe in Deutschland im Bereich Energieproduktion mit dem Fokus auf deren geografischer Verteilung und der Untersuchung von regionalen Wasserverfügbarkeiten, wobei Lösungsansätze für Konfliktsituationen entwickelt werden.

2. Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen gesamtdeutschen Überblick bezogen auf die Energie- und Wasserwirtschaft zu geben und Untersuchungen zu potenziellem Wasserstress und/ oder -entlastungen in Folge der Wandlung des Energiemarktes durchzuführen. Besonders im Fokus ist die Gegenüberstellung fossiler und erneuerbarer Energiebereitstellungstechnologien. Dafür wird die aktuelle Energieerzeugungssituation in Deutschland mit schlussfolgerndem Wasserbedarf abgebildet. Zusätzlich erfolgt eine Abschätzung der zukünftigen Situation auf Basis der deutschen Ausbauziele vor dem Zeithorizont 2045 und abschätzbare Klimafolgen auf den Wasserhaushalt und -nutzung werden mit in die Überlegungen einbezogen und erläutert.

Konkretisiert werden die Betrachtungen anhand der Beispielregion Bremen, wobei die qualitative und quantitative Verfügbarkeit von Wasser mit einbezogen wird. Ziel ist es, konkrete Wasserbezugsdaten für die relevanten Energiebereitstellungstechnologien zu generieren und anschließend auf Deutschland zu skalieren. Eine Auswertung erfolgt neben der statistischen Abschätzung auch auf visueller Basis unter dem Integrieren von Kartenmaterial. Die Bewertung der Wassersituation und des Einflusses der einzelnen Energiebereitstellungstechnologien erfolgt auf Basis von technischen und nachhaltigen, also wirtschaftlichen, sozialen und politischen, Kriterien, um verschiedene Perspektiven mit einzubeziehen. Daraus werden regionale Engpässe und Überangebote in der Beispielregion Bremen sichtbar.

Die Arbeit soll Lösungsstrategien, anwendbar sowohl für die Energie-, aber auch für die Wasserwirtschaft, aufzeigen. Aquatische Nutzungskonflikte zwischen der Energiewirtschaft und anderen Wirtschaftszweigen, aber auch zwischen den Energiebereitstellungstechnologien werden abgeleitet. Ziel ist eine fundierte Bewertung der Ausbauziele (Horizont 2045) im Bereich der Energiewirtschaft für die Beispielregion Bremen, aber auch mit der Skalierung für Deutschland.

Die vorliegende Masterthesis hat als Zielgruppe Studierende in den Fachbereichen Wasserwirtschaft, Energietechnik, als auch technischen und Wirtschaftswissenschaften. Des Weiteren kann sie als Handlungsempfehlung für Manager*innen und Entscheidungsträger*innen in Forschungsinstituten, Ämtern und Unternehmen in den Energie- und Wasserwirtschaftsbranchen Deutschlands, aber auch in naturnahen Wirtschaftszweigen, wie der Forstwirtschaft, gesehen werden.

3. Forschungsfragen und -thesen

In der vorliegenden Masterarbeit wird folgende Leitfrage verfolgt:

Sind die angestrebten Ausbauziele für die Energiewirtschaft vereinbar mit der Wasserverfügbarkeit in Deutschland und welche Folgen ergeben sich aus der Energiewende unter Einbezug der Klimafolgen?

Dazu wurden vier Forschungsfragen entwickelt:

- Wie gestaltet sich der Wasserbedarf auf Basis der aktuellen Energieerzeugung?
- Welche Wasserbedarfsmengen sind der regenerativen Energiewirtschaft zuzuordnen und inwiefern unterscheiden sie sich von fossilen Energieträgern?
- Welche Entwicklungen, bezogen auf den Wasserbedarf, sind durch die Ausbaustrategien zu erwarten?
- Entstehen regionale Konkurrenzsituationen in der Beispielregion Bremen in Bezug den Wasserbedarf zwischen Energiebereitstellungstechnologien und wie sind diese zu bewerten?

Abgeleitet von der Forschungsfragen wurden Forschungsthese aufgestellt:

- Der Wasserbedarf für die Erzeugung von Energie beansprucht einen Großteil des verfügbaren deutschen Wasservolumens.
- Erneuerbare Energiebereitstellungstechnologien benötigen weniger Wasser als vergleichbare fossile.
- Der Wasserbedarf wird in Folge der Ausbaustrategien ansteigen.
- Es entstehen Konkurrenzsituationen in Bezug auf den Wasserbedarf in Bremen zwischen Energiebereitstellungstechnologien, welche regional differenziert zu bewerten sind.

An diesen Zielstellungen und -fragen orientiert sich die gesamte vorliegende Arbeit und eine Bewertung und Auswertung wird am Ende in dem Abschnitt 12 erfolgen.

4. Methodik

In den nachfolgenden Abbildungen 1 und 2 sind die durchlaufenen Teilschritte der Methodik aufgezeigt. Beige-markierte Felder stellen ein methodisches Vorgehen dar, während grüne Abschnitte die Zielstellungen und Meilensteine in den jeweiligen Abschnitten sind. Als blau gefärbt sind wichtige hinzugezogene Materialien oder Daten, wobei im Text noch weitere inhaltliche Grundlagen dafür erläutert werden.

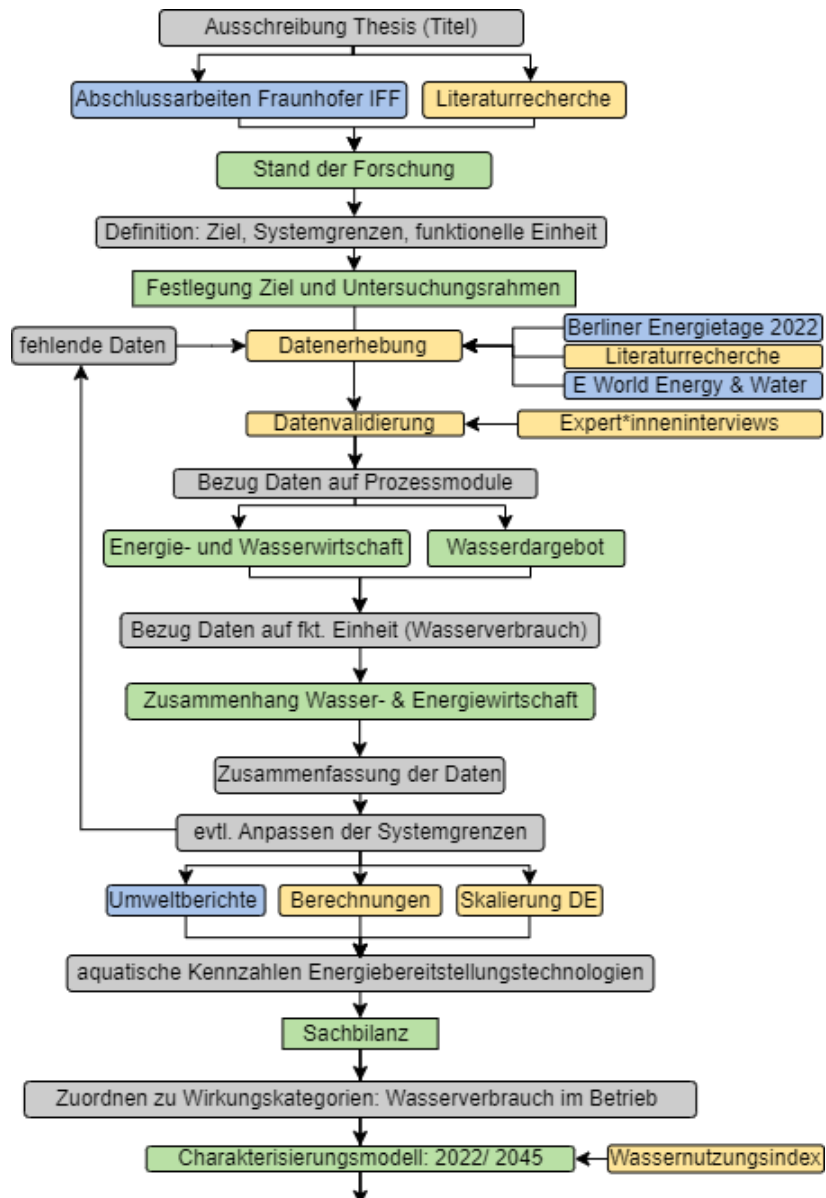


Abbildung 1: Methodik der Maserthesis Teil 1.

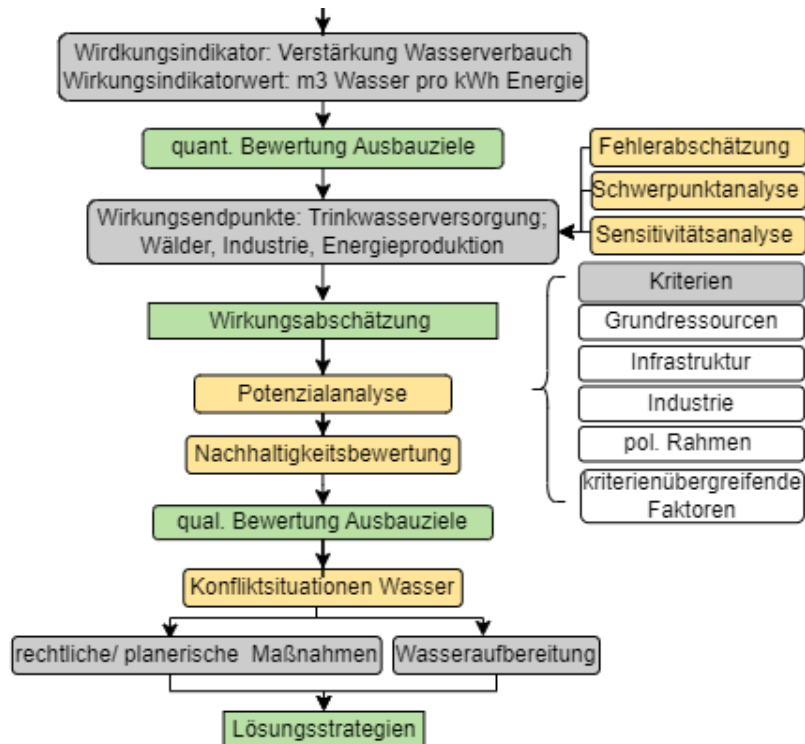


Abbildung 2: Methodik der Maserthesis Teil 2.

4.1 Allgemeines einer Ökobilanz

Ausgangspunkt des methodischen Vorgehens ist Ausschreibung mit dem Thesis-Thema. Neben der Analyse bereits bestehenden Abschlussarbeiten wird eine Literaturrecherche durchgeführt. Sie dient dazu, den Stand der Forschung in einem thematisch abgegrenzten Forschungsfeld abzubilden. Es wird eine quantitative und eine qualitative Literaturrecherche durchgeführt, wobei ersteres auf die Datensammlung möglichst vieler Ergebnisse und dessen Be- bzw. Auswertung zielt und letzteres auf detaillierte Informationen zur Erkenntnisgewinnung genutzt wird. Die systematische Literaturrecherche quantitativer Art basiert auf der Abgrenzung des Forschungsfeldes, welche teilweise durch die Aufgabenstellung festgelegt ist. Dafür werden Schlagwörter wie „Energieversorgung“ oder „Wasserwirtschaft“ definiert sowie geeignete Literaturdatenbanken ausgewählt. Dazu zählen bspw. die Bibliothekskataloge der Hochschule Bremen (suub), Onlinedatenbanken wie ScienceDirect, Research Gate und der Springer Verlag oder Gesetze und Normen. Mit Hilfe des Literaturverwaltungsprogrammes Citavi 6.0 wird eine Literaturliste erstellt, die nach Bewertung der Fundstellen über die gesamte Bewertungszeit bereinigt werden muss. Das bedeutet, die Liste wird von Dopplungen befreit und nach Nützlichkeit priorisiert. In dem nächsten Schritt des Literatur-Scans werden die Volltexte beschafft. Nach einer Analyse der Fundstellen inklusive inhaltlicher Bewertung kann es je nach Qualität zu erneuter Definition von Schlagwörtern oder einer Auswahl anderer Datenbanken kommen. Dann wird erneut der eben beschriebene Prozess

durchlaufen und anschließend der Forschungsstand beziehungsweise der Stand der Technik erarbeitet und dokumentiert (Bensberg et al., 2018).

Die Methodik basiert von der Grundstruktur auf dem Prinzip der Ökobilanz und orientiert sich dementsprechend an den Normen DIN EN ISO 14040 und 14044. Die einzelnen Abschnitte sind in Abbildung 3 dargestellt. In der vorliegenden Arbeit werden Vorgehen für ökobilanzielle Betrachtungen eingebunden, aber auch weitere Methodiken integriert, die für die Beantwortung der Forschungsfragen notwendig sind.

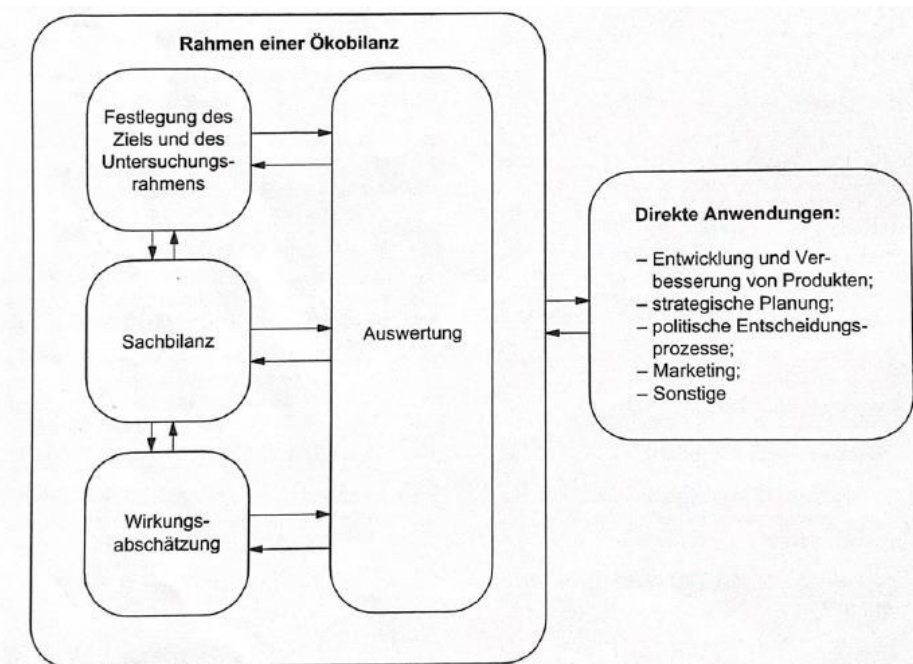


Abbildung 3: Phasen einer Ökobilanz (DIN EN ISO 14040 Seite 16).

Angelehnt daran ist im Folgenden die Struktur für die Methodik erläutert, beginnend mit der Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens. Danach wird eine Sachbilanz folgen, anschließend die Wirkungsabschätzung und am Ende die Auswertung. Das Ergebnis der Ökobilanz ist dann für verschiedene Anwendungen nutzbar, wie bspw. für politische Entscheidungsprozesse.

4.2 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

In diesem Abschnitt werden neben dem Ziel und der Zielgruppe auch die Systemgrenzen, die funktionelle Einheit sowie die Funktion festgelegt.

Das Ziel ist das Vergleichen der Wassernutzung und des -verbrauchs von verschiedenen Energiebereitstellungstechnologien. Daraufhin wird eine Bewertung der nationalen Ausbauziele in der Energiewirtschaft und den angestrebten Entwicklungen im Bereich der Energiewende vorgenommen. Die Zielgruppe sind, wie bereits in der Motivation erwähnt, Studierende in den Fachbereichen Wasserwirtschaft, Energietechnik, als auch technischen und Wirtschaftswissenschaften. Des Weiteren ist die Arbeit an Manager*innen und Entscheidungsträger*innen in Forschungsinstituten, Ämtern und

Unternehmen in den Energie- und Wasserwirtschaftsbranchen Deutschlands, aber auch in naturnahen Wirtschaftszweigen wie Forstwirtschaft gerichtet. Eine Veröffentlichung ist in Absprache mit dem Fraunhofer IFF in Magdeburg möglich. Für die zeitliche Eingrenzung der Betrachtungen gelten die aktuell verfügbaren Daten bis hin zum Jahr 2050. Trotz der angestrebten Klimaneutralität bis zum Jahr 2045 sind einige Ausarbeitungen noch auf das alte Ziel der Bundesregierung ausgerichtet.

Es handelt sich um eine energiebezogene Wasserbilanz. Der Fokus liegt auf den genutzten und verbrauchten Wassermengen während der Betriebsphase, wobei auch die Qualitätsänderung des Wassers durch die Nutzung mit einbezogen wird. Im Detail werden die KW ab 10 MW (orientiert an der Kraftwerkliste der Bundesnetzagentur) untersucht, wobei für die Energiewirtschaft in Bremen auch kleinere Energieproduktionsstandorte mit aufgegriffen werden. In dem Abschnitt für Bremen wird sich örtlich auf die Hansestadt Bremen bezogen. Als funktionelle Einheit gilt 1 kWh Energie, sowohl thermisch als auch elektrisch, und die Funktion ist der Vergleich des Wasserbedarfes von konventionellen und erneuerbaren Energiebereitstellungstechnologien.

4.3 Sachbilanz

In der zweiten Phase der Ökobilanz ist das angestrebte Endergebnis die Sachbilanz. Dafür ist nach den Systemgrenzen ein Flussdiagramm für die Energiebereitstellung erstellt worden, wie in Abbildung 4 ersichtlich. Die gestrichelte Linie zeigt die Systemgrenze für den betrachteten Prozessanteil.

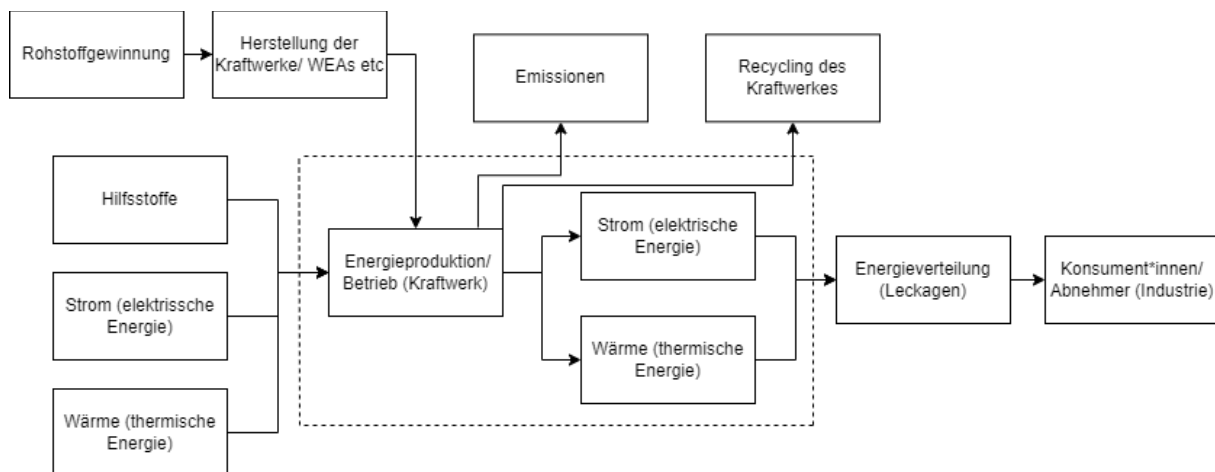


Abbildung 4: Flussbild und Systemgrenzen Energiebereitstellung.

Es wird von dem gesamten Energieprozess, vom Rohstoff bis hin zum/ zu den Endkonsument*innen, nur der Anteil im KW selbst von der Energieproduktion bis hin zur -verteilung näher betrachtet.

In der zweiten Phase der Ökobilanz wird zuerst eine Datenerhebung durchgeführt. Diese basiert zum einen erneut auf Literaturrecherche, aber auch auf dem Besuch von Fachmessen. Dazu wurde den online abgehaltenen Berliner Energietagen 2022 beigewohnt und die Vorträge inklusive der Interaktionsphase in Form von Diskussionsrunden verfolgt und aktiv mitgestaltet. Der Veranstalter war

EUMB Pöschk GmbH & Co. KG und die Redner*innen haben fachlich hochwertige Vorträge vom 02.05. bis 06.05.2022 gehalten.

Des Weiteren wurde von den Gesellschaftern con|energy agentur gmbh und MESSE ESSEN GmbH die E World Energy and Water Messe in Essen vom 21.06.-23.06.2022 veranstaltet. Es ist die Leitmesse der Energiewirtschaft in Europa und dieses Jahr wurde der Fokus auf das Wasserthema erweitert, wodurch es Relevanz für die vorliegende Arbeit hat. Bei dem Besuch erfolgte nach vorheriger Recherche von den Ausstellern die Datenerhebung mittels Gesprächen und dem Austausch von Kontakten für weitere Verknüpfungen. Die angebotenen Vorträge vor Ort vergrößerten den Wissenshorizont für aktive Firmen in dem untersuchten Bereich und ermöglichten neue Datenquellen. Die Gespräche erfolgten mit folgenden Firmen und Instituten:

- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) e.V.
- Arbeitsgemeinschaft für sparsame Energie- und Wasserverwendung (ASEW)
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall DWA
- Beulco IQ Water Solutions
- We Love Energy Siegel
- HydroHub (EE Energy Engineers)/ TÜV Nord EnSys GmbH & Co KG
- Weltenergieerat
- Bundesverband Erneuerbare Energie BEE
- Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband (DWV) e. V.
- Energy & meteo systems GmbH

Die Datenvalidierung kann einerseits quantitativ durch das Vergleichen von Daten in der Literatur erfolgen, aber auch qualitativ. Dafür sind Expert*innen-Interviews hilfreich. In der vorliegenden Arbeit wurde mit diversen Expert*innen via Zoom oder Teams kommuniziert. Im Folgenden ist das Gesprächsumfeld abgebildet (Abbildung 5). Aufgrund der Fokussierung auf Bremen ist die Detailerhebung auch in diesem Umfeld erfolgt.

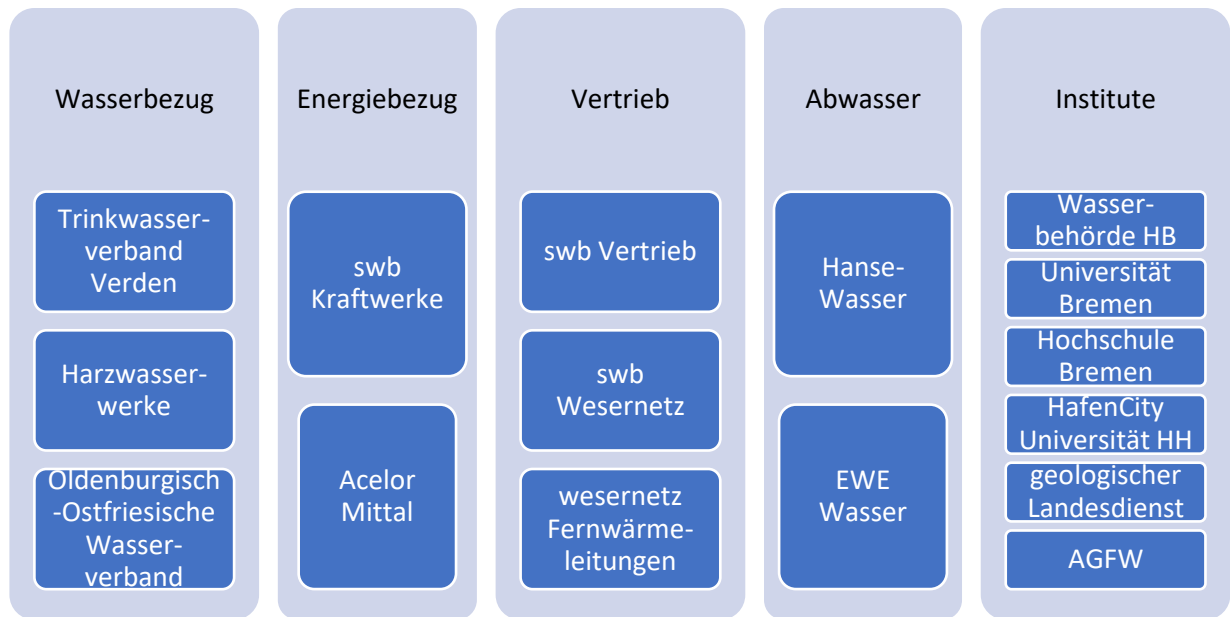


Abbildung 5: Kommunikationskreis Masterthesis.

Nach der Datenvalidierung wurde jeweils der Bezug zum Energie- und Wasserthema hergestellt und daraus ein Abbild der deutschen, aber auch Bremer Energie- und Wasserwirtschaft entwickelt. Des Weiteren konnte das Wasserdargebot inklusive von Wasservorkommen, Grundwasserleiter, Niederschlagsmengen, Wasserqualitäten und Wechselwirkungen eingegrenzt werden. Danach wurden die beiden Bereiche verknüpft und die der Energie-Wasser-Nexus untersucht, indem die Daten in ein Verhältnis gesetzt wurden und der Wasserverbrauch für die Energiewirtschaft bestimmt wurde. Nach dem Zusammenfassen der Daten kann bei Bedarf die Systemgrenze angepasst werden, was in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht auftrat.

Für die Vollendung der Phase wurden nun die öffentlich einsehbaren Umweltberichte der KW in Bremen herangezogen und die spezifischen Wasserbedarfe pro Energieeinheit, auch aquatische Kennzahlen genannt, berechnet. Sie definiert eine Wassernutzungs- und verbrauchsmenge für eine bestimmte Energiebereitstellungstechnologie. Durch die Multiplikation mit den Primärenergieverbräuchen und mit Bezug zu den aus der Literatur erworbenen aquatischen Kennzahlen ist eine Aussage über Wassernutzung und -verbrauch in Bremen möglich. Auf Basis der Kraftwerkliste der Bundesnetzagentur ist eine Skalierung für Deutschland erfolgt und das ebenso für die aktuelle Energielandschaft, als auch für die Ausbaustrategien, indem der ermittelte Wasserbedarfswert je Energietechnologie multipliziert wird. Die Sachbilanz ist abgeschlossen und die Wirkungsabschätzung beginnt.

4.4 Wirkungsabschätzung

Die offiziellen Wirkungskategorien einer Ökobilanz mit Bezug auf Wasser, der Wasserverbrauch, wird um den Energiebezug erweitert. In dem Charakterisierungsmodell Status Quo Energielandschaft und Ausbauszenarien können die folgenden quantitativen und qualitativen Charakterisierungsfaktoren für die Wirkungsabschätzung herangezogen werden: der Wasserfußabdruck, der Wassernutzungsindex und der Wasserqualitätsindex.

Der Wasserfußabdruck berücksichtigt drei Wassertypen: grünes, blaues und graues Wasser, wobei die beiden ersten auf die Wassernutzung bezogen sind und letzteres auf die Wasserverschmutzung (Gerbens-Leenes et al., 2008). Ursprünglich ist der Fußabdruck für Produkte entwickelt worden. Neben dem direkten Wasserverbrauch ist auch der indirekte mit zu beachten. Dazu zählt einmal der interne Wasserfußabdruck, der sich auf Produkte bezieht, die landesintern genutzt und verbraucht werden, aber auch der externe Wasserfußabdruck, der die Exportprodukte für das Ausland mit einberechnet. In Deutschland beträgt der gesamte Wasserfußabdruck für Landwirtschaft, industrielle Produkte und den Haushalt 159,5 km³/ Jahr, wobei andere Datenquellen nur 125 km³/ Jahr annehmen (WWF Deutschland, 2009; Schubert, 2011).

Der Wasserfußabdruck für Prozesse ist als Wasserfußabdruck-Analyse zu sehen, welche optimalerweise entlang der gesamten vorgelagerten Lieferkette betrachtet wird, das heißt, einschließlich des lokalen und entfernten Wasserbedarfs. Er führt zu einer Vergleichsmöglichkeit des Wasserverbrauchs je produzierter Energieeinheit der verschiedenen Energiebereitstellungstechnologien (Flörke et al., 2021).

Da die Systemgrenzen aufgrund des Umfangs in dieser Masterthesis um den Wasserbedarf innerhalb des Betriebs der KW liegen, wird die Wasserfußabdruck-Analyse aufgrund zu geringer Aussagekraft nicht durchgeführt.

Der Wassernutzungsindex beschreibt das Verhältnis der gesamten Wasserentnahme des betrachteten Jahres zum langjährigen Wasserdargebot in Deutschland und liefert damit einen ersten Anhaltspunkt, ob die Nutzung der Wasserressourcen in Deutschland nachhaltig ist oder Wasserknappheit herrscht. Als Grenzwert und international gültiger Grenzwert wird dafür 20 % angesehen, wobei laut Definition ab 40 % ein starker Wasserstress diagnostiziert werden kann (UBA, 2019c).

Die Wasserqualität hingegen kann mit dem weit verbreiteten Ansatz, dem Wasserqualitätsindex kategorisiert werden. Die Qualität wird dabei mit einem einzigen Indexwert beschrieben und das Grundkonzept besteht aus der Auswahl relevanter Parameter und die Einbindung der Ergebniswerte in einen gemeinsamen Index. Der Einsatz ist einfach, erfordert nur wenige Eingabedaten und ist leicht verständlich in der Interpretation. Es kann des Weiteren davon ausgegangen werden, dass ein

zusammengesetzter Index genauere Rückschlüsse über die Qualität liefert als einzelne Parameter (van der Meulen et al., 2022).

Der Wasserqualitätsindex wird aufgrund fehlender deutschlandweiten Daten in der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt, aber stellvertretend eine Aufbereitung und Bewertung des chemischen Zustands der Wasservorkommen in Deutschland vorgenommen.

Der Wirkungsindikator für die ökobilanzielle Betrachtung ist die Verstärkung und Abschätzung des Wasserbedarfes mit dem Indikatorwert der aquatischen Kennzahl (m^3 Wasser pro kWh Energie), was zu der quantitativen Bewertung der Ausbauziele für die Energielandschaft Bremens beziehungsweise Deutschlands führt. Wirkungsendpunkte der Untersuchung sind die Trinkwasserversorgung, aber auch die Industriesektoren und die Energieproduktion allgemein. Um eine allumfassende Wirkungsabschätzung für die Endpunkte vorzunehmen, sind folgende Analysemethoden angewendet: die Fehlerabschätzung, die Schwerpunktanalyse und die Sensitivitätsanalyse.

Laut DIN EN ISO 14044 S.13 Nummer 3.33 ist die Fehlerabschätzung „ein systematisches Verfahren zur Quantifizierung der Unsicherheit in den Ergebnissen der Sachbilanz aufgrund kumulativer Effekte der Ungenauigkeit des Modells, von Inputunsicherheiten und der Variabilität der Daten“. Für diese Methode zur Unsicherheitsabgrenzung der Ergebnisse werden Tools der Wahrscheinlichkeitsverteilungen herangezogen.

Man unterscheidet systematische und zufällige Fehler. Systematische Fehler können die Unsicherheiten der verwendeten Software sein, das systematische Auslassen von Prozessschritten durch den Untersuchenden oder das Verwenden nicht repräsentativer Daten. Dagegen sind zufällige Fehler, bspw. Tippfehler bei der Dateneingabe, das Vergessen von Einträgen oder Rundungsfehler (Ciroth, 2001).

Die Schwerpunktanalyse bestimmt, welche Daten den größten Beitrag zum Indikatorwert ausmachen. Es ist also ein „statistisches Verfahren, was als Folge die identifizierten Daten mit erhöhter Priorität untersuchen lässt, um vernünftige Entscheidungen zu treffen“ (S.44 Nummer 4.4.4.2 DIN EN ISO 14044). Ein Beispiel für eine Schwerpunkt-Analyse ist laut S.44 Nummer 4.4.4.2 DIN EN ISO 14044 die Pareto-Analyse. Diese besteht aus vier Schritten, der Problemdefinition, dem Datensammeln, Ermitteln der Auswirkungen und dem Erstellen eines Pareto-Diagramms. Es wird in der Methode davon ausgegangen, dass 80 % der Auswirkungen durch 20 % der Ursachen begründet ist. Durch das Abbilden und methodische Vorgehen werden die Hauptverursacher identifiziert. In der vorliegenden Arbeit werden die größten Wasserverbraucher in der Energieproduktion in Bremen detektiert (Rauner & Budzinski, 2017).

Die Sensitivitätsanalyse ist ebenso eine systematische Analysemethode, die „zur Einschätzung der Wirkungen der getroffenen Auswahl an Methoden und Daten auf die Ergebnisse einer Studie“ genutzt

wird (S. 12 Nummer 3.3.1 DIN EN ISO 14044). Es werden also die Wirksamkeiten der Veränderungen in den Daten und die Wahl der methodischen Vorgehensweise auf die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung untersucht.

Dabei ist die Sensitivität als die Empfindlichkeit einer Ausgangsgröße auf die Veränderung einer oder mehrerer Eingangsgrößen definiert. Es wird überprüft, welche Modellparameter einen großen Einfluss auf das Systemverhalten ausüben und welche Parameter keinen oder nur geringen Einfluss aufzeigen und daher vernachlässigt werden können in der weiteren Betrachtung (Jacob, 2018).

Die Sensitivität, gekoppelt mit dem klimatischen Einfluss und dem räumlichen Vorkommen, ist somit relevant für die Ausprägung der Klimawirkung, die wiederum die Vulnerabilität des Systems beeinflusst. In Folge von Anpassungskapazitäten können Rückkopplungen auf die Sensitivität erfolgen. Die Methode ist dementsprechend eine gute Variante, um die Stabilität des Konzeptes Wasser in Deutschland zu testen (UBA, 2017).

Die Bewertung der Sensitivität durch die Energiebereitstellungstechnologien auf die Wasserwirtschaft wird in der vorliegenden Arbeit durch die Bewertung der energetischen Ausbaupfade Deutschlands qualitativ erfolgen.

Nach der Wirkungsabschätzung wird eine Potenzialanalyse und eine Nachhaltigkeitsbewertung vorgenommen.

4.5 Qualitative Auswertung

Eine Potenzialanalyse ist eine systematische Untersuchung auf festgelegte Parameter. In der vorliegenden Arbeit werden die Kriterien Grundressourcen, Infrastruktur, Industrie, politischer Rahmen und Kriterien-übergreifende Faktoren betrachtet (Du Tran, 2022). Untersuchte Bereiche je Kriterium sind im Folgenden aufgelistet:

1. Grundressourcen: erneuerbare und fossile Energiequellen, Wasserdargebot (Grundwasser und oberflächennahes Wasser), CO₂-Quellen und Emittenten
2. Infrastruktur: Stromnetz, Flächenverfügbarkeit, Energiespeicher und -verteilung (Wasserstoff)
3. Industrie: Technologieziele national und auf Bundeslandebene, H₂-Kompetenzen, Wasserverbraucher
4. Politischer Rahmen: Emissions-Reduktionsziele, H₂-Strategien, Wasserrichtlinien, politische Förderinstrumente, aktuelle politische Situation in der Ukraine (Krieg Russland)
5. Kriterien-übergreifende Faktoren: Bewertung der EE und der Ausbauziele, Datenverfügbarkeit

In der Potenzialanalyse werden verschiedene Potenzialebene untersucht und im Rahmen der Sachbilanz in der vorliegenden Arbeit aufgeführt. Dazu zählen ökologische, technische, wirtschaftliche, politische und soziale Aspekte, jedoch wird hier eine Trennung zwischen den Ebenen vorgenommen.

Für eine umfassende Bewertung ist eine Zusammenfassung der Ebenen notwendig, wodurch eine Kombination mit einer Nachhaltigkeitsbewertung erfolgt. Sie umfasst in ökologischen, wirtschaftlichen und sozial-kulturellen Aspekten ein Abbild des Gesamtsystems. Für die Bewertung der Nachhaltigkeit wurden 7 Kriterien bestimmt, welche die drei Dimensionen abbilden. Diese sind in der Tabelle 1 zusammengefasst. Aus einer aktuellen Herausforderung wurde das angestrebte Qualitätsziel definiert und anschließend ein Kriterium beziehungsweise ein Indikator als Maßstab bestimmt.

Tabelle 1: Nachhaltigkeitskriterien- und Indikatoren der ökologischen, ökonomischen und sozial-kulturelle Dimension nach (Flörke et al., 2021; Gapp-Schmeling, 2022).

Nr.	Herausforderung	Qualitätsziel	Kriterien und Indikatoren
Ökologische Dimension			
1.1	Klimaerwärmung	Klimaneutralität	THG-Emissionen in kg _{CO2ä} / MWh
1.2	Wasserbedarf	Geringer Nutzungsgrad an Wasserressourcen	Kumulierter Wasserverbrauch in m ³ /MWh
1.3	Zerstörung der Gewässerökosysteme	Naturverträglichkeit	Auswirkungen auf die Naturverträglichkeit (Wasserqualität)
Ökonomische Dimension			
2.1	Unzureichende Befriedigung der Grundbedürfnisse	Versorgungssicherheit und Systemstabilität	Redundanz der Energiebereitstellungstechnologien
2.2	Globale und außenwirtschaftliche Abhängigkeiten	Geringe außenwirtschaftliche Abhängigkeit	Energieabhängigkeitsquote von Energieträgern
Sozio-kulturelle Dimension			
3.1	Fehlentwicklungen in Wirtschaft, Politik & Gesellschaft	Good Governance	Erwartete Akzeptanz vor Ort
3.2	Gewaltsame Konflikte	Innere und äußere Sicherheit, globale Verträglichkeit	Konfliktpotential der eingesetzten Energiebereitstellungstechnologie

Eingeteilt sind die aufgelisteten Kriterien in jeweils drei Stufen, die mit Grenzwerten und/ oder Zustandsbeschreibungen abgegrenzt und in den nachfolgenden Tabelle 2 bis Tabelle 8 aufgelistet zu finden sind.

Für das Kriterium 1.1 der THG-Emissionen wurden die CO₂-Emissionen als Indikator gewählt. Typischerweise werden die Emissionen eines KW innerhalb eines Jahres ins Verhältnis zur Energieerzeugung dieses KW im selben Zeitraum gesetzt. Das Ergebnis ist ein Jahresmittel der spezifischen Emissionen dieses KW mit der Einheit g CO₂ pro kWh oder kg CO₂ pro MWh. Als oberster Grenzwert wäre ein top-down-Ansatz möglich, bei dem ausgehend von den

Emissionsminderungszielen der Bundesrepublik die Emissionsminderung innerhalb der Energieerzeugung bestimmt wird und der Grenzwert abgeleitet wird (Schäuble et al., 2014).

Aktuell existieren noch keine einheitlichen nationalen Regelungen und wegen besserer Übersichtlichkeit werden die Grenzwerte für diese Arbeit in Hundertern angegeben, wie in Tabelle 2 erkennbar.

Tabelle 2: Kriterium 1.1 THG-Emissionen in $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{MWh}$.

Stufe 1	-100 bis 100
Stufe 2	100 bis 200
Stufe 3	Über 200

Das Kriterium 1.2 der kumulierten und spezifischen Wasserverbräuche im Verhältnis zu der Energieproduktion werden auf Basis der vorgenommenen Literaturrecherche gewählt, um eine sinnvolle Einteilung zu ermöglichen (siehe Abschnitt 8.2). Es werden die Verbräuche und nicht die Nutzungen betrachtet, da diese potenziell in den Kreislauf zurückgeführt werden. Die gewählten Spannweiten sind in Tabelle 3 einzusehen.

Tabelle 3: Kriterium 1.2 Kumulierter Wasserverbrauch in m^3/MWh .

Stufe 1	0 - 0,1
Stufe 2	0,1 - 1
Stufe 3	> 1

Das dritte Kriterium der ökologischen Dimension ist die Naturverträglichkeit, die sich im Wasserkontext in der Wasserqualität der zurückgeführten Wassermenge nach Benutzung durch das KW abbildet. Dafür wurden drei Szenarien unterteilt, die in Tabelle 4 zu sehen sind.

Tabelle 4: Kriterium 1.3 Auswirkungen auf die Naturverträglichkeit (Wasserqualität).

Stufe 1	Keine Veränderung der Wasserqualität
Stufe 2	Kleine Veränderung, aber Rückführung möglich
Stufe 3	Keine Rückführung durch schlechte Qualität möglich

In Tabelle 5 ist die ökonomische Dimension mit dem Indikator der Redundanz abgebildet. Wichtig ist die Versorgungssicherheit und damit die Frequenz von Unterbrechungen in der Energielieferung durch die Energiebereitstellungstechnologien, die im Optimalfall bei 0 liegen sollte.

Tabelle 5: Kriterium 2.1 Redundanz der Energiebereitstellungstechnologien.

Stufe 1	Garantiert unterbrechungsfreie Versorgung
Stufe 2	Versorgung kann durch andere Energieträger kompensiert werden
Stufe 3	Keine unterbrechungsfreie Versorgung möglich

Ein weiterer wichtiger Indikator in der Wirtschaft ist die Unabhängigkeit von anderen Ländern in der Energieversorgung. Dementsprechend wurde die Energieabhängigkeitsquote über die Importquote

der Energieträger ausgewertet und prozentuale Grenzwerte für die drei Stufen festgelegt, wie in der Tabelle 6 abzulesen ist. Die Einteilung erfolgt auf Basis der gewählten Grenzwerte von bpb.

Tabelle 6: Kriterium 2.2 Energieabhängigkeitsquote von Energieträgern.

Stufe 1	0 - 45 %
Stufe 2	46 - 64 %
Stufe 3	> 64 %

In der sozio-kulturellen Dimension ist das erste Kriterium die erwartete Akzeptanz vor Ort. Stufenmäßig ist die Spannweite von einer großflächigen Unterstützung durch die Gesellschaft bis hin zu fehlender Akzeptanz und Protest möglich, wobei für diesen Indikator das aktuelle gesellschaftliche Geschehen wie bspw. die Fridays-For-Future-Bewegungen mit in Betracht gezogen wurden (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7: Kriterium 3.1 erwartete Akzeptanz vor Ort.

Stufe 1	Unterstützung aus der Gesellschaft
Stufe 2	Skepsis gegenüber der Technologie
Stufe 3	Keine Akzeptanz und Protest

Relevant in dieser Arbeit sind ebenso die globalen und nationalen Konfliktpotentiale durch die Energiebereitstellungstechnologien. Das Kriterium 3.2 bewertet zukünftig zu erwartende oder bereits vorherrschende Konflikte um die Energieträger auf Basis der Verteilung und/ oder dem mengenmäßigen Vorkommen, wie in Tabelle 8 erkennbar ist.

Tabelle 8: Kriterium 3.2 Konfliktpotential der eingesetzten Energiebereitstellungstechnologie.

Stufe 1	Kein Konfliktpotential im globalen Kontext
Stufe 2	Mäßiges Konfliktpotential absehbar (ungleiche Verteilung)
Stufe 3	Großes Konfliktpotential durch geringe Vorkommen

Alle drei Dimensionen sind als gleichrangig zu bewerten. Gleiches gilt für die Kriterien und statt einer Gewichtung wird eine visuelle Ausarbeitung in einem Diagramm vorgenommen. Dadurch wird der quantitative Werte der aquatischen Kennzahlen in ein Verhältnis zu den anderen beiden ebenso wichtigen Dimensionen gesetzt und es können Rückschlüsse auf die Nachhaltigkeit der Energiebereitstellungstechnologien gezogen werden. Je Energiebereitstellungstechnologie werden die Bewertungspunkte je Kriterium abgebildet und es kann eine Gesamtbilanz gezogen werden.

Für die Bewertung der qualitativen Aussagekraft der vorliegenden Arbeit sind die Güteklassen der verwendeten Daten zu betrachten. Die Sammlung und Ermittlung der Grunddaten erforderten innerhalb einer längerfristigen Suche das Finden von Ansprechpartner und der Daten in geeigneter Form, die im Optimalfall von diesen zur Verfügung gestellt werden. Die Fortschreibungsfähigkeit ist

gewährleistet, wenn die Daten dauerhaft verfügbar sind. Für eine möglichst genaue Abbildung der Realität sind die Daten mit der höchsten Güte zu nutzen. Eine Vergleichbarkeit der Daten entsteht durch den Bezug zu dem gewählten Bilanzjahr und das Umrechnen in eine einheitliche Bezugs-Basiseinheit. Dafür bieten sich die Grundeinheit kWh mit den abgeleiteten Einheiten MWh oder GWh an (Difu, 2018).

Bei der Ermittlung von Kennzahlen und Energiebilanzen sind zwei unterschiedliche Vorgehensweisen möglich. Zum einen können lokale Daten gesammelt und fehlende Daten mit regionalen oder bundesweiten Kennzahlen ergänzt oder auf der anderen Seite erste Ergebnisse über allgemeine Kennwerte ermittelt und diese über lokale, beziehungsweise regionalspezifische Detaildaten verfeinert werden. Wenn Daten auf bundesdurchschnittlichen Kennwerten basieren, bilden diese nicht die Realität lokal vor Ort ab. Die Datengüte liegt in der Regel bei D, wodurch eine Aufwertung durch lokale Daten empfohlen wird, um die Aussagekraft der Bilanz zu erhöhen. Lokal erhobene und damit primärstatistische Daten wird meist eine sehr hohe Datengüte zugeordnet und sind bevorzugt zu verwenden, sollten diese fortschreibungsfähig sein. Sollten keine lokalen Daten verfügbar sein, so kann auch über Hochrechnungen des Energieverbrauchs mithilfe von Kennwerten gearbeitet werden (Difu, 2018).

Für Bilanzen ist es empfehlenswert, die Datengüte anzugeben. Sie ist ein Maßstab für die Aussagekraft einer Bilanz und es ist das Ziel, eine möglichst hohe Datengüte zu erreichen. Für die Transparenz der vorliegenden Arbeit werden diese für die jeweiligen Datenquellen aufgelistet (Difu, 2018).

Dafür wird für jeden Energieträger und dessen Verbrauch eine Datengüte bestimmt, die auf der Datenquelle basiert. Die Datengüte einer Bilanz erhält man, indem der Anteil des Endenergieträgers am Gesamtenergieverbrauch mit der Datengüte multipliziert wird und diese ermittelten Werte für alle Energieträger aufaddiert werden (ifeu, 2019a).

Ebenso kann die Güte der zu ermittelnden aquatischen Kennzahlen mit dem gleichen Schema angegeben werden.

Die Wertung der Datengüte A bis D erfolgte folgendermaßen (Difu, 2018):

- Datengüte A sind regionale Primärdaten, die einem Faktor 1 zugeordnet werden.
- Datengüte B gehört zu Primärdaten und Hochrechnungen über Kennzahlen und bekommen den Faktor 0,5.
- Datengüte C umfasst regionale Kennwerte und Statistiken. Der Faktor ist in diesem Fall 0,25.
- Datengüte D sind bundesweite beziehungsweise deutschlandweite Kennzahlen mit zugeordnetem Faktor 0.

Die Aussagekraft der Belastbarkeit einer Bilanz ist von der Datengüter der Endergebnisse abhängig. Über 80 % werden als „gut belastbar“ definiert, wobei zwischen 65 und 80 % mit „belastbar“ eingeordnet werden. Unter 65 und bis hin zu 50 % sind „relativ belastbare“ Daten und unter 50 % werden die gesammelten Daten und damit auch die Gesamtbilanz als nur „bedingt belastbar“ eingestuft (Difu, 2018).

4.6 Lösungsstrategien

Zuerst werden die Nutzungskonflikte analysiert, die aufgrund der Energieproduktion existieren und in Zukunft entstehen. Diese werden mit den Maßnahmen und Instrumenten der Politik abgeglichen, ob eine Lösungsstrategie bereits vorgegeben ist. Daraus lassen sich Regeln zur Priorisierung zwischen den Energiebereitstellungstechnologien ableiten, die in einem Fachgespräch mit Expert*innen abgeglichen werden, um eine rechtliche Basis für die Priorisierung gewährleisten zu können (Tröltzsch et al., 2021).

Es werden auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse rechtliche und planerische Strategien für die Stabilisierung von Energie- und Wasserwirtschaft abgeleitet. Außerdem werden mit besonderem Fokus die Transportoptionen für Wasserstoff aufgezeigt sowie Vor- bzw. Nachteile.

In dem Themenbereich der Wasseraufbereitung werden die Abwasseraufbereitung und diverse Entsalzungsverfahren betrachtet und außerdem innovative und Synergie-Technologien für eine nachhaltige Zukunft vorgestellt. Dies ist relevant, um weitere Wasserquellen erschließen zu können und eine Versorgungssicherheit gewährleisten zu können.

Im Anschluss wird die Betroffenheit der Sektoren nach Maßnahmen untersucht. Das bedeutet, welche Maßnahmen sind bereits umgesetzt oder geplant und in welchem Handlungsspielraum. Hieraus lassen sich Maßnahmenlücken ableiten, welche für die Reaktionsfähigkeit auf Veränderungen auszubessern sind.

5. Energieversorgung in Deutschland

Die Leitfrage der Maserthese zielt auf die Bewertung der Ausbauziele bis hin zur Klimaneutralität ab. Dafür ist es notwendig, den aktuellen Stand der Energieproduktion, als auch die Ausbauprognosen zu untersuchen und aufzuzeigen. Des Weiteren wird der rechtliche Rahmen abgebildet sowie ein Exkurs auf den Einfluss des Krieges Russlands in der Ukraine auf die Energieversorgung gemacht.

5.1 Aktuelle Energieversorgung in Deutschland

Die aktuelle Energieversorgung in Deutschland wird in Bezug auf drei Aspekte betrachtet, dem Energiefluss, dem Stromdesign und dem Wärmesektor.

5.1.1 Energiefluss

Die nutzbare Endenergie entspricht nicht der dafür notwendigen bereitzustellenden Energiemenge. Die Endenergie berechnet sich aus der Primärenergie unter Addition der statistischen Differenzen, dem nichtenergetischen Verbrauch, dem Verbrauch in den Energiesektoren und den auftretenden Energieverlusten, die vorrangig durch Umwandlungs- oder Transportverluste entstehen. Die Endenergie ist somit die Summe der Energieträger an der Liefergrenze zum Endverbraucher und den Verbrauchssektoren Industrie, Verkehr, Haushalte sowie Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD). Der Primärenergieverbrauch ist der Energiegehalt von allen im Inland eingesetzten Energieträgern, also der Energieträger direkt nach der Förderung. Dazu zählen sogenannte Primärenergieträger, wie zum Beispiel Steinkohle oder Erdgas. Anschließende Umwandlungsschritte, wie die Umwandlung in elektrische Energie in einem KW oder die Aufbereitung von Erdöl in Raffinerien, lassen sekundäre Energieträger (Strom oder Heizöl) entstehen, werden verteilt und gelangen als sogenannte Endenergie zu den Endverbrauchern. Das Energieaufkommen in Deutschland für die Deckung des Bedarfes entspricht der Primärenergie plus der auf Hochsee gebunkerten Vorräte und der exportierten Energie (Ausfelder et al., 2017; UBA, 2022e).

In Abbildung 6 ist das Energieflussbild für Deutschland im Jahr 2020 abgebildet.

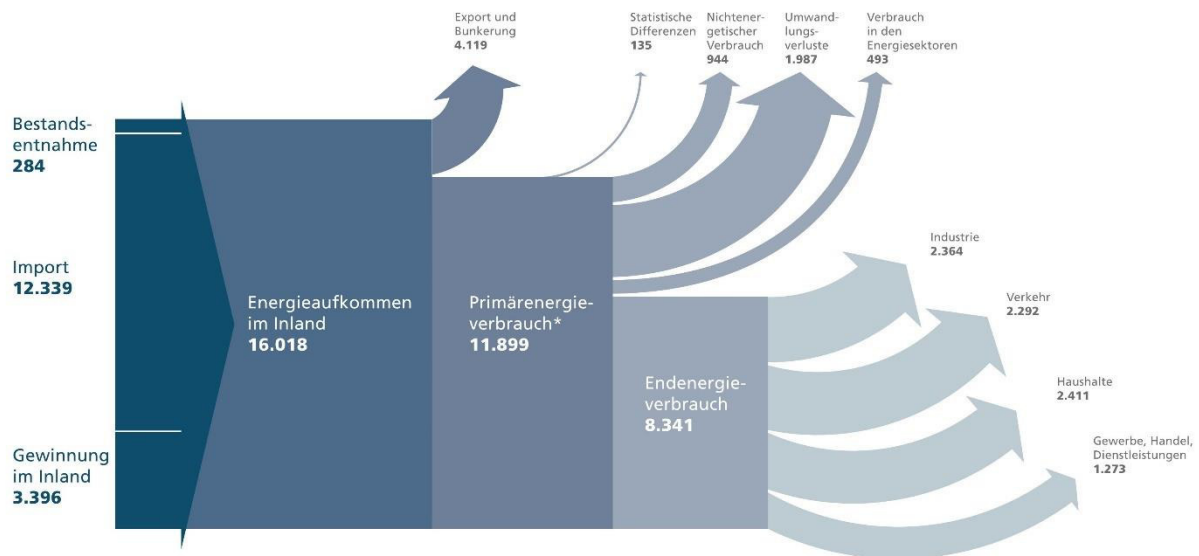


Abbildung 6: Energieflussbild Deutschland 2020 (AG Energiebilanzen e.V., 2021a).

Die über 16.000 PJ an Energieaufkommen im Inland werden zu 1,8 % aus der Bestandsentnahme gespeist. Des Weiteren werden rund 21,2 % im Inland gewonnen, für die Deckung des Bedarfes liegt der importierte Anteil damit bei über 77 %.

Im Jahr 2020 wurden Steinkohle und Uran vollständig importiert und zählen neben Mineralöl mit 98 % und Erdgas mit 94,4 % zu den Haupt-Primärimporten. Im Gegensatz dazu werden EE nur zu 0,8 % nach Deutschland eingekauft und Braunkohle zeigt einen negativen Wert einer Importquote von -2,2 %, was bedeutet, dass im Inland mehr gewonnen als verbraucht wird (UBA, 2022d).

In absoluten Zahlen erhöht sich der Primärenergieverbrauch von Deutschland auf 12.193 PJ im Jahr 2021, was einem Plus von 2,6 % entspricht (AG Energiebilanzen e.V., 2021b). EE haben in beiden Jahren einen Anteil von 16 %, wie in Abbildung 7 erkennbar ist. Den größten prozentualen Anteil 2021 haben Öl mit 32 % und Erdgas mit 27 %. Verglichen mit dem Vorjahr 2020 bedeutet das größtenteils identische prozentuale Werte für die Energiequellen des Primärenergieverbrauchs, wobei fossile Energieträger wie Braun- und Steinkohle und Kernenergie ein Plus um 1 % erfahren (UBA, 2022e; AG Energiebilanzen e.V. & BMWi, 2022) .

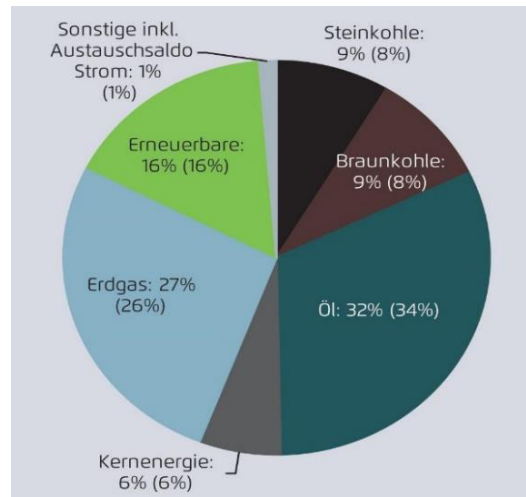


Abbildung 7: Primärenergieverbrauchsmix 2021 (Werte für 2020) (Agora Energiewende, 2022b).

Braunkohle wird in Deutschland fast vollständig in der Energiewirtschaft für KW eingesetzt. Bei Steinkohle kommt es neben der Nutzung im Energiebereich auch zu einer Verwendung in Industrieanwendungen, wobei besonders die Stahlindustrie Verbraucher ist. Erdgas hat ebenso weitere Nutzungsbereiche wie Industrien, Haushalte und GHD, aber ist mit knapp 1/5 der Energie in 2021 für Heiz- und Kraftwerke genutzt worden (Weltenergieat Deutschland e. V., 2021a; UBA, 2021b).

Die Energiegewinnung in Deutschland belief sich 2020 auf ein Volumen von 3.396 PJ. Vorrangig basiert die inländische Gewinnung auf den Energieträger Braunkohle (979 PJ), Wasser- und Windkraft (720 PJ), Naturgase (175 PJ) und Mineralöl (81 PJ), wodurch Importnotwendigkeiten entstehen (BMWi, 2022a).

Für den Endenergieverbrauch zeigt sich, wie auch beim Primärenergieverbrauch, keine bis leicht sinkende Veränderung des Anteils erneuerbarer Energien zwischen 2020 und 2021 (AGEE-Stat, 2022). Diese Werte sind ein Abbild der stagnierenden Entwicklung des Anteils EE und Deutschland entfernt sich somit bezogen auf die THG-Emissionen vom Pfad zum 2030 Klimaziel.

Aktuell (Stand 2021) ist in Deutschland eine Kraftwerksleistung von 223 GW installiert, wobei Windkraft und PV über 50 % ausmachen. Bei den fossilen Energieträgern sind Braunkohle und Erdgas mit zusammen über 20 % am meisten vertreten. Deutschlandweit sind große Unterschiede erkennbar, bezogen auf die Verteilung fossiler zu erneuerbaren Energietechnologien (UBA, 2022b).

Das Prinzip des Energieflusses in Deutschland basiert auf einem komplexen System aus Umwandlungsschritten bis hin zur Endenergie und deren Anwendung in verschiedenen Sektoren. Wie vorher in zahlenmäßiger Aufarbeitung dargestellt, werden vor allem aus fossilen Brennstoffen die Primärenergie bezogen. Mineralöl als Hauptquelle findet vorrangig Anwendung im Verkehrssektor, wohingegen Erdgas für die Erzeugung von Niedertemperatur- und Prozesswärme notwendig ist. Die beiden Energiequellen Kohle und Kernkraft werden überwiegend für die Stromerzeugung eingesetzt.

EE sind teilweise ebenso für die Stromerzeugung genutzt, als auch für die direkte Nutzung benötigt. Des Weiteren wird über KWK die Wärmebereitstellung gespeist, die mit der Stromerzeugung gekoppelt ist. Betrachtet man die gesamte Primärenergie bezogen auf das Volumen, wird sie nur zu ungefähr einem Drittel als Nutzenergie für die Sektoren verwendet und die größten Verlustströme entstehen im Verkehrssektor, aber auch bei der Stromerzeugung in thermischen KW (Ausfelder et al., 2017; Bormann et al., 2019).

5.1.2 Stromdesign

Mit einem Anteil erneuerbarer Erzeugung im Jahr 2021 von knapp 41 % des Bruttoverbrauchs hat die Stromversorgung bereits signifikante EE-Anteile erreicht. Von den insgesamt 582 Mrd. kWh Strom ist jedoch die prozentual größte Quelle mit über 18 % die Braunkohle (siehe Abbildung 8) (AG Energiebilanzen e.V., 2022; BMWi, 2022b).

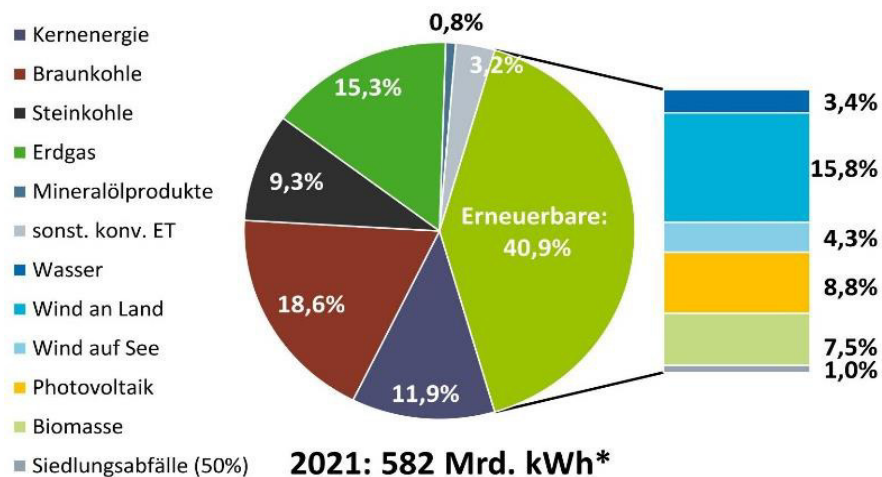


Abbildung 8: Bruttostromerzeugung nach Energieträgern in Deutschland 2021 (BDEW, 2021).

Im Vergleich zum Vorjahr ist der Anteil EE am Strommix im Jahr 2021 gesunken, was teilweise den Witterungsbedingungen zugeschrieben wird, das heißt, zum Beispiel geringere Windgeschwindigkeiten. Generell wurde das Jahr 2020 als überdurchschnittlich gut von den Witterungsbedingungen für EE eingestuft, wodurch der Rückgang der Produktion im Jahr 2021 teilweise natürlichen Rahmenbedingungen geschlussfolgert wird (Fraunhofer ISE, 2022).

In Abbildung 9 sind die absoluten Differenzen der Bruttostromerzeugung nach Energieträgern von 2020 auf 2021 dargestellt. Bereits erwähnte Witterungsbedingungen können für den Rückgang von Wind an Land und auf See (On- und Offshore) herangezogen werden. Ausgeglichen wurden die aufgetretenen Stromdefizite durch eine Erhöhung der Kraftwerksstromproduktion aus Stein- und Braunkohle.

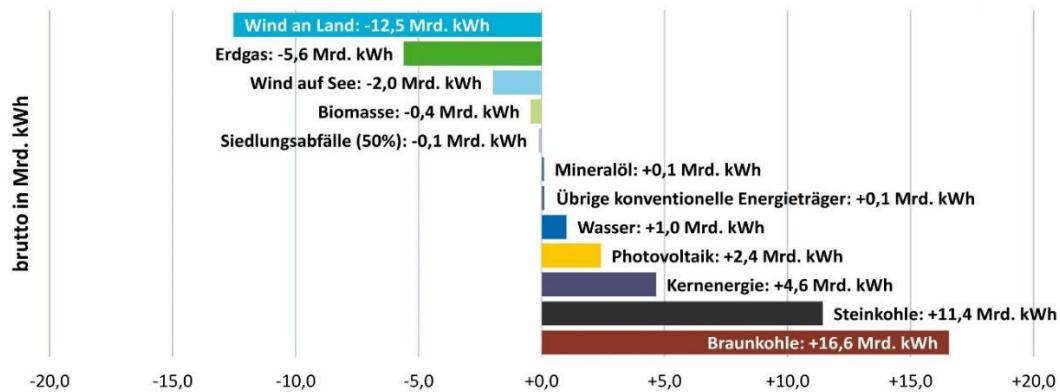


Abbildung 9: Bruttostromerzeugung, absolute Differenzen nach Energieträgern von 2020 auf 2021 (BDEW, 2021).

Die Tendenzen im Stromsektor spiegeln die Entwicklungen der Energieerzeugung wider und es ist besonders ein Zuwachs aus fossilen Energiequellen erkennbar. Es ist notwendig, dass diese konventionelle Stromerzeugung auf Basis fossiler Energien umstrukturiert wird, was in den nächsten Jahren, besonders durch regional unterschiedliche Stromnachfrage, große Herausforderungen mit sich bringen wird (Kendziorski et al., 2021). Der Strombedarf je Hektar ist besonders in stark besiedelten Gebieten höher als in bspw. ländlichen Regionen. Dies ist besonders logistisch eine Herausforderung. Nichtsdestotrotz existieren Hochrechnungen, die eine Strom- und Energiebedarfsdeckung in Deutschland 100 % durch EE als möglich und realistisch darstellen (Göke et al., 2021; Agora Energiewende, 2022a).

5.1.3 Wärmesektor

Neben dem Strom ist auch die Wärme- und Kältetechnik ein großer Endenergienutzer. Über die Hälfte mit 52,1 % des gesamten Endenergieverbrauchs im Jahr 2020 sind diesem Sektor zugeordnet, wie in Abbildung 10 erkennbar.

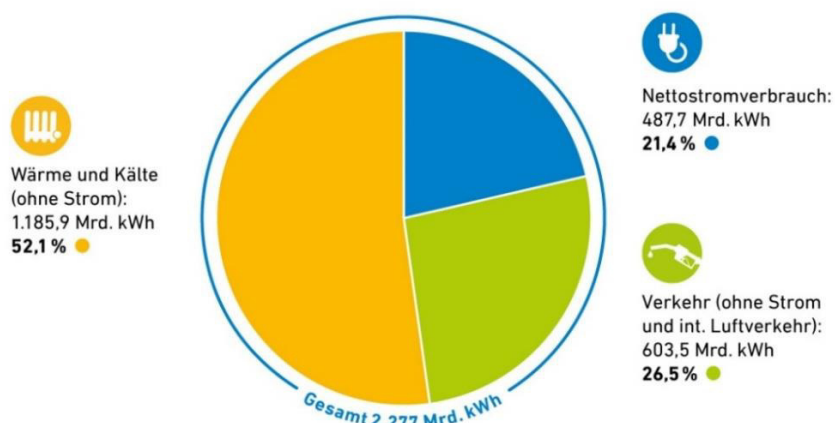


Abbildung 10: Endenergieverbrauch Wärmesektor in Deutschland im Jahr 2020 in Mrd. kWh (Agentur für erneuerbare Energien e.V., 2021).

Wärme wird unterschiedliche Anwendungsbereiche genutzt, wie vorrangig Raumwärme und die Prozesswärme, aber auch für Warmwasser und Kälteerzeugung ist sie notwendig. Anwendung findet

die Wärme in den drei Endverbrauchssektoren Private Haushalte, Industrie sowie GHD und knapp ein Zehntel des Wärmebedarfs wird durch Fernwärme gedeckt (UBA, 2022c).

Die Verteilung der Energieträger an der Wärmeerzeugung im Jahr 2021 ist in Abbildung 11 dargestellt und es ist erkennbar, dass überwiegend fossile Quellen genutzt werden. Der Hauptenergieträger ist Erdgas mit knapp der Hälfte der Anteile an der Nettowärmeerzeugung, gefolgt von Steinkohle mit knapp 14,3 %. EE nehmen 17,5 % im Jahr 2021 ein, hier werden Biomasse, biogener Siedlungsabfall und Geo- und Solarthermie verwendet (BMWK, 2022).

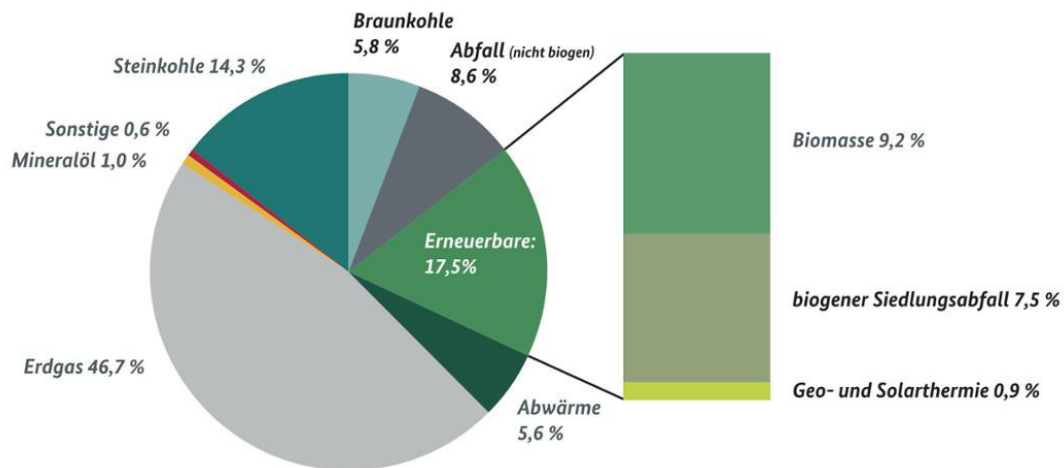


Abbildung 11: Nettowärmeerzeugung in Deutschland 2021 nach Energieträgern (BMWK, 2022).

Die Wärme entsteht über die Verbrennung fossiler Rohstoffe in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK), welche neben Strom auch Wärme erzeugen. Trotz Effizienzsteigerung durch die parallele Produktion ist die Nutzung fossiler Brennstoffe klimaschädlich. Es besteht Handlungsbedarf und der beschlossene Kohleausstieg erfordert nachhaltigere Alternativen (BMWK, 2022).

5.2 Rechtliche Rahmenbedingungen der Energiewirtschaft

Die europäische Rechtsebene hat im Jahr 2021 im Rahmen der Energie- und Klimapolitik einige Umbrüche erzielt. Dazu zählt der European Green Deal mit dem EU Clean Energy Package, welches saubere Energie für alle Europäer als Ziel hat und das europäische Klimagesetz, welches europaweit die Klimaneutralität bis 2050 verbindlich festsetzt. Mit dem Fit-for-55 Paket wurde ein großes Maßnahmenpaket für das Zwischenziel von mindestens 55 % weniger THG-Emissionen bis zum Jahr 2030, verglichen mit dem Referenzjahr 1990, verabschiedet. Durch das europäische Klimagesetz ist der rechtliche Rahmen für die Verwirklichung der Klimaneutralität und für die Änderung der Verordnungen gegeben (Agora Energiewende, 2022b).

Der durch die Europäische Kommission, ebenfalls in 2021 veröffentlichte, EU-Aktionsplan „Towards a Zero Pollution Ambition for air, water and soil“ hat die Zielstellung, Europa als grüne, digitale und

wirtschaftliche Führungsrolle zu stärken und gleichzeitig ein gesünderes, sozial gerechteres Europa im Einklang mit dem Planeten zu schaffen (BDI e.V., 2021).

Für Deutschland sind mit der Klimaschutzverordnung verbindliche nationale Jahresziele für die Reduktion der Treibhausemissionen im Zeitraum von 2021-2030 gesteckt. Die Verordnung umfasst Klimaschutzmaßnahmen, die zur Erfüllung der verpflichtenden Abkommen von Paris, aber auch den europäischen Richtlinien dient.

Laut § 1 (1) Satz 1 KSG ist der Zweck dieses Gesetzes auf nationaler Ebene ebenfalls die „Erfüllung der nationalen Klimaschutzziele sowie die Einhaltung der europäischen Zielvorgaben zu gewährleisten“. In § 3 (2) Satz 2 wird die Netto-THG-Neutralität Deutschlands bis zum Jahr 2045 und nach dem Jahr 2050 sogar das Ziel der negativen THG-Emissionen auf Bundesebene festgelegt.

In dem Koalitionsvertrag hat die Ampelkoalition einen vorgezogenen Kohleausstieg festgelegt, der im Jahr 2030 erfolgen soll (Agora Energiewende, 2022b). Das sogenannte Kohleausstiegsgesetz zeigt einen rechtlich verbindlichen Pfad zur schrittweisen Stilllegung der Kohle-KW in Deutschland vor. In dem 2020 verabschiedeten Gesetz wird mit einem Zeitpuffer gearbeitet, der besagt, dass 2030 noch 17 GW am Netz sein dürfen und spätestens zwischen 2035 und 2038 alle Kohle-KW stillgelegt sein müssen (BCG & BDI e.V., 2021).

Relevant für die Energieproduktion ist ebenso das KWKG, welches Anlagen fördert, die neben Strom, auch Wärme produzieren. Diese KW zeigen meist eine hohe Effizienz auf und sind somit zielführend für die Emissionsminderung in dem Sektor der Energiewirtschaft (BCG & BDI e.V., 2021, S. 157).

Um die ambitionierten Ziele auf europäischer und Bundesebene erreichen zu können, ist das Vorantreiben der Energiewende notwendig und damit der radikale Ausbau erneuerbarer Energien.

5.3 Ausbauziele der Energiewirtschaft

Neben der Darstellung der aktuellen energiewirtschaftlichen Lage sind vor dem Hintergrund der festgelegten Klimaneutralität 2045 Prognosen für die Zukunft relevant. Die Energiewirtschaft hat einen nicht unerheblichen Anteil an den Kohlestoffdioxid-Emissionen und im Jahr 2020 belief sich das Volumen auf 608 Mt CO₂ Äquivalente (BMW i, 2022a).

5.3.1 Vergleich verschiedener Ausbauprognosen

Ein im Jahr 2018 von Boston Consulting Group (BCG) und dem Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. (BDI) zusammen mit der Prognos AG gemeinsam veröffentlichten Studie „Klimapfade für Deutschland“ werden in verschiedenen Szenarien volkswirtschaftlich optimierte CO₂-Reduktionspfade für alle Sektoren dargestellt. Durch Verschärfungen der deutschen Klimaziele seit der Herausgabe wurde die Fassung überarbeitet und im Jahr 2021 als „Klimapfade 2.0“ herausgebracht (BCG & BDI e.V., 2021).

Sichtbar wird das Anheben der Ziele in den absoluten Zahlen, dargestellt in Abbildung 12. Es ist der Emissionsverlauf in Deutschland von 1990 – 2045 beziehungsweise 2050 je Sektoren nach altem und neuem Klimaschutzgesetz erkennbar. Bezogen auf das Referenzjahr 1990 sind in der Energiewirtschaft die Emissionen um 45 % zurückgegangen. Gerechnet von dem Ziel der Klimaneutralität 2045 sind die Ziele für das Jahr 2030 erhöht. Statt einer Reduzierung um weitere knapp 32 % verglichen mit dem Jahr 2019 ist für das Erreichen der Nullemissionen in Deutschland eine Reduktion um weitere 58 % der Emissionen im Sektor Energiewirtschaft notwendig (BCG & BDI e.V., 2021).

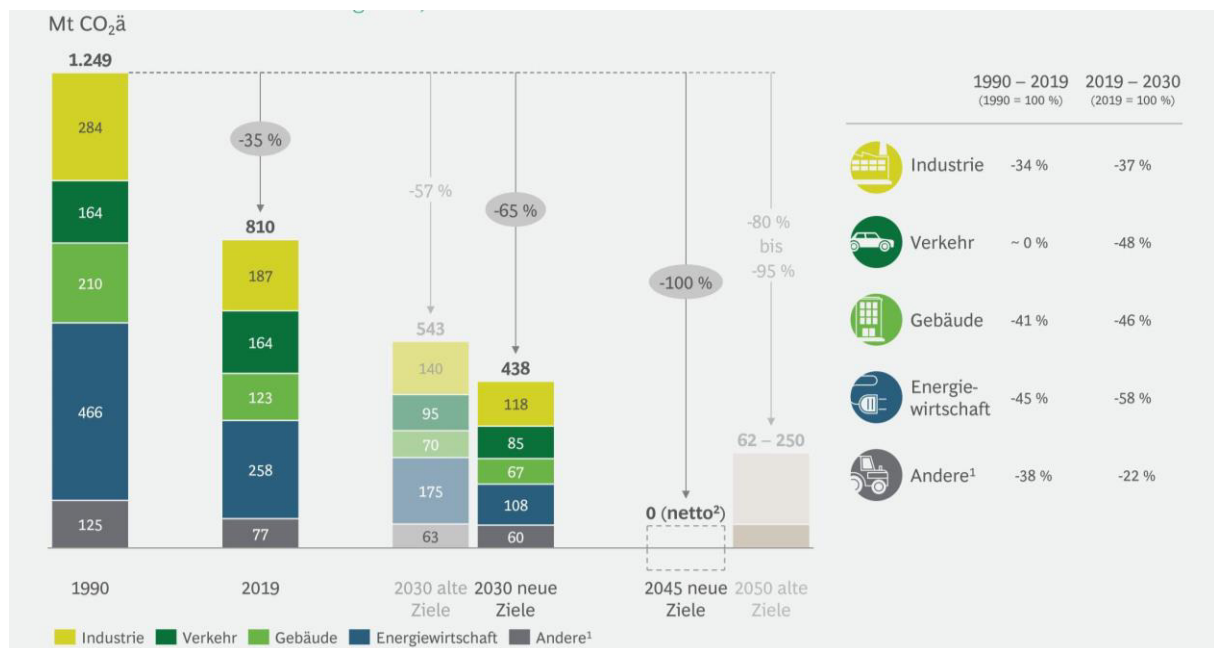


Abbildung 12: Emissionsverlauf in Deutschland 1990- 2045/2050 nach altem und neuem Klimaschutzgesetz (BCG & BDI e.V., 2021).

Die Energiewirtschaft hat verglichen mit allen anderen dargestellten Sektoren seit 1990 am meisten Emissionen bis 2019 reduziert. Auch in der Etappe von 2019 bis 2030 gilt für den Sektor das höchste Ziel in prozentualen Zahlen. Mit Einbezug des notwendigen Anstieges der Stromnachfrage zur Dekarbonisierung der anderen Sektoren ist die absolute Zahl der Reduktionen umso größer (dena, 2021; BCG & BDI e.V., 2021). Für die Energiewirtschaft werden im Jahr 2030 108 Mio. t CO₂ä eingerechnet (Weltenergieat Deutschland e. V., 2021a).

Nach dem erklärten Ziel der Bundesregierung, bis 2045 die Klimaneutralität zu erreichen, wurden mehrere Zukunfts-Prognosen für die Energiewirtschaft veröffentlicht, unter anderem auch die Zusammenfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende (Prognos AG et al., 2021). Von den gesamten Zielwerten für die Emissionen in den Jahren 2030 und 2045 unterscheidet sich die Ausarbeitung nicht von den Klimaschutzpfaden, es wird der Energiewirtschaft jedoch schon im Jahr 2030 rund 10 Mio. t CO₂-Äqu. weniger zugeteilt und ein Wert von 98 statt 108 Mio. t CO₂-Äqu. prognostiziert.

Neben der Einbindung erneuerbarer Energien ist ebenso eine Effizienzsteigerung und damit die Abnahme des Energiebedarfes für die Klimaneutralität notwendig. In Abbildung 13 ist der Energiebedarf nach Energieträgern untergliedert von 2018 bis 2050 dargestellt.

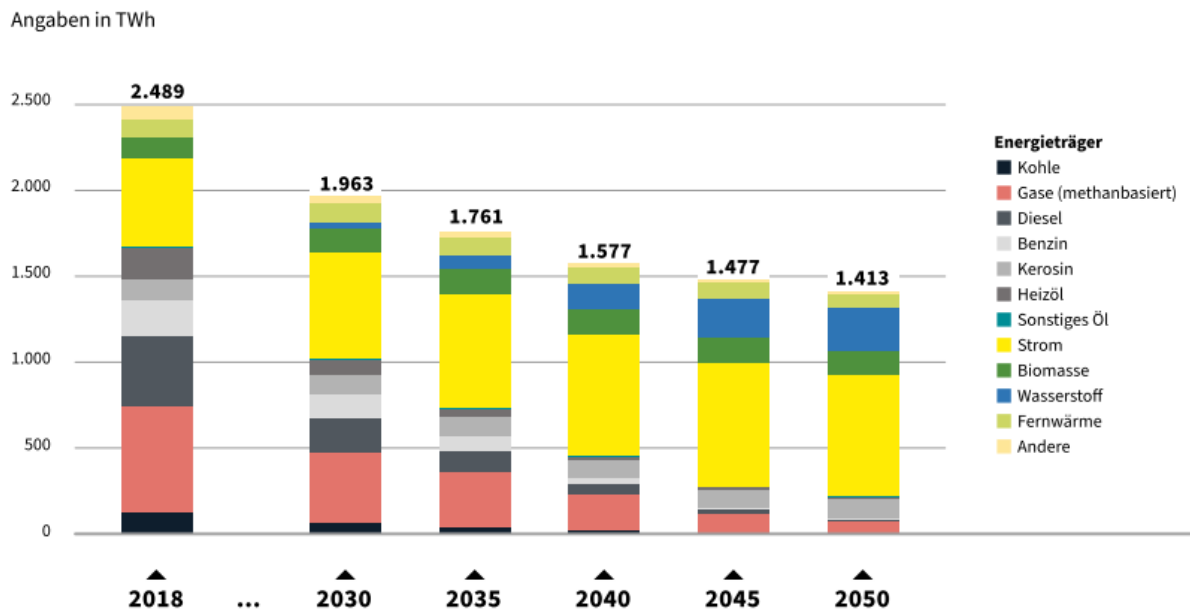


Abbildung 13: Energiebedarf nach Energieträgern in Deutschland 2018-2050 (dena, 2021).

Den größten Anteil für die Deckung des Energiebedarfes in der Zukunft wird dabei Strom zugeordnet. Neben dem Erhöhen des Anteils erneuerbarer Energiequellen sind ebenso stark ausgebaute Stromnetze notwendig, die unter anderem die Ausweitung des ambitionierten NEP 2035 und Vorziehen der Fälligkeit auf 2030 verlangen (BEE, 2021; BCG & BDI e.V., 2021).

Neben der notwendigen Erhöhung des jährlichen Zubaus, beziehungsweise einem massiven Ausbau der EE, ist zeitlich parallel eine deutliche Beschleunigung der Netzausbauplanung unabdingbar für die Erfüllung der Klimaneutralität im Jahr 2045 (Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, 2022).

5.3.2 Wasserstoffstrategie

Wasserstoff, vielseitig nutzbar, wird eine Schlüsselrolle für eine klimaneutrale Energiewirtschaft in Deutschland, aber auch weltweit zugesprochen (Bett et al., 2021). Sowohl für den Einsatz als Energieträger im Bereich der Gebäudewärme und dem Stromsektor als auch als stoffliches Element für die Stahl- oder Chemieindustrie wird Wasserstoff als vielversprechender Allrounder in den letzten Jahren vermarktet (Lübcke, 2022), unter anderem durch die positiven Effekte auf die Versorgungssicherheit, die aufgrund der Abhängigkeit von den natürlichen Rahmenbedingungen bei der Nutzung erneuerbarer Energiequellen nicht immer gegeben ist. Zur Absicherung der Energieversorgung und einer Wechselwirkung zwischen den Sektoren, beziehungsweise Sektorenkopplung, werden PtX-Verfahren als zentraler Lösungsansatz angesehen. Im Mittelpunkt

steht die Erzeugung von grünem Wasserstoff mittels Strom durch Elektrolysetechnologien von PtG-Anlagen (Birth et al., 2021).

Im Rahmen der angestrebten Klimaneutralität werden als Notwendigkeit Bruttozubauwerte für EE und Elektrolyseure vorausgesetzt. Zwischen den Jahren 2021 und 2030 sind es 0,8 GW pro Jahr. Dies würde zu einer Kapazität von 5 GW in ganz Deutschland im Jahr 2030 führen (World Energy Council Europe, 2021). In der nachfolgenden Zeitspanne bis 2045 müssen jährlich 2,7 GW an Elektrolyseurkapazität zugebaut werden. Das sind 0,8 GW mehr als für die Klimaneutralität 2050 notwendig wären (Prognos AG et al., 2021).

Die nationale Wasserstoffstrategie rechnet mit einem Bedarf von 90 – 110 TWh an Wasserstoff jährlich. Der Fokus soll, wie bereits erwähnt, auf grünem Wasserstoff liegen. Die Zielsetzung der inländischen Erzeugerkapazität ist angewiesen auf eine Strommenge aus EE von rund 20 TWh/a. In der aktuellen Hochrechnung ist eine heimische Wasserstofferzeugung von 14 TWh pro Jahr bei 4.000 Volllaststunden und einem Wirkungsgrad von 70 % möglich. Dies schlussfolgert notwendige Importe für die Deckung des Gesamtbedarfes zwischen 76 und 96 TWh/a. Neben der Entwicklung von Elektrolyseanlagen ist parallel auch die Transport- und Verteilinfrastruktur mitzudenken (BMW, 2020; SCI4climate.NRW, 2021) .

Einen Überblick über die aktuelle Projektlage ist in Abbildung 14 erkennbar.

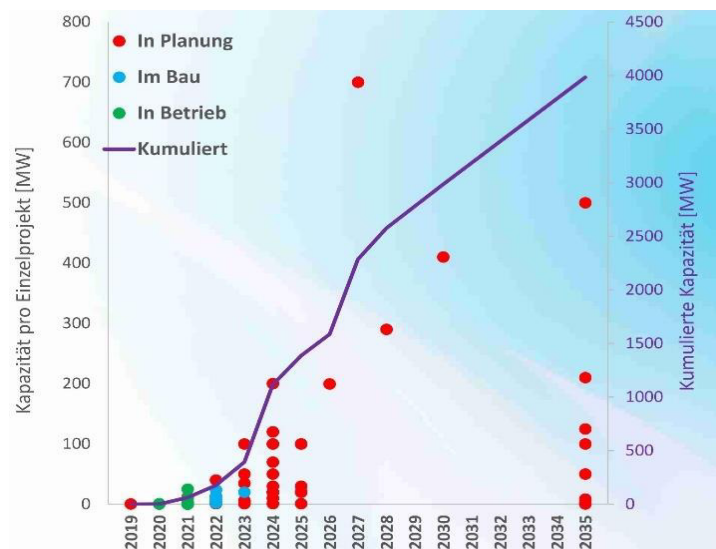


Abbildung 14: Elektrolysekapazitäten von Wasserstoffprojekten (einzeln und kumuliert) (Lübcke, 2022).

Es sind sowohl die Kapazität der Einzelprojekte (links), aber auch die kumulierte Kapazität der Wasserstoffprojekte gesamt (rechts) dargestellt. Man sieht ein deutliches Defizit zu den angestrebten 5 GW im Jahr 2030 an Elektrolysekapazität in der nationalen Wasserstoffstrategie, die durch einen stärkeren Ausbau ausgeglichen werden müssen.

5.4 Relevanz aktueller Geschehen: Krieg in der Ukraine

Russlands Invasion in die Ukraine erschüttert die Energiemärkte und Geopolitik und erhöht die Öl- und Gaspreise auf ein, seit einer Dekade, höchstes Level. Folglich werden die Energielieferungen in der Welt, aber auch in Deutschland, neu überdacht, da Russland der weltgrößte Ölexporteur ist. Das Umdenken der Energiepläne auf globaler und Landesebene kann Folgen im Bereich der Lebensmittelkrise und der Klimakrise nach sich ziehen. Die wichtigste Frage aktuell ist die Absicherung der Energieunabhängigkeit von Russland. Die europäische Union (EU) importiert ungefähr 40 % des Erdgases, mehr als ein Viertel des Erdöls und die Hälfte der Kohlelieferungen aus Russland (Stand 2019). Besonders akut ist die Krise in Deutschland, da Russland die Bezugsquelle für ungefähr die Hälfte des Erdgases, der Kohle und mehr als ein Drittel des Erdöls darstellt. Die Herausforderung wird verschärft durch den Atomstopp, der die letzten drei KW Ende diesen Jahr 2022 schließen lässt. Durch den Umstieg auf EE kann der Gesamtbedarf an fossilen Energieträgern reduziert werden (Tollefson, 2022; Bauer et al., 2022).

Nach aktuellen Gegebenheiten wird über eine Änderung des Atomgesetzes diskutiert, mit dem die Berechtigung für den Betrieb der drei Atomkraftwerke um mindestens zwei weitere Jahre, also bis Ende 2024, verlängert werden würde (Deutscher Bundestag, 2022).

In der Stellungnahme der Leopoldina wird herausgearbeitet, dass auch ein kurzfristiger Lieferstopp von russischem Gas für Deutschland handelbar wäre, wobei es zu Engpässen im nächsten Winter kommen könnte. Bei unmittelbarer Umsetzung einiger Maßnahmen wären die negativen Folgen inklusive sozialer Auswirkungen eindämmbar. In Zahlen hat Erdgas in Deutschland einen Anteil am Primärenergieverbrauch von über 25 % (siehe Abbildung 7) und wird überwiegend für industrielle Prozesse und in privaten Haushalten genutzt. Erdgas wurde kürzlich durch die Europäische Kommission im Rahmen ihrer Energie-Taxonomie als notwendig eingestuft, um auf dem Energietransformationspfad hin zur Klimaneutralität im Jahr 2045 in einer Übergangsphase sowohl Energiebedarf kontinuierlich und zuverlässig zu decken und gleichzeitig eine Stabilitätsreserve aufzubauen. Aktuell existieren in Deutschland 51 Erdgas-Kavernenspeicher mit einer Kapazität von insgesamt 275 TWh (25 Mrd. m³), was in etwa 30 % des Jahresverbrauchs des Landes entspricht. Allerdings sind die Speicher zurzeit nur zu 28 % gefüllt und ist einem durchschnittlichen Monatsverbrauch gegenzurechnen. Für eine kurzfristige Entlastung könnte über die Substitution der Leistung aus heimischer Kohle geschaffen werden, was ohne Änderungen der Infrastruktur einhergehen kann. Mittelfristig soll aber am Kohleausstieg 2030 festgehalten werden, da er eine Unabhängigkeit von russischer Kohle schlussfolgert bei einem aktuellen Anteil an den deutschen Kohleimporten von 50 %. Eine größere Herausforderung stellt der Ersatz russischen Gases bei der Erzeugung von Prozess- und Heizwärme dar und sollte durch eine Kombination aus erneuerbarem

Strom und Wasserstoff ersetzt werden. In diesem Fall sind enorme zusätzliche Mengen von heimisch erzeugter und importierter Energie sowie eine Umrüstung der Anlagen und Infrastrukturen erforderlich. Langfristige Maßnahmen umfassen die beschleunigte Transformation zur Klimaneutralität, insbesondere durch den Infrastrukturausbau für Wasserstoff und seiner Derivate, durch direkte Wasserstoffimporte und den Ausbau erneuerbarer Energien. Die zweite langfristige Maßnahme ist die Überprüfung der Transformationspfade vor dem Hintergrund der neuen Rahmenbedingungen, die vor allem die erhöhten Gaspreise betreffen (Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina, 2022).

5.5 Umweltauswirkung der Energieträger

Für die Energiewende sind Technologien notwendig, die weniger CO₂ in ihrer Produktion emittieren (Ausfelder et al., 2017). Eine der Säulen für das Erreichen der Klimaneutralität 2045 ist die umfassende Nutzung von EE (dena, 2021).

Die spezifischen Kohlendioxid-Emissionen von Braunkohle-KW sind je nach Herkunft abweichend, aber mit mindestens 97.920 kg CO₂ / TJ ist der Emissionsfaktor von Braunkohle Spitzenführer, dicht gefolgt von Steinkohle-KW mit derzeit 93.572 kg CO₂ / TJ. Zweitgrößter fossiler Energieträger ist Erdgas, dessen Anlagen 55.826 kg CO₂/ TJ emittieren. Die vergleichsweise niedrige Kennzahl entsteht zum einen durch den hohen Wirkungsgrad, aber auch durch den Brennstoff selbst, da bei der Verbrennung pro erzeugter Energieeinheit weniger Kohlendioxid als bei der Verbrennung von Kohle entsteht (UBA, 2022b).

In Abbildung 15 sind die spezifischen THG-Emissionen nach EE dargestellt. Für die Energiebereitstellungstechnologien sind die Emissions- und Brutto-Vermeidungsfaktoren aufgerechnet und dann als Netto-Vermeidungsfaktor rechts untereinander aufgelistet.

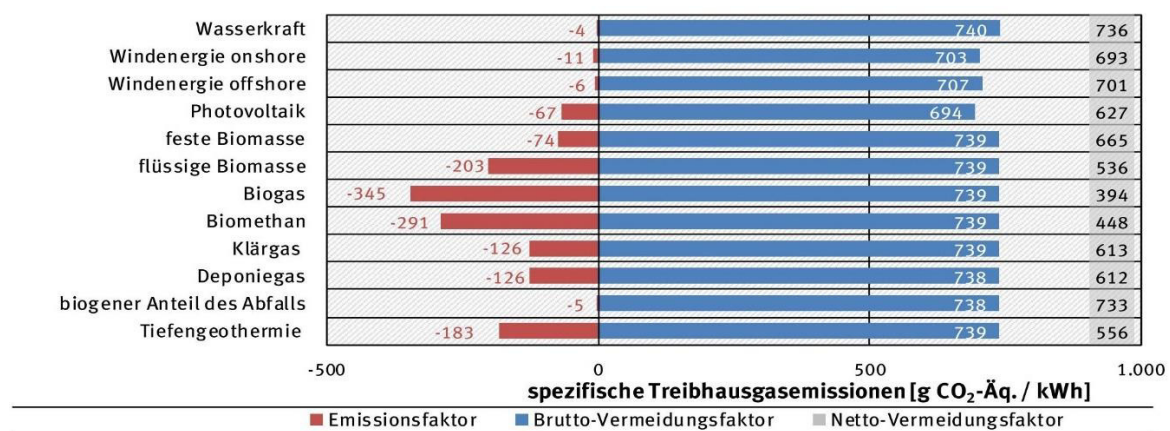


Abbildung 15: Spezifische Treibhausgasbilanz der Brutto-Stromerzeugung aus EE im Jahr 2018 nach Energieträgern (UBA, 2019d).

Je nach Energiequelle sind CO₂-Faktoren zuzuordnen, die aufgrund der Herstellung entstehen und emittiert werden. In Tabelle 9 sind die relevanten fossilen und erneuerbaren Energieträger aufgelistet.

Tabelle 9: CO₂ Faktoren Energieträger (UBA, 2019d; ifeu, 2019b; Quaschnig, 2021; BAFA, 2021).

Energieträger	Einheit	CO ₂ -Faktor
Biomasse	kgCO ₂ /MWh	27
Biogas	kgCO ₂ /MWh	152
Klärschlamm	kgCO ₂ /MWh	10
Erdgas	kgCO ₂ /MWh	201
Kernenergie	kgCO ₂ /MWh	12
Steinkohle	kgCO ₂ /MWh	354
Braunkohle	kgCO ₂ /MWh	383
Mineralöl	kgCO ₂ /MWh	264
Wasserkraft	kgCO ₂ /MWh	-4
PV	kgCO ₂ /MWh	-67
Windenergie Onshore	kgCO ₂ /MWh	-11
Geothermie	kgCO ₂ /MWh	35

Es ist erkennbar, dass EE vorrangig eine positive Wirkung gegenüber dem Treibhauseffekt haben. Besonders effektiv ist die Wasserkraft, die Windenergie und PV. Vor dem Hintergrund, dass die Energiewirtschaft einen erheblichen Anteil an den CO₂-Emissionen hat und fossile Energieressourcen eine maßgebliche Umweltbelastung aufweisen, ist die Integration erneuerbarer Energien unumstößlich.

Das zeigt auch die Einschätzung europäischer Führungskräfte, die EE als wahrscheinliche, beziehungsweise gesetzte Zukunftsprognose mit einem hohen Einfluss auf die Klimakrise einordnen (World Energy Council Europe, 2022). Die Ausbauziele basierend auf Prognosen sind verschiedenen Rahmenbedingungen unterstellt, die sie beeinflussen. Mit die global größte ist der Klimawandel, dessen Einfluss auf die Energieversorgung in dem folgenden Abschnitt näher erläutert wird.

6. Klimatische Rahmenbedingungen

Als Haupttreiber für die Energiewende wird EU- aber auch weltweit die Klimakrise angesehen (Weltenergieerat Deutschland e. V., 2021b). Es ist eindeutig nachweisbar, dass der Einfluss des Menschen zu einer Erwärmung der Atmosphäre, der Ozeane und der Landflächen führt und weitverbreitete Veränderungen stattgefunden haben, wobei das Ausmaß im gesamten Klimasystem beispiellos ist. Die Wirkungen des vom Menschen verursachten Klimawandels ist bereits in Form von vielen Wetter- und Klimaextremen in allen Regionen der Welt spürbar, dazu zählen Hitzewellen, Starkniederschläge, Dürren und tropische Wirbelstürme. Die globale Oberflächentemperatur wird sich unabhängig des Emissionsszenarios erhöhen und die beschlossene Obergrenze von 1,5 °C, aber auch wahrscheinlich 2 °C, im Laufe des 21. Jahrhunderts übersteigen ohne drastische THG-Emissionsreduzierungen. Folglich wird es global höher frequentiert zu gleichzeitigen und vielfältigen Veränderungen von klimatischen Antriebsfaktoren mit Relevanz für Klimafolgen, aus dem Englischen *climatic impact-drivers abgekürzt mit CIDs*, kommen. Das Niveau, beziehungsweise Ausmaß der Temperaturerhöhung, entscheidet dabei über die Verbreitung und Ausprägung der CIDs (Deutsche IPCC Koordinierungsstelle & ProClim, 2021).

Im fünften Sachstandbericht (IPCC, 2013) wurden vier Pfade beschrieben, denen verschiedene THG-Konzentrationen und weitere Variablen zur Erderwärmung analysiert, in Kurzform RCP für „representative concentration pathways“. Die Pfade sind RCP2.6, RCP4.5, RCP6 und RCP8.5. Je nach Szenario können verschiedene Primärenergieverbräuche und somit auch THG Emissionen abgeleitet werden (van Vuuren et al., 2011). Es sind umfangreiche Daten inklusive von Emissionen eingeflossen, um Klimamodelle zu berechnen und Voraussagen zur Klimaänderung zu treffen (LLUR & DWD, 2017; Hamburger Bildungsserver, 2022).

Im aktuellen sechsten Sachstandbericht (IPCC, 2021) wurden die Betrachtungen um die Sozioökonomiepfade, kurz SSP für „shared socioeconomic pathways“ erweitert. In diesen Szenarien werden jeweils verschiedene Prognosen für die Emissionsminderung, zum Wachstum von Bevölkerung und Wirtschaft, aber auch zu den aktuellen technologischen und zu geopolitischen Trends mit betrachtet. Sie sind eine Kombination der Klimamodelle aus den RCP-Szenarien des fünften Sachstandberichtes. Folgende 5 Szenarien werden in dem Bericht betrachtet: SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5 und damit ist eine größere Bandbreite von zukünftigen THG- und Luftschadstoffintensitäten abgedeckt.

In dem nachhaltigsten Szenario (SSP1-1,9) werden Klimaschutzmaßnahmen bei niedrigen Emissionen durchgesetzt, was zu einer Erderwärmung unter 2 °C führt. In diesem, aber auch in folgenden Szenarien wird davon ausgegangen, dass Extremwetterereignisse frequentierter weltweit auftreten. Zusätzlich ist das apokalyptische Szenario angegeben (SSP5-8,5), in dem sich der fossile Brennstoffbedarf durch

einen energieintensiven Lebensstil verdoppelt. Bis zum Jahr 2100 ist die Erderwärmung um 4,4 °C Realität und viele Orte sind nicht mehr bewohnbar. Noch vorhandene fossile Brennstoffressourcen werden ausgebeutet. Es gilt als das Worst-Case-Szenario (IPCC, 2021).

Die klimatischen Entwicklungen sind bereits in Deutschland spürbar und werden sich die kommenden Jahrzehnte noch verstärken (DWD, 2022c). Es kommt zu Verschiebungen langjähriger Mittelwerte von Lufttemperatur und Niederschlag, was wiederum die Gewässerparameter, Wassertemperatur und Abflussmenge bedingt (Rothstein et al., 2008). Ein Beispiel ist das Trockenjahr 2018, in dem besonders wenig Niederschlag in Kombination mit hohen Temperaturen, jeweils verglichen mit dem Mittelwert (1961-1990) festgestellt wurde, wie in der Abbildung 16 einsehbar ist.

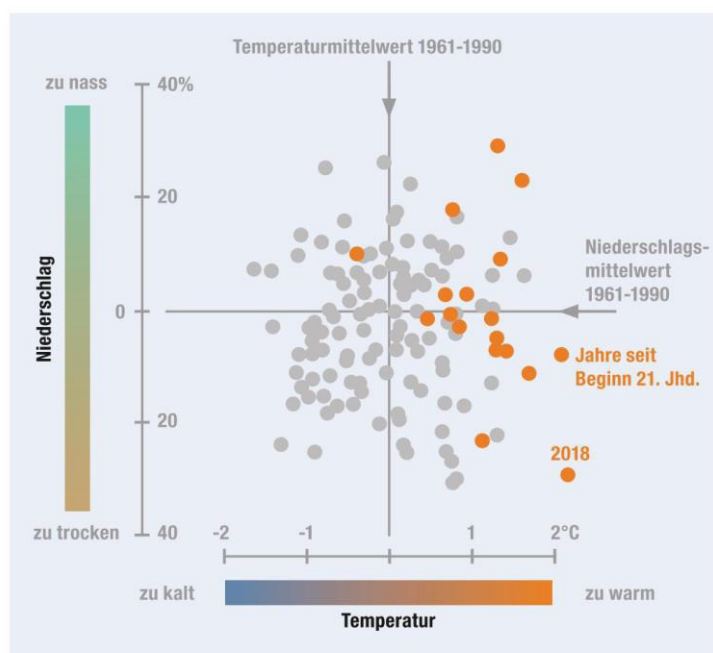


Abbildung 16: Temperatur und Niederschlag im Trockenjahr 2018 in Deutschland (DVGW, 2020).

Höhere globale und nationale Temperaturen werden in Kombination mit Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum, trotz sinkendem Heizbedarf, zu einer erhöhten Energienachfrage weltweit führen, die durch bspw. einen stärker notwendigen Einsatz von Klimaanlage in warmen Klimazonen hervorgerufen wird. Die Klimaerwärmung bewirkt eine Verschlechterung des Wirkungsgrades von thermischen KW durch steigende Umgebungstemperaturen und verstärkt die Verknappung von Kühlwasservorkommen, was zu Drosselungen oder zu Abschaltungen von KW führen kann. Vorhersehbar öfter frequentiert auftretende Extremwetterereignisse können bei allen Arten von KW den Betrieb stören. Regionale Wasserhaushalte verändern sich durch geänderte Wettermuster als Folge des Klimawandels, die den Betrieb von Wasser-KW beeinflussen. In einige Regionen werden geringere Niederschlagsmengen und steigenden Temperaturen zu signifikanten Wasserverlusten

führen, was eine geringere und unregelmäßigere Produktion von Strom nach sich zieht (BKG et al., 2019; LAWA & STMUV, 2020; Weltenergieerat Deutschland e. V. & klimafakten.de, 2021).

Die Energiewirtschaft ist im Bereich Energiebedarf, -umwandlung und -infrastruktur, aber auch bei der Verfügbarkeit von Primärenergieträgern sowie Energieversorgung von den natürlichen Rahmenbedingungen abhängig. Zentrale Sensitivitäten der Energiewirtschaft sind die Lage und Leistung von KW und Erzeugungsanlagen. Regional betrachtet finden sich besonders in Ballungszentren meist die stärkeren Ausprägungen der Klimawirkungen durch örtlich höhere Sensitivitäten (UBA, 2015).

Besonders kritisch für die Energieerzeugung sind die Verfügbarkeit und Temperatur von Wasser, welches für die Kühlung der KW benötigt wird. Die vorrangig in den Sommermonaten steigenden Durchschnittstemperaturen betreffen dabei sowohl die Luft als auch das Wasser (Hans von Storch et al., 2018).

KW-Standorte sind also meist auf Gewässer angewiesen, da Wasser neben der KW-Kühlung auch für den Antrieb von Turbinen und als Verkehrsträger für den Brennstoff, wie bspw. Steinkohle, benötigt wird (Gernaat et al., 2021). Erhöhte Wassertemperaturen führen zu Leistungseinschränkungen aufgrund der Überschreitung gesetzlich festgelegter Grenzwerte und zu Wirkungsgradverringerungen sowie höheren Instandhaltungskosten, besonders bei thermischen KW. Ereignisse wie Niedrig- und Hochwasser werden durch den Klimawandel häufiger auftreten und können die Binnenschifffahrt sowie die Leistung thermischer und Laufwasser-KW einschränken (Rothstein et al., 2008).

Die Ressource Wasser ist für fossile und erneuerbare Energiebereitstellungstechnologien relevant, wie in dieser Arbeit herausgearbeitet wird. Unabhängig von der Veränderung rechtlicher, demografischer und/ oder wirtschaftlicher Faktoren führt der Klimawandel zu einer wesentlich veränderten Situation der Verfügbarkeit der Wasserressourcen (DVGW, 2020).

7. Wasserwirtschaft Deutschland

Die Ausbauziele der Energiewirtschaft sollen der Wasserverfügbarkeit Deutschlands entgegengesetzt werden. Neben dem natürlichen Vorkommen der Ressource Wasser ist ebenso die Wasserwirtschaft relevant, denn der Begriff Wasserwirtschaft wird nach DIN 4049 Teil 1, Seite 3 Nr. 1.9 als die „zielbewusste Ordnung aller menschlichen Einwirkungen auf das ober- und unterirdische Wasser“ definiert. Ein Abbild der aktuellen Wasserwirtschaft inklusive rechtlicher Rahmenbedingungen, Wechselwirkungen, natürlichen Gegebenheiten und der Wassernutzung wird erstellt.

7.1 Rechtliche Rahmenbedingungen der Wasserwirtschaft

Für globale Probleme, wie die Klimakrise, sind internationale Abkommen notwendig, um ihnen weltweit entgegenzuwirken. Übereinkommen im internationalen Bereich der Wasserwirtschaft beziehen sich meist auf Meere und deren Schutz, bspw. vor Verschmutzung. Dazu zählen unter anderem Umweltschutzverträge, wie zum Beispiel die Londoner Konvention zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch Abfälle, das Helsinki-Übereinkommen zum Schutz der Ostsee, das Übereinkommen zum Schutz des Nordatlantiks einschließlich der Nordsee, die UNECE Wasserkonvention zum Schutz und zur Nutzung grenzüberschreitender Wasserläufe und internationaler Seen und das UN-Übereinkommen über das Recht der nicht-schifffahrtlichen Nutzung internationaler Wasserläufe (BMU & UBA, 2017).

Weiter heruntergegliedert, existieren zahlreiche EU-, nationale und länderspezifische Rahmenrichtlinien, die Verbindungspunkte mit Wasserbereitstellung, -nutzung oder -entsorgung haben. In Tabelle 10 sind die wesentlichen europäischen Gesetze und Regelungen abgebildet und mit den entsprechenden Umsetzungen auf Bundesebene verknüpft.

Tabelle 10: Wasserwirtschaft rechtlicher Rahmen nach (BMU & UBA, 2017).

Ebene	Regelungen					
EU	WRRL	Kommunale Abwasser- Richtlinie	Trinkwasser- Richtlinie	Nitrat- Richtlinie	HWRM- RL	MSRL
	GWRL					
	UQN-RL	IE-RL				
National	WHG	WHG	TrinkwV	DüngG	WHG	WHG
	GrwV	AbwAG		DüV		
	OGewV	AbwV				
	AwSV					
Länder	Landesrecht (Gesetze/ Verordnungen, Genehmigungen, Bescheide)					

Auf europäischer Ebene ist die Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) ein zentrales Instrument in der Politik und beinhaltet einen umfassenden Schutzansatz für Gewässer aller Art mit dem Ziel einer nachhaltigen

Wassernutzung. Eng verknüpft mit ihr sind die Grundwasserrichtlinie (GWRL) und die Umweltqualitäts-Richtlinie (UQN-RL). Des Weiteren existieren wasserbezogene Richtlinien wie u. a. die Richtlinie über die Behandlung von kommunalem Abwasser (kommunale Abwasser-Richtlinie), die Industrieemissionen-Richtlinie (IE-RL), die Richtlinie zum Schutz der Gewässer vor Verunreinigung durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen (Nitrat-Richtlinie), die Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (HWRM-RL) und die Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL). Alle auf EU-Ebene geltenden Maßnahmen sind verpflichtend für Mitglieder der europäischen Union und müssen in nationales Recht umgewandelt werden (BMU & UBA, 2017).

Auf nationaler Ebene wurde die WRRL vollständig durch das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) und die Oberflächen- und die Grundwasserverordnung (OGewV & GrwV) rechtlich eingebunden. Die Bewirtschaftung von Gewässern ist maßgeblich durch das WHG festgeschrieben. Das Ziel laut § 1 Kapitel 1 Satz 1 WHG ist „eine nachhaltige Gewässerbewirtschaftung, die Gewässer als Bestandteil des Naturhaushalts, als Lebensgrundlage des Menschen, als Lebensraum für Tiere und Pflanzen sowie als nutzbares Gut“ schützt. Die Gewässerbenutzung, wozu auch die Wasserentnahme zählt, wird über die Wasserbehörden geregelt. Es sind behördliche Zulassungen notwendig, die ökologische Mindestanforderung zum Schutz vorgeben. Weitere Verordnungen und Gesetze, bezogen auf Abwasserwirtschaft und Düngungsgrenzwerte, werden im weiteren Verlauf nicht näher betrachtet.

Die Durchführung und Überwachung der Maßnahmen sind auf Landesebene in Form von Maßnahmenprogrammen und Bewirtschaftungsplänen geregelt (BMU & UBA, 2017). Neben nationalen Gesetzgebungen kann dementsprechend jedes Bundesland zusätzliche Verordnungen durch die Landeswassergesetze erlassen. Die sogenannten unteren Behörden sind für den Gewässerausbau und die Gewässernutzungen (z. B. Wasserentnahmen und -einleitungen) als Genehmigungsbehörde zuständig (SRU, 2020). Der Verwaltungsaufbau in der deutschen Wasserwirtschaft ist somit dreistufig aufgebaut, wie in Abbildung 17 erkennbar ist.

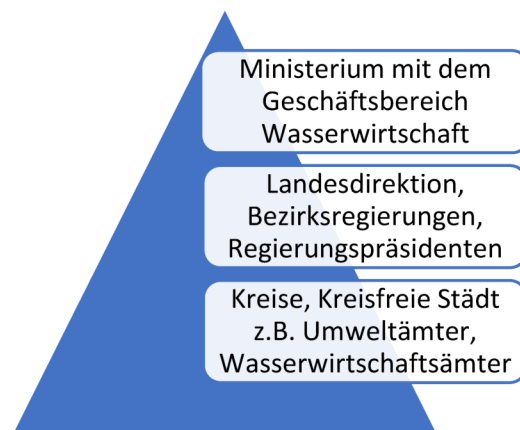


Abbildung 17: Dreistufiger Verwaltungsaufbau der Wasserwirtschaft nach (Kluth & Smeddinck, 2020).

Die Bewirtschaftungsziele speziell für Oberflächengewässer lauten nach § 27 (2) Absatz 1 Nummer 1 & 2 WHG, dass „eine Verschlechterung ihres ökologischen und ihres chemischen Zustands vermieden wird“ und „ein guter ökologischer und ein guter chemischer Zustand erhalten oder erreicht werden“ soll. Genauere Regelungen für die Entnahme von Oberflächengewässern und Grundwasser lassen sich der OGewV entnehmen.

Für Grundwasser ist festgeschrieben, dass nach § 47 (4) Absatz 1 Nummer 1-3 WHG „eine Verschlechterung seines mengenmäßigen und chemischen Zustands vermieden wird“, „alle signifikanten und anhaltenden Trends ansteigender Schadstoffkonzentrationen auf Grund der Auswirkungen menschlicher Tätigkeiten umgekehrt werden“ und „ein guter mengenmäßiger und chemischer Zustand erhalten oder erreicht werden. Dazu gehört insbesondere ein Gleichgewicht zwischen Grundwasserentnahme und Grundwasserneubildung“.

Für Wasserentnahmen sind generell Erlaubnisse der unteren Wasserbehörden einzuholen, wenn das „Entnehmen und Ableiten von Wasser aus oberirdischen Gewässern“ (§ 9 (1) Absatz 1 Satz 1 WHG) oder „das Aufstauen, Absenken und Umleiten von Grundwasser durch Anlagen, die hierfür bestimmt oder geeignet sind“ (§ 9 (1) Absatz 2 Satz 1 WHG), erfolgt. Kriterien für die Erlaubnis sind, dass weder Natur noch das Allgemeinwohl durch die Entnahme gefährdet werden. Grundsätzlich verboten sind Entnahmen aus „Einzugsgebieten eines Wasserschutzgebietes, Heilquellenschutzgebietes oder in Gebieten, aus denen Oberflächenabfluss in Seen oder Talsperren zur öffentlichen Wassergewinnung fließt“ (§ 13a (1) Absatz 1 Nummer 2 a-c WHG).

7.2 Einflussfaktoren auf Oberflächen- und Grundwasser

Die gesamtheitliche Betrachtung der Umweltverträglichkeit ist relevant, da die Wirkungsketten für Grundwasser- und Oberflächengewässern mit natürlichen Parametern verknüpft sind. In Abbildung 18 ist beispielhaft die Wirkungskette für die Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser dargestellt.

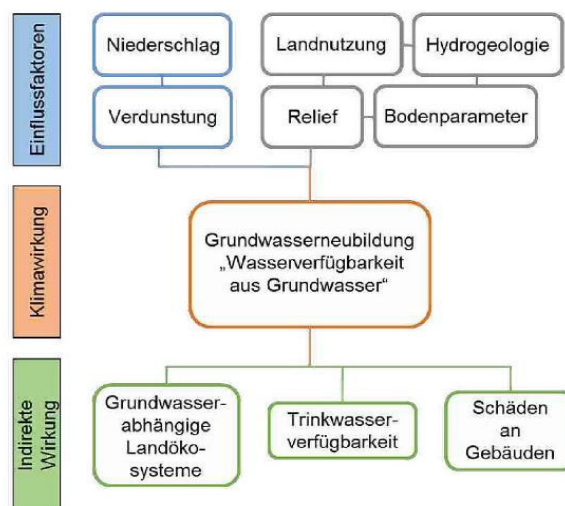


Abbildung 18: Wirkungskette Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser (Klimakompetenznetzwerk Niedersachsen, 2019).

Die Neubildung von Grundwasser hängt zum einen vom Niederschlag in Kombination mit der Verdunstung, also den klimatischen Bedingungen ab, als auch von den Parametern Landnutzung, der Topografie, beziehungsweise von dem Relief, der Hydrogeologie und den vorherrschenden Bodenparametern (bspw. Bodenversiegelung). Auswirkungen hat die Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser auf grundwasserabhängige Landökosysteme, auf die Trinkwasserversorgung der Bevölkerung und es kann durch saisonales Ansteigen der Grundwasseroberfläche Vernässung eintreten, welches Schäden an Gebäuden verursachen kann (Klimakompetenznetzwerk Niedersachsen, 2019).

Für die Oberflächengewässer ist der mittlere Abfluss der Hauptindikator. Einflussfaktoren sind ähnlich wie für Grundwasser, jedoch ist der Niederschlag als Indikator am aussagekräftigsten, während Bodenparameter nicht mit in Betracht gezogen werden. Neben Auswirkungen auf die Wasserverfügbarkeit der Oberflächengewässer wirkt sich der mittlere Durchfluss auch auf die Gewässerökologie und je nach Bewirtschaftung auch auf die Talsperren, beziehungsweise WW aus (Klimakompetenznetzwerk Niedersachsen, 2019).

Schlussfolgernd müssen für die Beurteilung der Wasserverfügbarkeit die natürlichen Gegebenheiten untersucht werden. Die Wechselwirkungen sind in dem folgenden Abschnitt erläutert.

7.3 Natürliche Gegebenheiten

Wie aus dem vorherigen Abschnitt erkennbar, sind die natürlichen Gegebenheiten wichtige Einflussfaktoren auf die Klimawirkung und damit auch auf die Wasserwirtschaft und sollten für die Aussage über die Wasserverfügbarkeit mit untersucht werden. Dafür sind sowohl der Wasserkreislauf, die Wasserbilanz, die Grundwasserarten und -güte, das Wasservorkommen als auch der klimatische Einfluss in Deutschland betrachtet.

7.3.1 Wasserkreislauf

Der Wasserkreislauf mit den verschiedenen Wasserarten ist der Abbildung 19 zu entnehmen.

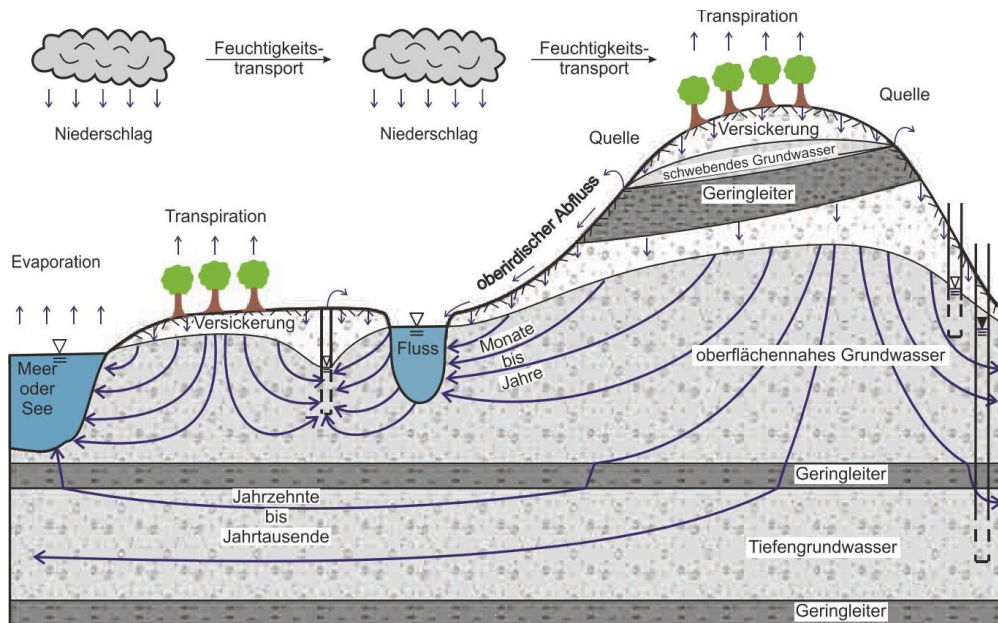


Abbildung 19: Wasserkreislauf (Wisotzky et al., 2021).

Die Ressource Wasser ist auf der Erde in gasförmigem, flüssigem und festem Zustand vorzufinden und wird in einem natürlichen Kreislauf, dem Wasserkreislauf, gespeichert und transportiert. Ungefähr 71 % der Erdoberfläche sind von Wasser bedeckt. Gespeichert ist Wasser in Meeren, auf Kontinenten und in der Atmosphäre. Wasser liegt in Form von Eis und Schnee (fest), als Oberflächenwasser, Grundwasser und Bodenfeuchte (flüssig) sowie als minimaler Bestandteil der Biosphäre, also gasförmig vor (Baur et al., 2019).

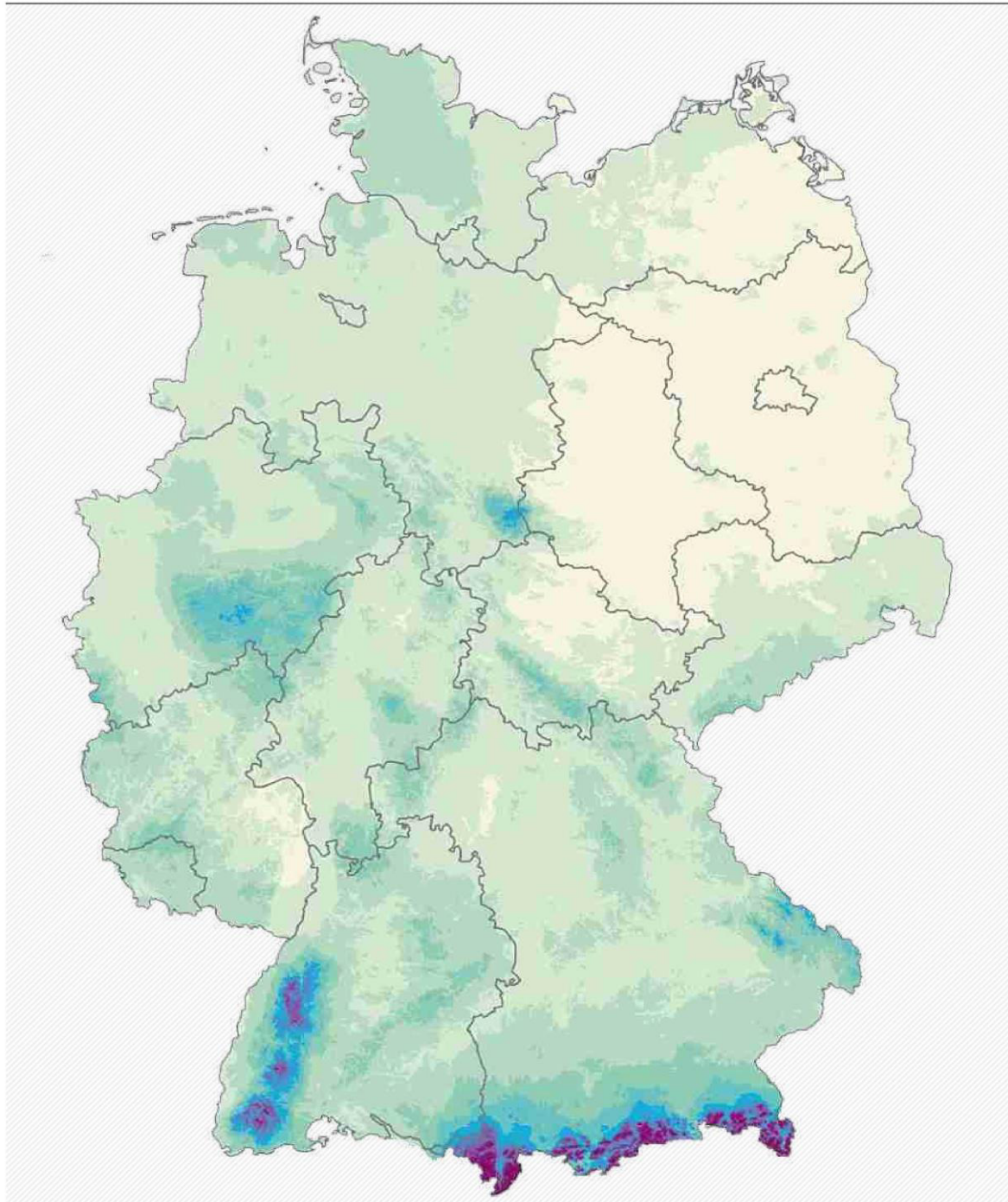
Durch die Sonneneinstrahlung verdunstet Wasser, vor allem von freien Wasserflächen, wie Meeren, Seen und Flüssen oder von befeuchteten Landoberflächen. Der Niederschlag, der nicht Teil der Verdunstung ist, fließt oberirdisch ab oder bildet das Grundwasser. Neben dieser flächigen Neubildung kommt es auch durch Uferfiltration von, aus Oberflächengewässern versickerten, Wasser zu weiterer Anreicherung. Neben dem oberflächennahen Wasser und dem Tiefengrundwasser gibt es das sogenannte schwebende Grundwasser, welches auf Geringleitern vorkommen kann. Als Quellen werden eng begrenzte Orte, an denen das Grundwasser zutage tritt, bezeichnet. Die Quelle kann dauerhaft oder nur zeitweilig, also intermittierend, existieren. Das oberirdisch abfließende Grundwasser resultiert in Bächen und Flüssen (Wisotzky et al., 2021).

Die Wasserabgabe- bzw. -verbrauchswerte werden durch das Klima, das Wasserdargebot, sonstige Wasserbezugsquellen und die Wasserbeschaffenheit beeinflusst. Die Wassergewinnung kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen (Baur et al., 2019).

7.3.2 Wasserbilanz Deutschlands

Für die Ableitung der Wasserbilanz Deutschlands müssen zunächst die natürlichen Bedingungen untersucht werden. Deutschland befindet sich in der gemäßigten humiden Klimazone, welche von

Wetterwechseln und Niederschlägen über das ganze Jahr gekennzeichnet ist. Als mittlere jährliche Niederschlagshöhe sind 789 mm berechnet, was ungefähr 789 l/m^2 ausmacht. Über das Land betrachtet gibt es regionale Unterschiede bezogen auf die Niederschlagsmengen je nach geographischer Lage, landschaftlichen Gegebenheiten und Jahreszeit. In Abbildung 20 sind die Niederschlagshöhen in Deutschland im Referenzzeitraum 1961-1990 dargestellt (BMU & UBA, 2017).



Niederschlagshöhe in Deutschland

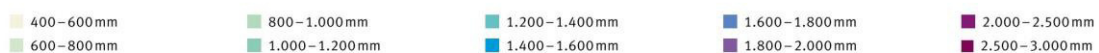


Abbildung 20: Jährliche Niederschlagshöhe in Deutschland im Referenzzeitraum 1961-1990 (BMU & UBA, 2017).

In Zahlen ausgedrückt, fallen im Norddeutschen Tiefland zwischen 500 und 700 mm, im Mittelgebirge 700 mm bis 1500 mm und in den Alpen über 2.000 mm pro Jahr an Niederschlag an. Tendenzen zeigen sich neben der Höhenlage auch in Himmelsrichtungen, da die Niederschläge eher von Westen nach Osten in Deutschland abnehmen. Trennt man die Jahreszeiten, sind die Sommerhalbjahre im Durchschnitt etwas feuchter als die Winterhalbjahre, in einem Verhältnis von 57% zu 43 % des jährlichen Niederschlages (BMU & UBA, 2017).

Rund 60 % der Niederschlagsmenge wird über Verdunstung verloren. Das Landschaftsbild Deutschlands ist vorrangig durch oberirdische Gewässer wie Flüsse, Kanäle, Seen und Talsperren geprägt. Die aktuelle Wasserfläche wird mit 8.552 km² angegeben, was in etwa 2,4 % der Landesfläche Deutschlands entspricht. Die Tendenz ist steigend durch den oberirdischen Abbau von Rohstoffen (Bormann et al., 2019).

Die Wasserbilanz Deutschlands hat sich durch Veränderungen von Niederschlag, Zuflüssen, dem gebietsbürtigen Abfluss, der Verdunstung und der Evapotranspiration verschoben und gleichzeitig sinkt die erneuerbare Wasserressource ab. Im Jahr 2000 belief sich die erneuerbare Ressource auf 190 Mrd. m³ und im Jahr 2018 nur noch auf 119 Mrd. m³ (UBA, 2020c).

Je nach hydrogeologischer Situation der Wasserkörper ist die natürliche Wasserbeschaffenheit verschieden (Bröker, 2022). In dem nachfolgenden Abschnitt werden die Wasserqualität und die Wasserarten näher erläutert.

7.3.3 Grundwasserarten

Grundwasser ist nach DIN 4049-3 Seite 49 Nummer 3.1.2 „unterirdisches Wasser, das die Hohlräume der Erdrinde (Lithosphäre) zusammenhängend ausfüllt und dessen Bewegungsmöglichkeit ausschließlich durch die Schwerkraft bestimmt wird“. Chemisch betrachtet ist Wasser die flüssige Form der Verbindung aus zwei Molekülen Wasserstoff und einem Molekül Sauerstoff. Die Chemie des Grundwassers ist abhängig von der Art und Menge, also der Konzentration der Inhaltsstoffe. Parameter für die Zusammensetzung sind die Wasserherkunft, Stoffeinträge und Wechselwirkungen im Grundwasserleiter (Baur et al., 2019).

Es existieren drei Arten von Grundwasserleitern, die Porengrundwasserleiter, die Kluft- und Karstgrundwasserleiter und die Grundwassergeringleiter. Im Folgenden werden die drei in Abbildung 21 dargestellten Grundwasserleiter und deren Eigenschaften näher erläutert.



Abbildung 21: Porengrundwasserleiter (links); Kluftgrundwasserleiter (Mitte); Karstgrundwasserleiter (rechts) (Baur et al., 2019).

Der Porengrundwasserleiter ist Lockergesteine wie Sand, Kies, hat eine hohe nutzbare Porosität und weist geringe Fließgeschwindigkeiten auf. Der Kluftgrundwasserleiter ist geklüftetes Festgestein, wie bspw. Sandstein oder Kalkstein, und zeichnet sich durch eine geringe nutzbare Porosität und mittlere Fließgeschwindigkeiten aus. Die dritte Kategorie ist der Karstgrundwasserleiter, der als Festgestein mit Hohlräumen vorkommt, bspw. unterer Muschelkalk. Das große Hohlraumvolumen ermöglicht schnelle Fließgeschwindigkeiten. Durch die unterschiedliche Durchlässigkeit und das Wasserspeichervermögen der Grundwasserleiter variiert auch die, unter optimalen Bedingungen durch Wasserfassungen, nutzbare Wassermenge je Zeiteinheit. Am geeignetsten für die Grundwassererschließung sind Porengrundwasserleiter, wobei aber auch die gleiche geologische Formation je nach den regionalen Verhältnissen unterschiedlich durchlässig sein (Baur et al., 2019).

Im Norden und Süden Deutschlands befinden sich vorrangig Porengrundwasserleiter, im Landesinneren Kluft- und Karstgrundwasserleiter und im mittleren Osten und Westen finden sich diverse Ausprägungen an Grundwasserleitern, die das Grundwasservorkommen in Deutschland prägen (BGR, o.D.a).

Bewertet man die Ergiebigkeit und damit den mengenmäßigen Zustand der Grundwasserkörper (GWK) in Deutschland, ist in den meisten Teilen Deutschlands ausreichend Wasser vorhanden. GWK sind Abgrenzungen, die einer systematischen Bearbeitung dienen. Es gibt regionale Unterschiede, denn im Norden und Süden werden sehr ergiebige Vorkommen angegeben, wohingegen besonders in Mitteldeutschland Grundwasservorkommen als mengenmäßig unbedeutend zählen (BGR, 2018).

Grundwasser ist häufig Edukt als sogenanntes Rohwasser, sowohl für Lebensmittel oder industrielle Prozesse, aber auch für Elektrolyseprozesse. Es müssen bestimmte Qualitätskriterien erfüllt werden und die Einhaltung von Grenzwerten, festgelegt in der Anlage 2 (zu § 6 Absatz 2) Teil 1 und 2 TrinkwV, ist zwingend erforderlich. Auch bei der Verwendung von Grundwasser als Brauchwasser, bspw. für Kühlzwecke von KW, ist meist ein Mindestqualitätsstandard vorausgesetzt. Die Wasserqualität hat einen entscheidenden Einfluss auf die endgültige Nutzung des Wassers (Wisotzky et al., 2021).

7.3.4 Wasserqualität

Für die Verwendung von Wasser ist dessen Qualität, beziehungsweise dessen Inhaltsstoffe, entscheidend. Das Wasser nimmt im Kreislauf verschiedene Inhaltsstoffe auf, wodurch als chemisch rein bezeichnetes Wasser nicht natürlich vorkommt (Wisotzky et al., 2021).

Die Grundwassergüte ist die Gesamtheit der chemischen, physikalischen und biologischen Bestandteile. Die Bodenbeschaffenheiten, die geologischen Untergrundverhältnisse und die hydrologische Situation definieren die lokal auftretenden Eigenschaften des Grundwassers (SKUMS, 2013).

Betrachtet man die Bewertung des chemischen Zustandes (Abbildung 22 rechts), so wird ein deutliches Defizit in einigen Regionen, verteilt über ganz Deutschland sichtbar, wobei besonders der Nordwesten betroffen ist.

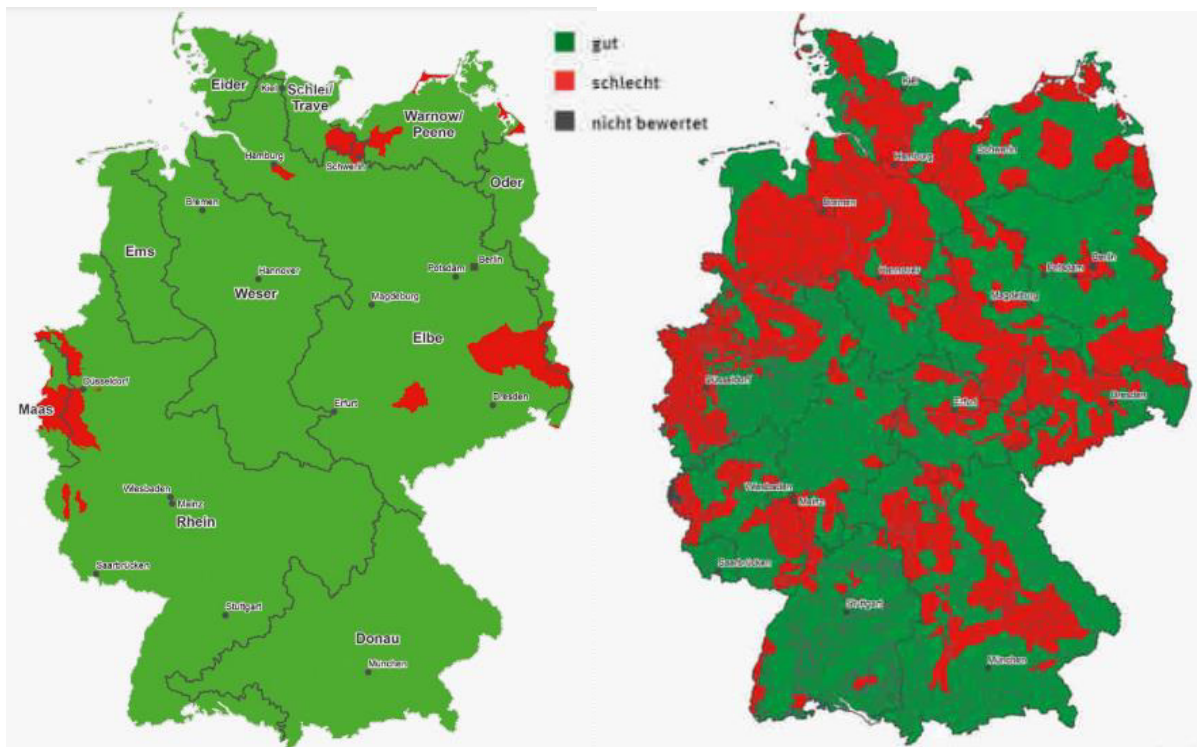


Abbildung 22: Mengenmäßiger Grundwasserzustand (Berichtsportal WasserBLICK & BfG, 2022) (links) und Chemischer Grundwasserzustand (BKG et al., 2019) (rechts).

Der chemische Zustand des Grundwassers ist, wie bereits erwähnt, von dessen Inhaltsstoffen abhängig. Einige Stoffe, je Gefährdungspotential und Eintragswahrscheinlichkeit, werden in vorgegebenen Perioden an operativen Messstellen untersucht und ausgewertet. Die spezifischen Qualitätsanforderungen sind durch die GWRL als Tochterrichtlinie der WRRL festgelegt. Werden im Grundwasser die gelisteten Qualitätsnormen und Schwellenwerte eingehalten, so ist eine Bewertung „gut“ zuzuordnen. Werden die Werte überschritten, wird der Zustand als „schlecht“ eingestuft. Indikatoren für den chemischen Zustand des Grundwassers sind vor allem Nitrat und Pestizide, wobei

in Deutschland mehr als ein Drittel (34,8 %) aller GWK in einem schlechten chemischen Zustand sind. Der Hauptverursacher ist der Sektor der Landwirtschaft und dessen Eintrag von Stoffen (BKG et al., 2019).

Den größten Anteil macht Nitrat aus, da 27,1 % der Schwellenüberschreitungen diesem Stoff zugeordnet werden (BKG et al., 2019). Als numerische Grenze ist laut Anlage 2 (zu § 6 Absatz 2) Teil 1 TrinkwV für Nitrat 50 mg/l angegeben. In Abbildung 23 sind die Nitratkonzentrationen in mg/l in Deutschland im Sickerwasser aufgezeigt.

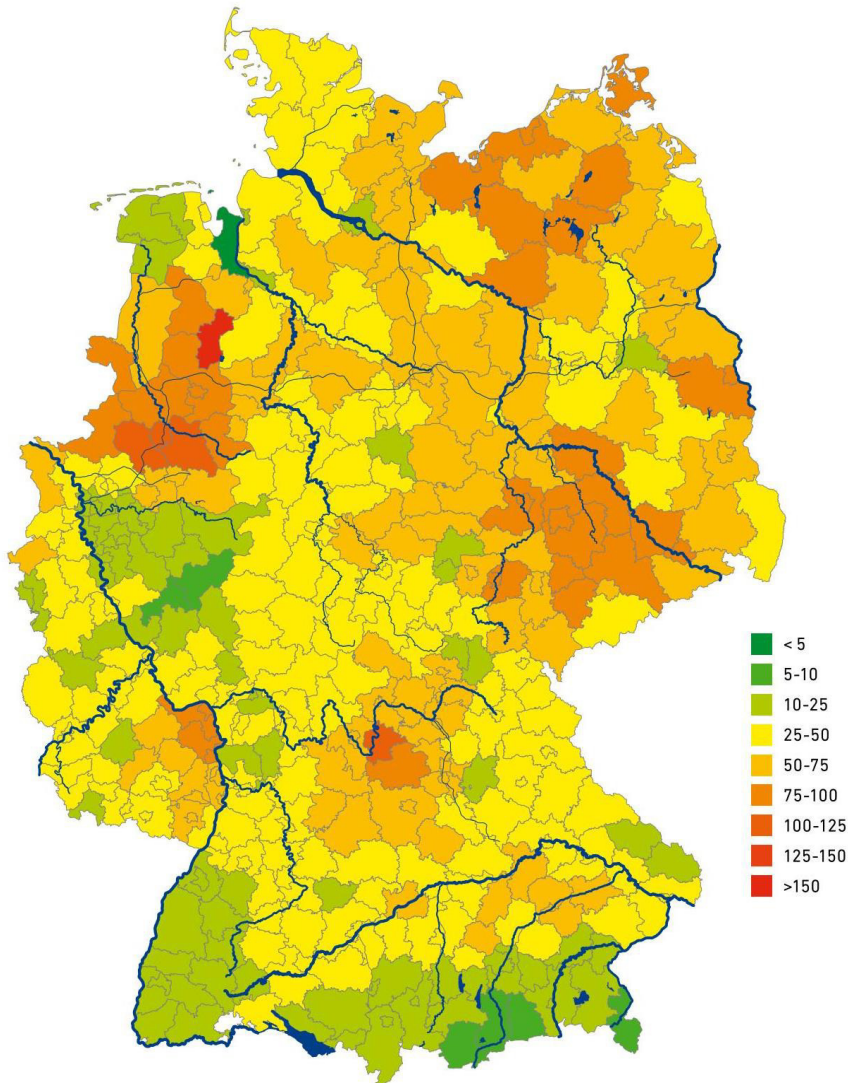


Abbildung 23: Nitratkonzentrationen im Sickerwasser in mg/l (Mittelwerte der Kreise) (Hirschfeld et al., 2016).

Die Hauptsektoren für den Eintrag von den 10 relevantesten Wasserschadstoffen sind dem Abfall und Abwasser zuzuordnen, die vor allem Belastungen der Landwirtschaft entspringen (siehe Abbildung 24) (Bormann et al., 2019).

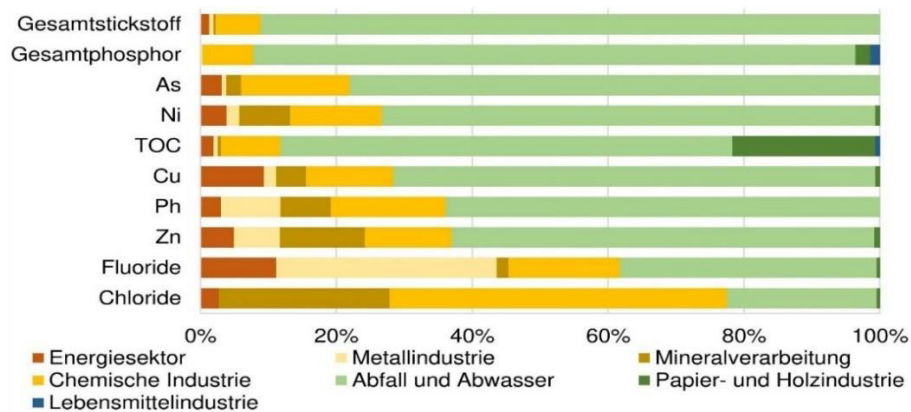


Abbildung 24: Anteile der Branchen an den 10 relevantesten Wasser-Schadstoffen (ideas into energy gGmbH & German Water Partnership e.V., 2021).

Der Energiesektor hat jeweils nur einen kleinen Anteil von meist unter 5 % und nur im Bereich von Kupfer und den Fluoriden sind diesem Wirtschaftszweig rund 10 % der Einträge zuzuschreiben. Neben den Grundwasservorkommen existieren auch noch weitere Wasserarten, wie bspw. die oberflächennahen Wasserquellen, die zusammen das Wasservorkommen in Deutschland bestimmen. Welche Volumina in Deutschland lokal zu verorten sind, wird im Folgenden untersucht und begründet.

7.3.5 Wasservorkommen Deutschland

In Deutschland stehen jedes Jahr ungefähr 188 Mrd. m³ Süßwasser zur Verfügung (langjähriges Mittel). Jedoch gibt es auch Abweichungen, wie bspw. im Jahr 2018 mit nur 119 Mrd. m³ Wasser an Volumen (BMU & UBA, 2020). Diese Vorkommen werden durch regelmäßige Niederschläge erneuert. Damit kann Deutschland als wasserreiches Land eingestuft werden (BMU & UBA, 2017).

Drei Fünftel des Niederschlagswassers (307 km³) verdunsten wieder, was zahlenmäßig 190 km³ ausmacht. Somit liegt die nutzbare Wassermenge bei 117 km³, die zusätzlich durch Zuflüsse aus benachbarten Ländern aufgestockt werden (71 km³). 188 km³ stehen also, wie bereits erwähnt, theoretisch zur Verfügung (Hirschfeld et al., 2016; BMU, 2021).

Vom Süßwasser werden nur ca. 10 bis 15 % genutzt, was ungefähr 25 Mrd. m³ entspricht (Ditfurth, 2020). Es gibt jedoch große regionale Unterschiede im Hinblick auf Niederschläge und die Nutzung der Ressource Wasser (DWA, 2022).

Neben dem theoretischen existiert auch der virtuelle Wasserhaushalt, der beim Import oder Export von Waren mitgehandelt wird (Schubert, 2011). Dazu zählen neben verdunstetem Grund-, Oberflächen- und Regenwasser auch das verschmutzte Wasser, welches für die Herstellung genutzt wurde. Folglich sind Handelsströme auch virtuelle Wasserflüsse, was in Deutschland jährlich rund 120 km³ virtuelles importiertes Wasser bedeutet. Das ist nahezu doppelt so viel wie exportiertes virtuelles Wasser (Hirschfeld et al., 2016).

Wie bereits in Abschnitt 7.3.2 genannt, beträgt die aktuelle Wasserfläche in Deutschland ungefähr 8.552 km² und etwa 2,4% der Landesfläche. Als größtes zusammenhängendes Gebiet mit ertragreichen Grundwasservorkommen gilt die Norddeutsche Tiefebene, wobei ebenso im Alpenvorland und im Oberrheingraben große Vorkommen an Grundwasser aufzufinden sind. Neben dem Grundwasser gehören zu dem Wasserdargebot ebenso die Oberflächenwasser, da es ein Indikator für den regionalen Wasserkreislaufes ist und die theoretisch nutzbare Menge beschreibt. Grundlage für die Berechnung des langjährigen Mittels des potenziellen Wasserdargebotes sind die jährlich ermittelten erneuerbaren Wasserressourcen, wozu Niederschlag, Verdunstung sowie Zuflüsse nach und Abflüsse aus Deutschland zählen (BMU & UBA, 2017).

In Abbildung 25 ist die Ergiebigkeit des Grundwasservorkommens in Deutschland dargestellt. Es wird unterschieden zwischen sehr ergiebig mit über 40 l/s, ergiebig mit 15 bis 40 l/s, weniger oder wechselnd ergiebig mit 5 bis 15 l/s und bei weniger als 5 l/s wird es als weniger bedeutende Grundwasserquelle eingeordnet. Wenn der Durchfluss weniger als 2 l/s beträgt, wird es betitelt als nicht bedeutendes Grundwasservorkommen.

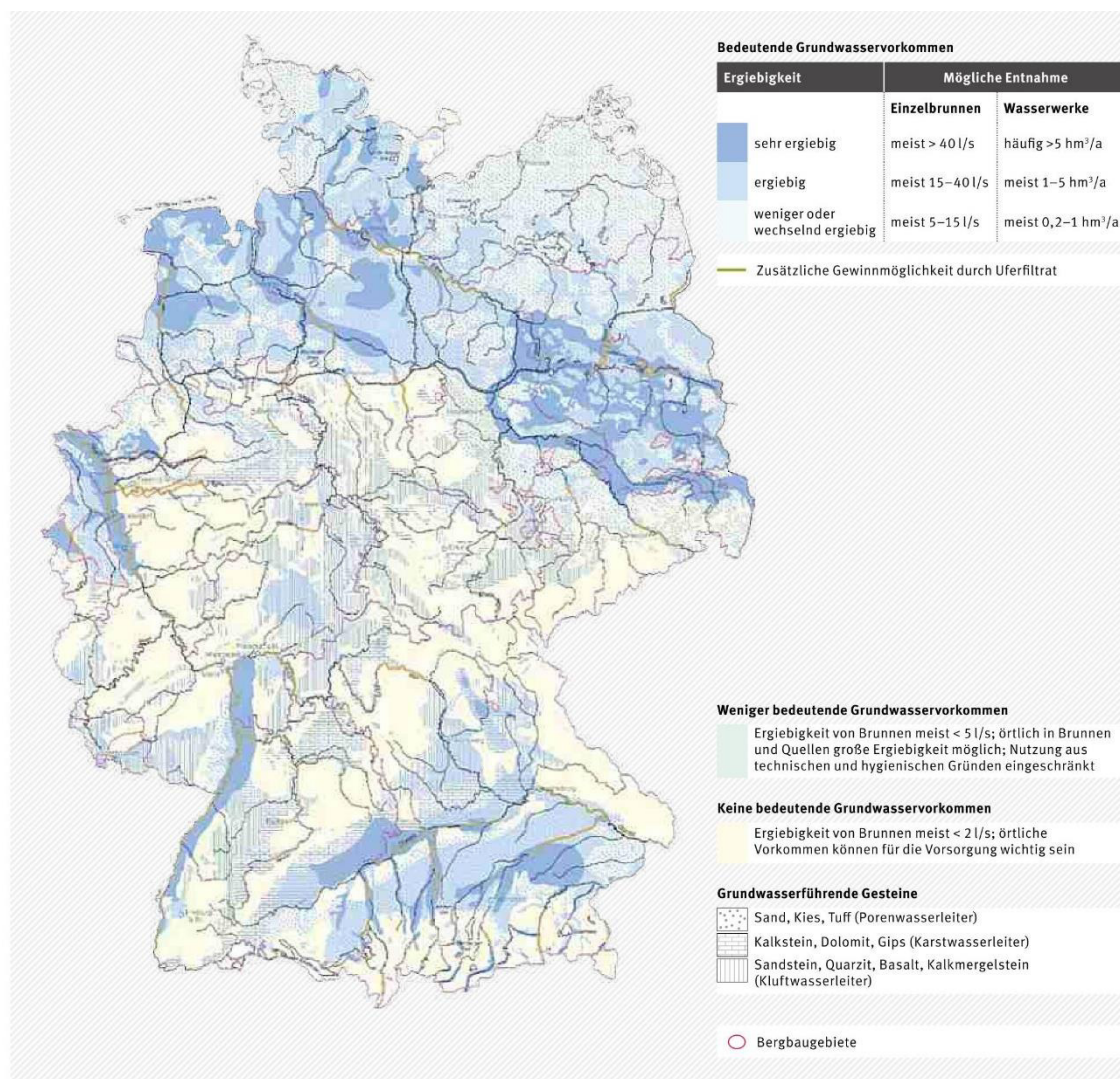


Abbildung 25: Ergiebigkeit Grundwasservorkommen in Deutschland (BMU & UBA, 2017).

Deutschland weist viele Flächen mit nicht oder nur wenig bedeutenden Grundwasservorkommen auf. Nur teilweise im Süden und Nord und Nordosten sind ergiebige Grundwasserquellen zu finden. Es ist erkennbar, dass die Wasservorkommen in Deutschland regional sehr unterschiedlich sind und größere Teile des Landes, besonders in Zentraldeutschland, nicht sehr zahlreiche ergiebige Quellen aufweisen. Zurückzuführen ist das auf die Grundwasserleiter, die ebenfalls in der Karte dargestellt sind. Im Abschnitt 7.3.3 sind die Eigenschaften genauer erläutert und deren Einfluss auf den Grundwasserfluss beziehungsweise die Ergiebigkeit und die Entnahmekapazität der Grundwasserquellen.

7.4 Klimatischer Einfluss auf die Wasserbilanz Deutschlands

Die Klimaprognosen für Deutschland zeigen eine steigende mittlere Lufttemperatur und eine Niederschlagsverschiebung, wobei es regional zu einer Frequenzzunahme inklusive Intensität und Dauer von Hitzewellen, Trockenperioden und Starkregenereignissen kommen wird (siehe Kapitel 6). Die klimatischen Veränderungen führen zu einer Anpassung des Jahreszyklus der Grundwasserneubildung. Je nach regionalen Verhältnissen ergeben sich hohe, mittlere und tiefe Grundwasserstände, Grundwasserschwankungsbreiten und Änderungen im Grundwasserdargebot. Neben den natürlichen Parametern sind auch indirekte Einflüsse auf die Infrastruktur abzuleiten, die wiederum die Energiewirtschaft beeinflussen (Bender et al., 2021).

Die prognostizierten Änderungen der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung sind in Abbildung 26 beispielhaft für Nordrheinwestfalen dargestellt.

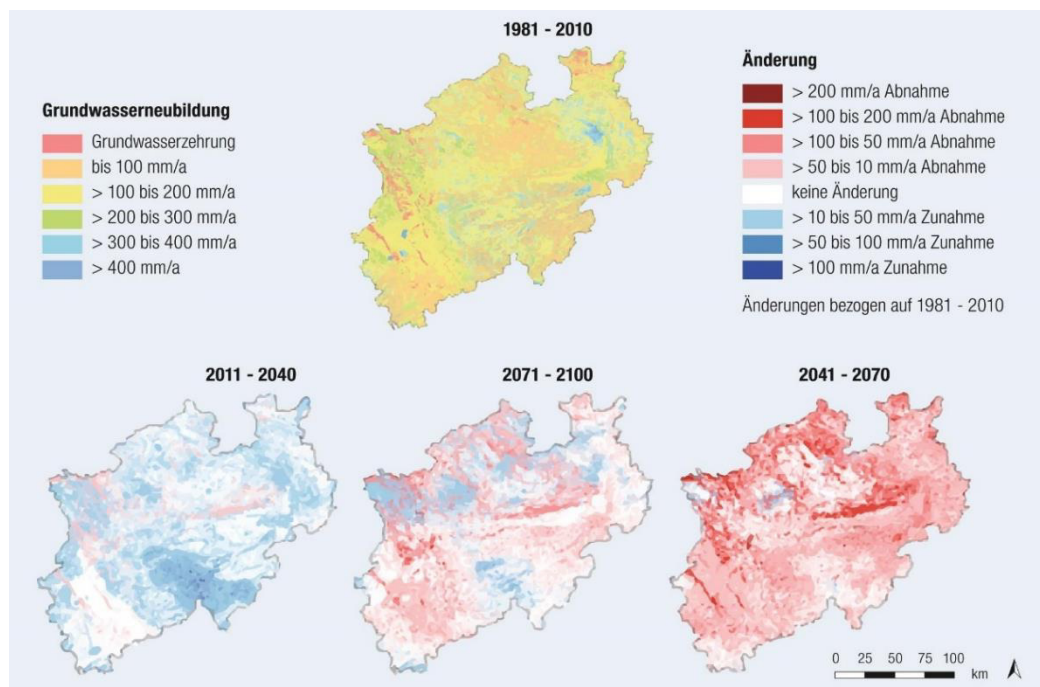


Abbildung 26: Prognostizierte Änderungen der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung in NRW (DVGW, 2020).

Aktuell ist die Grundwasserneubildung in einem mittleren bis guten Zustand (1981-2010), aber bereits Mitte des Jahrhunderts wird sich vielerorts eine teils sogar starke Abnahme der Quellen zeigen, wie rechts unten in der Grafik ersichtlich ist. Dementsprechend sind nachhaltige Wasserbewirtschaftungen essenziell, um die Ressourcen sinnvoll zu nutzen.

Eine Verringerung der Ergiebigkeit der Wasserressourcen führt zu einer Verschlechterung der Wasserqualität, da die Verdünnung von Schadstoffen abnimmt und die Salzkonzentrationen folglich ansteigen (DVGW, 2020).

Über die Jahre betrachtet, ist das Wasserdargebot in Deutschland jedoch relativ stabil und deutliche Abweichungen begründen sich auf witterungsbedingten Schwankungen, wie in Abbildung 27 ersichtlich.

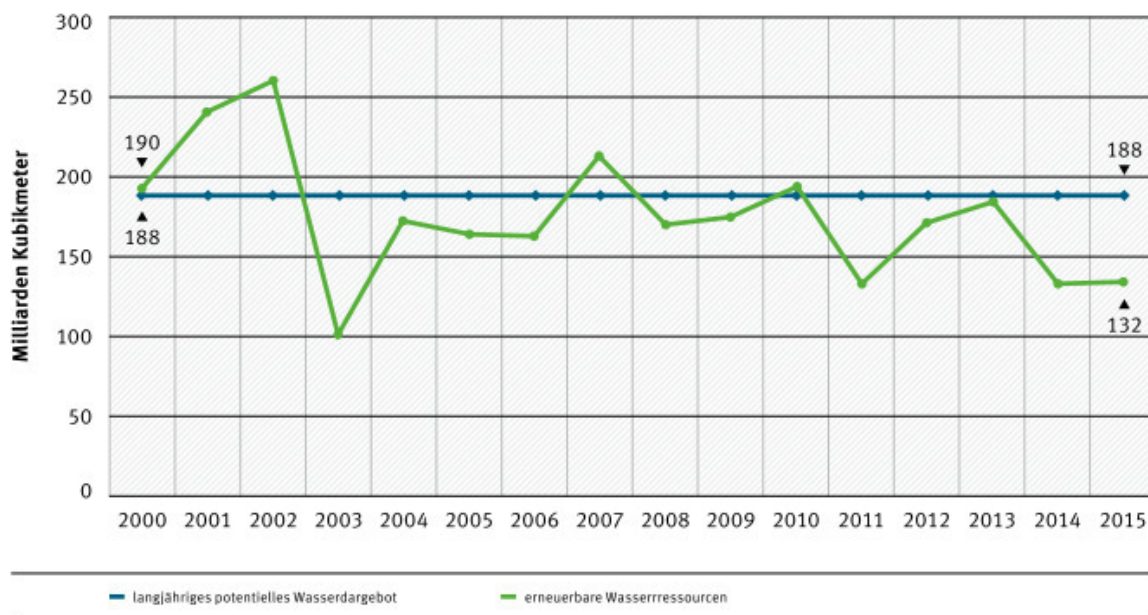


Abbildung 27: Potentielles Wasserdargebot in Deutschland (BMU & UBA, 2017).

Das Volumen der erneuerbaren Wasserressourcen (grüne Linie) ist je nach Jahr sehr unterschiedlich und schwankt um das langjährige potenzielle Dargebot (blaue Linie), welches sich auf eine dreißigjährige Zeitperiode bezieht. Trotz der Bewertung als wasserreiches Land existieren regionale Unterschiede in der Wasserverfügbarkeit. Grundlage für die Berechnungen ist die interne Wasserressource Deutschlands, die sich aus der Wasserbilanz als Differenz von Niederschlag und Evapotranspiration ergibt. Zu der Wasserbilanz wird anschließend das Volumen aus den Zuflüssen aus den Nachbarländern addiert (UBA, 2020b).

Aufgrund der Klimakrise wird sich das nutzbare Wasserdargebot um 30 bis 60 % verringern und bis 2100 kann von einer Reduktion des klimatischen Wasserbilanzüberschusses um zwei Drittel ausgegangen werden (DVGW, 2020). Auf die letzten 20 Jahre bezogen zeigt sich diese Tendenz und Deutschland hat Wasser im Umfang des Bodensees verloren. Umgerechnet sind das etwa 2,5 km³,

beziehungsweise Gigatonnen jährlich. Damit gehört Deutschland zu den Regionen mit dem höchsten Wasserverlust weltweit (Norddeutscher Rundfunk, 2022b).

Ein Indikator, ob das potenzielle Wasserdargebot ausreicht, ist das Pro-Kopf-Wasserdargebot. Für die rund 82 Millionen Einwohner Deutschlands gerechnet, entspricht das durchschnittlich 2.292 m² pro Kopf und pro Jahr, was umgerechnet 6.297 Liter pro Kopf und Tag ausmacht. Auch hier zeigen sich regionale und saisonale Unterschiede. Beispielsweise ist das Land Brandenburg mit einem Wasserdargebot von nur 3,7 Mrd. m³ im Jahr signifikant wasserärmer als Baden-Württemberg mit 49 Mrd. m³ im Jahr (BMU & UBA, 2017).

Die Erneuerung der Grundwasservorräte in der Menge hängt von mehreren Faktoren ab. Eine hohe Grundwasserneubildung erfolgt im Winter, da ein großer Teil der Niederschläge im Boden versickert. Wenn es wärmer wird, so wird auch der Anteil der Verdunstung an der Oberfläche und die Aufnahme durch Pflanzen höher. Schlussfolgernd sinkt dadurch die Wassermenge für die Grundwasserneubildung. Neben saisonalen Unterschieden hängt sie unter anderem von der Niederschlagsmenge und -verteilung, den Durchlässigkeiten der Böden, dem Bewuchs und dem Relief der Bodenoberfläche sowie dem Flurabstand ab (Nds. Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz, 2016c).

Die Grundwasserressourcen sind ein enormer Vorrat an Süßwasser. Der Wasserbedarf Deutschlands wächst kontinuierlich, wodurch die Wasserquellen regional teilweise knapp und immer stärker beansprucht werden. Die Bedeutung des Grundwassers als Ressource nimmt zu und die Debatte um dessen Wert rückt immer mehr in den Mittelpunkt. Trotz der zahlenmäßig guten Verfügbarkeit ist Grundwasser anfällig für Übernutzung und Verschmutzung, weshalb die Wassergewinnung in Art und Zweck nachhaltig vorzunehmen ist (UNESCO World Water Assessment Programme, 2022).

Neben der Grundwasserneubildung ist auch die Wasserbilanz, beziehungsweise der interne, auch gebietsbürtig genannte Wasserabfluss, relevant. Dies beschreibt die Differenz aus Niederschlag und Verdunstung. Bisher gilt, dass im Süden Deutschlands der Wasserabfluss hoch ist, aber im Osten dagegen wenig bis hin zu teilweise sehr wenig. Laut aktuellen Klimaszenarien wird dies auch in Zukunft in diesem Verhältnis bleiben. Manche Klimamodelle ergeben, dass sich der Abfluss deutschlandweit bis hin zur Mitte des 21. Jahrhunderts erhöhen könnte. Zwar verdunstet mehr als heute, aber es regnet auch mehr und häufiger (siehe Abschnitt 6). Das kann sich positiv auf das Wasserdargebot auswirken, aber auch negativ in Form von einer höheren Frequenz an Hochwasserereignissen. Für ein Abwägen von positiven und negativen Effekten sind räumlich und zeitlich differenziertere Modelle erforderlich (Hirschfeld et al., 2016).

Die Betroffenheit der Wasserwirtschaft als Folge des Klimawandels hängt von diversen klimatischen und meteorologischen Ereignissen ab. Dazu zählen unter anderem vorherrschende Temperatur-, aber

auch Niederschlagsextreme und deren örtliche und/ oder zeitliche Verteilung. Betroffenheit ist definiert als dokumentierte Auswirkungen des Klimawandels auf den Sektor Wasserwirtschaft. Mit großer Häufigkeit, sowohl absolut als auch in Prozenten, werden die Folgen des Klimawandels für die Wassermenge und/ oder Wasserverteilung untersucht. Hingegen geringer sind Textverweise und Studien, die sich mit dem Einfluss des Klimawandels auf die Wasserqualität beschäftigen (IWW, 2019).

7.5 Wassernutzung in Deutschland

Die Wassernutzung in Deutschland wird in der Wassergewinnung nach Wasserten untersucht und der Wassernutzungsindex des Landes festgestellt.

7.5.1 Wassergewinnung nach Wasserarten

Die Wassergewinnung in Deutschland variiert nach Wasserarten. In Abbildung 28 wird die prozentuale Verteilung zwischen Grund- und Quellwasser, Uferfiltrat und Oberflächenwasser als Bezugsquellen angegeben. Grundwasser bildet zahlenmäßig mit 62,4 % die wichtigste Wasserquelle ab.

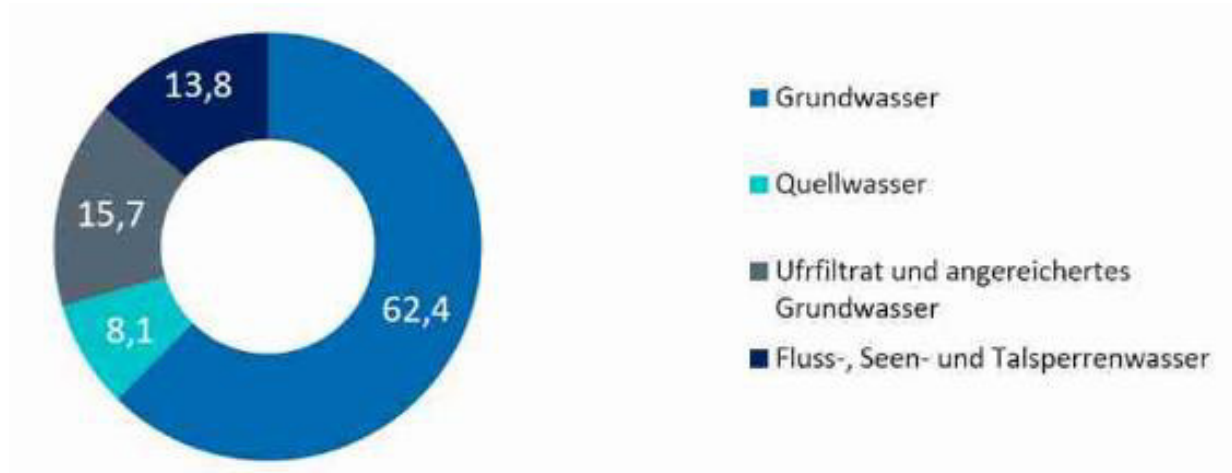


Abbildung 28: Wasserförderung nach Wasserarten 2019 (StaBuA, 2022).

Wieviel Grundwasser gefördert wird, ist je Bundesland unterschiedlich. Die öffentliche Wasserversorgung ist vorrangig für Haushalte und Kleingewerbe, aber auch gewerbliche und sonstige Abnehmer (Krankenhäuser, Schulen, Behörden) zuständig. In Abbildung 29 ist die öffentliche Wasserversorgung nach Wasserarten in Deutschland nach Bundesländern dargestellt.

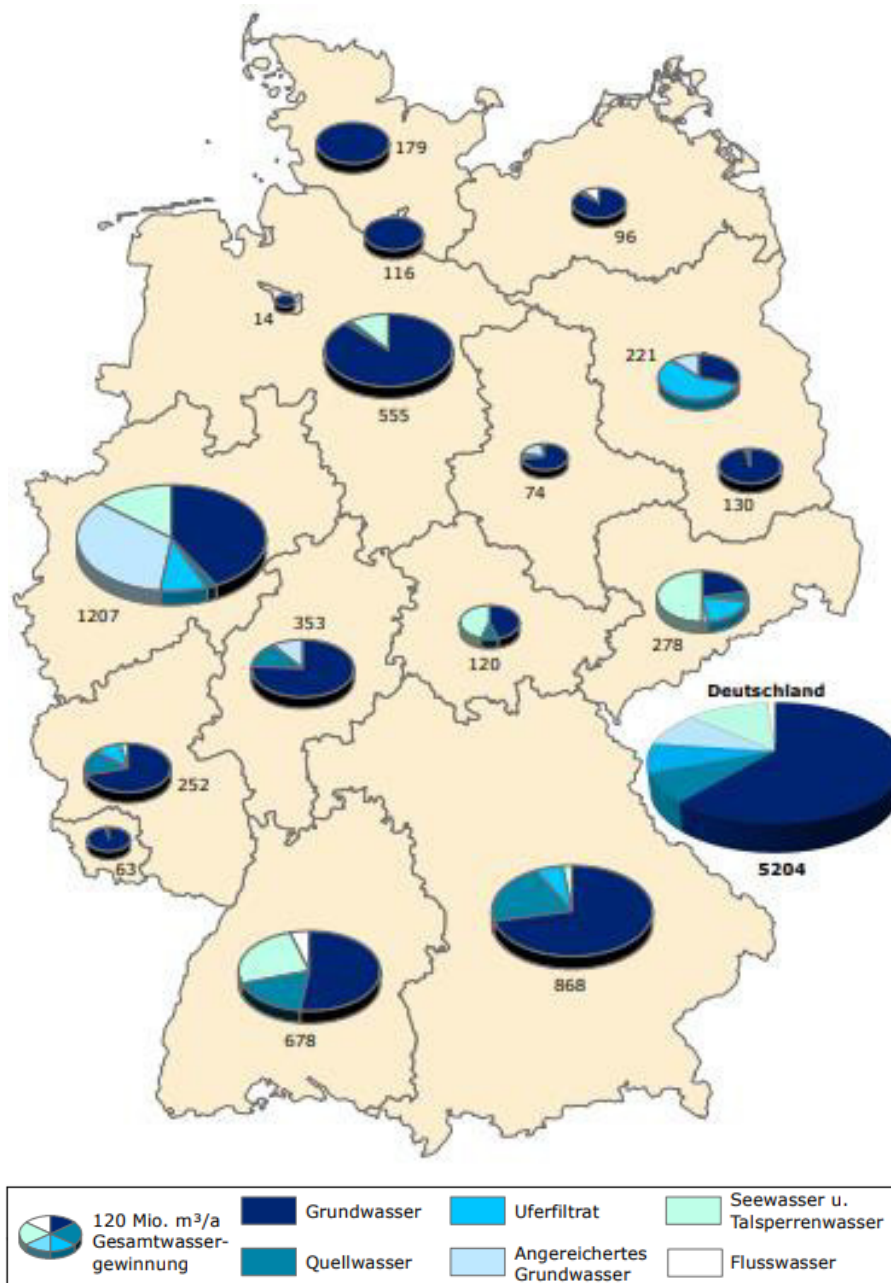


Abbildung 29: Öffentliche Wasserversorgung der Bundesländer nach Wasserarten (Statistisches Bundesamt & BKG, 2019).

Es wird in Bremen, Hamburg, Schleswig-Holstein und im Saarland die öffentliche Wasserversorgung nahezu vollständig durch Grund- und Quellwasser gedeckt. Weniger auf diese Quellen greifen Thüringen (56 %), Nordrhein-Westfalen (42 %), Berlin (29 %) und Sachsen (27 %) zurück. Berlin bezieht sein Trinkwasser zu großen Teilen aus der Uferfiltration, wohingegen die Länder Sachsen und Thüringen ungefähr die Hälfte durch See- und Talsperrenwasser decken. Für die nichtöffentliche Wasserversorgung ist Grundwasser weniger systemrelevant, da das Wasser vorrangig aus Flusswasser bezogen wird. Lediglich in den Bundesländern Sachsen, Brandenburg und in Mecklenburg-Vorpommern ist der Anteil von Grund- und Quellwasseranteil größer als der von Flusswasser (BGR, 2021).

7.5.2 Wassernutzungsindex

Das Volumen an entnommenem Grundwasser lässt nicht auf den Nutzungsdruck schließen, da sich erst in Relation zum gewinnbaren Grundwasserdargebot eine Aussage ergibt. Der Wassernutzungsindex ist der Quotient aus der gesamten Wasserentnahme des betrachteten Jahres zum langjährigen Wasserdargebot in Deutschland (Nds. Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz, 2022).

In Abbildung 30 ist der Index von 1991 bis 2017 dargestellt. Seit 2007 ist die landwirtschaftliche Beregnung in den Wert der Entnahme mit einbezogen und als Wasserdargebot wurden 188 Mrd. m³ verwendet. Die rote Linie kennzeichnet der Grenzwert, der als Schwelle für Wasserstress angenommen wird.

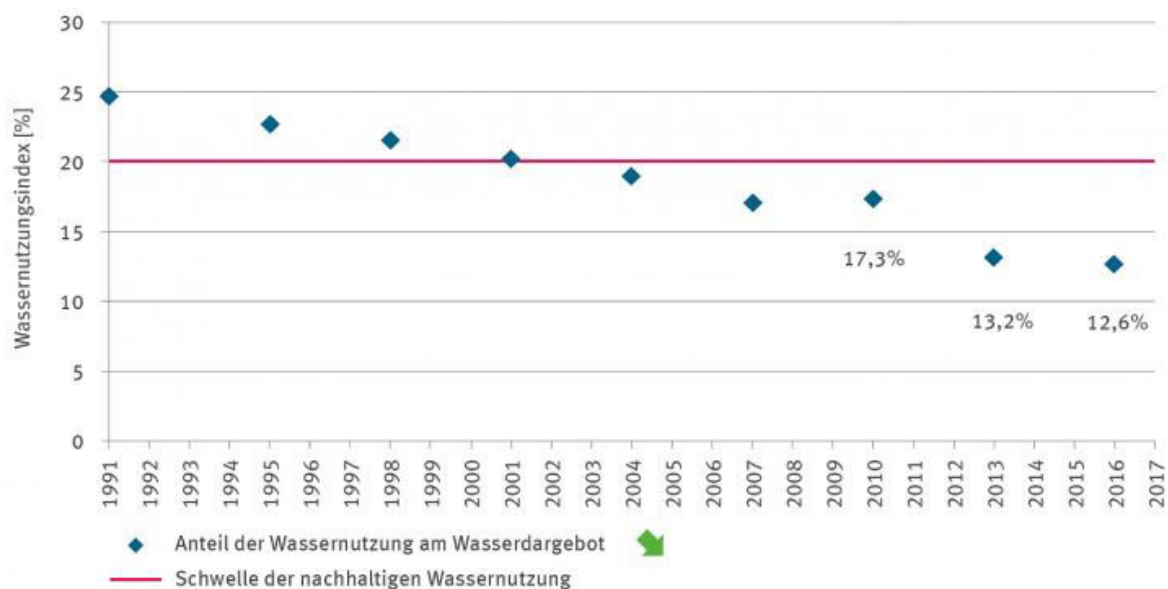


Abbildung 30: Wassernutzungsindex in Deutschland 1991-2017 (UBA, 2019b).

Seit 1990 nimmt der Wassernutzungsindex von knapp 25 % fast stetig ab. Nur in der Zeiteinheit von 2007 bis 2010 wurde ein kleiner Anstieg auf 17,3 % festgestellt. Nach Definition hat Deutschland im Jahr 2002 die Schwelle des Wasserstress unterschritten. Im Jahr 2013 lag der Wassernutzungsindex bei 13,2 % und im Jahr 2016 bei 12,6 %.

Die Wasserbedarfe sind bundesweit sehr unterschiedlich, denn in Regionen, wo sich Einwohner und Industrie konzentrieren, wird mehr Wasser gebraucht als vergleichsweise in dünn besiedelten ländlichen Regionen (siehe Abbildung 31).

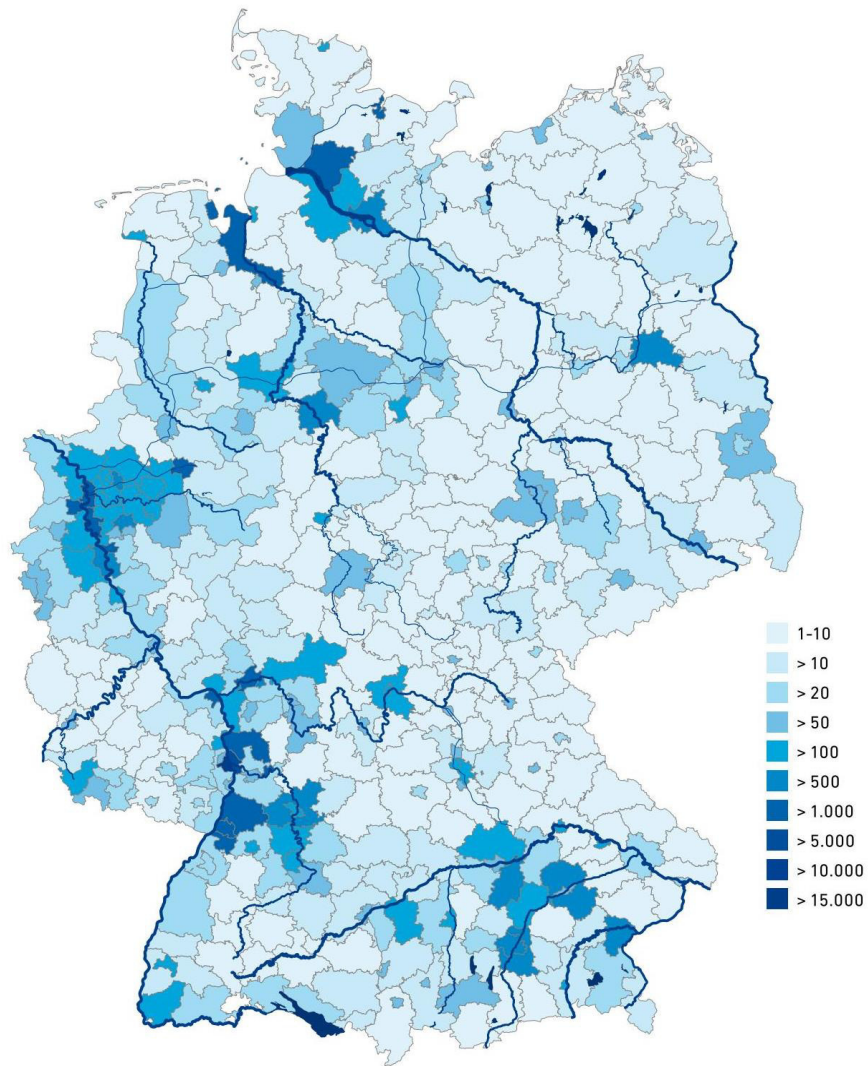


Abbildung 31: Jährliche Wasserbedarfe in den Kreisen in Liter pro Quadratmeter (Hirschfeld et al., 2016).

Die größten Wassernutzer sind KW und in der Regel unmittelbar an den Flüssen aufgrund des Kühlwasservorkommens angesiedelt. Wasserknappheiten ergeben sich also nicht nur aus natürlichen Gegebenheiten, sondern auch aus dem Zusammenspiel aus dem natürlichem Wasserangebot und der gesellschaftlicher Wassernachfrage (Hirschfeld et al., 2016).

Im folgenden Kapitel wird der Zusammenhang zwischen der Energie- und Wasserwirtschaft näher erläutert.

8. Energie-Wasser-Nexus

Die Energie- und Wasserwirtschaft können nicht einzeln betrachtet werden, da sie in vielerlei Hinsicht miteinander verknüpft sind und in Wechselwirkungen zueinanderstehen. Es wird die Bedeutung der Wasserwirtschaft für die Energieversorgung herausgearbeitet und auf der Ebene der Energiebereitstellungstechnologien der spezifische Wasserbedarf auf Basis von Literaturwerten untersucht.

8.1 Wechselwirkungen von Energie- und Wasserversorgung

Wasserströme können eingeteilt werden in grünes Wasser oder Dampf. Eine weitere Kategorie ist flüssiges, beziehungsweise blaues Wasser. Wassernutzungsbewertungen fokussieren sich meist auf blaues Wasser, von dem der Großteil der verwendeten Wassermenge für die Bewässerung in der Landwirtschaft und ebenso ein Anteil für industrielle und Energieproduktion genutzt wird. Energie ist der signifikanteste Sektor, der angepasst werden sollte, bei dem Versuch auf den Klimawandel zu reagieren und die meisten Energiebereitstellungstechnologien verwenden blaues Wasser (Pittock, 2011).

Die Entwicklung von Wasserangebot und -nachfrage ist entscheidend, da der Rohstoff Wasser zum begrenzenden Faktor für alle Sektoren, auch der Energiewirtschaft, werden kann (Julia Weiler, 2021). Der Zusammenhang zwischen Energie- und Wasserwirtschaft wird durch die Energiegewinnung nach Sektoren, dargestellt in Abbildung 32, deutlich.

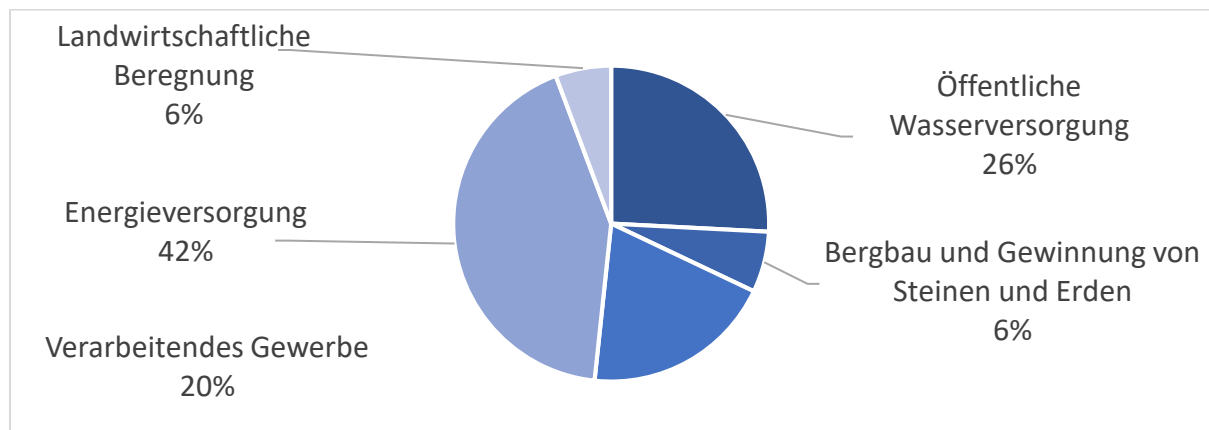


Abbildung 32: Eigengewinnung von Wasser in Deutschland 2019 nach (Destatis, 2021).

Die Energieversorgung macht 42 % in der Nutzung des eigengewonnenen Wassers aus und ist damit mit Abstand der größte Nutzer des Wassers. Zweitgrößter Verbraucher ist die öffentliche Wasserversorgung, gefolgt von dem verarbeitenden Gewerbe mit um ca. 20 %. Die landwirtschaftliche Beregnung und der Bergbau machen nur einen kleinen Teil von jeweils 6 % aus.

Der Energiesektor zählt zu den wichtigsten Wassernutzern und benötigt 20 Mrd. m³ pro Jahr Wasser für KW und größtenteils (über 95 %) für ihre Kühlsysteme (Hirschfeld et al., 2016). Zweitgrößter Nutzer ist die öffentliche Wasserversorgung mit jährlich rund 5 Mrd. m³ Wasser. Die nicht öffentliche Wasserversorgung mit ca. 19 Mrd. m³ umfasst die Sektoren Industrie, Gewerbe und Energiegewinnung (BMU, 2021). Für die Energieversorgung ist Wasser im großen Maße für die Kühlzwecke relevant, wofür meist Frischwasser verwendet wird. Im Jahr 2016 wurden insgesamt rund 11 Mrd. m³ Frischwasser für die Kühlung innerhalb von Produktionsprozessen und fast 13 Mrd. m³ für den Sektor Energieversorgung eingesetzt, was der größte Anteil des eingesetzten Kühlwassers ist. Quellen sind vorrangig Flüsse, aber auch Seen und Talsperren sowie Uferfiltrat und Grundwasser (BMU & UBA, 2017).

Die nachfolgende Abbildung 33 zeigt die Wasserversorgung im Jahr 2016 und das nach Wasserarten und Sektoren strukturiert.

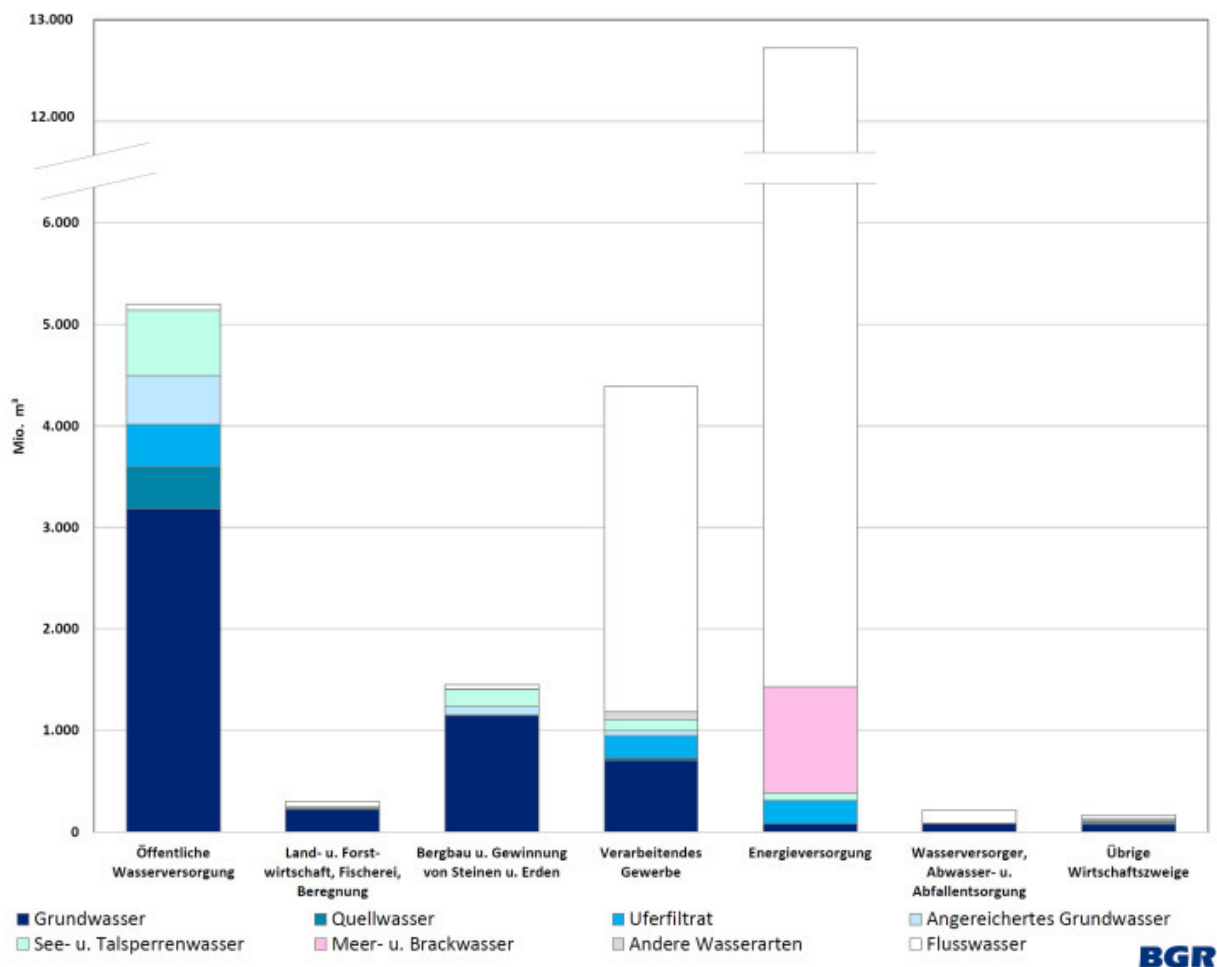


Abbildung 33: Wasserversorgung 2016 nach Wasserarten und Wirtschaftszweigen (Destatis, 2018/2019).

Neben Flusswasser sind Meer- und Brackwasser an zweiter Stelle relevant für die Energieversorgung. Kleinere Anteile, verglichen mit den anderen Positionen, werden Uferfiltrat, angereichertem Grundwasser und Grundwasser zugeschrieben. In anderer Darstellung ist in der Abbildung 34 ein

Wasserflussdiagramm für Deutschland 2016 erkennbar, das heißt, die genutzten Wassermengen von der Wasserquelle bis hin zu der endgültigen Wassernutzung (von links nach rechts).

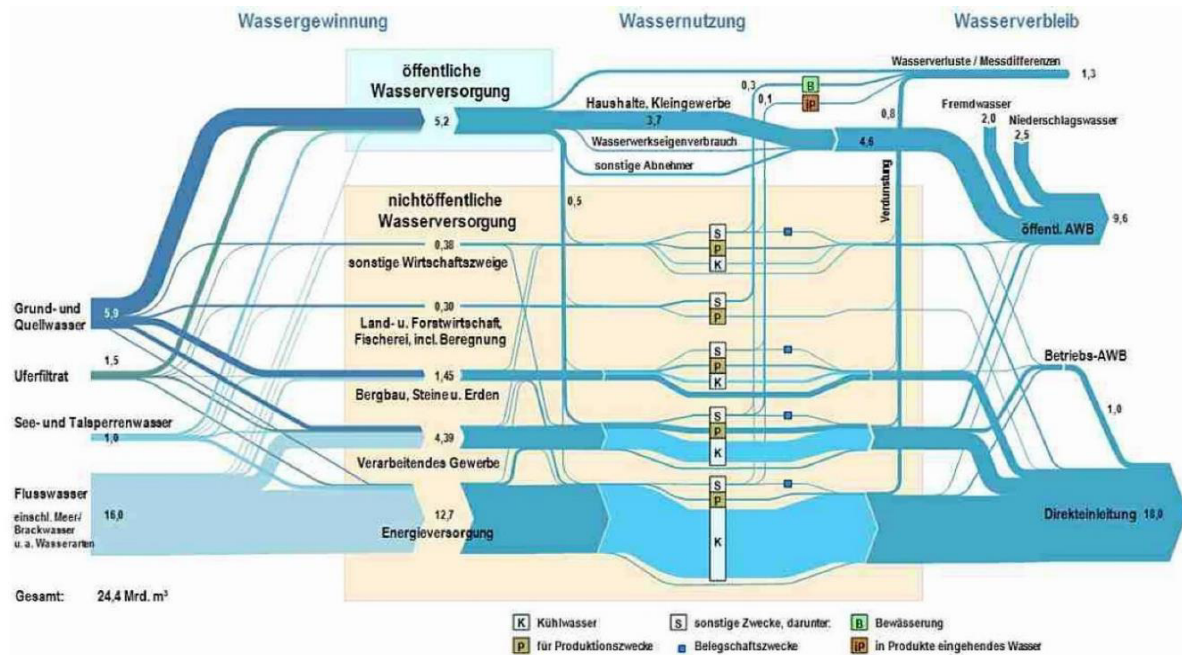


Abbildung 34: Übersicht der genutzten Wassermengen in Deutschland 2016 (TU Clausthal & Tuttahs & Meyer Ingenieurgesellschaft, 2016).

Mengenmäßig ist Flusswasser als Quelle am meisten verwendet, wovon ein Großteil für die Energieversorgung genutzt wird. Verwendung findet es vorrangig als Kühlwasser für die Prozessabläufe. Mit weiterem Fokus auf den Energiesektor werden ebenso kleine Mengen an Grund- und Quellwasser, Uferfiltrat, aber auch See- und Talsperrenwasser genutzt, da weitere Wassermengen für Produktionszwecke notwendig sind. Es ist ersichtlich, dass ein Großteil des im Energiesektor genutzten Wassers per Direkteinleitung wieder in die Flüsse und andere Quellen zurückgeleitet wird.

Zahlenmäßig wurden 2019 in Deutschland insgesamt knapp 25 Mrd. m³ Wasser bezogen, davon 20,7 Mrd. m³ in Eigengewinnung. Für die Energiegewinnung wurden von den in Deutschland bezogenen Volumina 8,8 Mrd. m³ und aus fremdbezogenen Quellen noch einmal 0,27 Mrd. m³ benutzt, was insgesamt gute 9 Mrd. m³ und rund 35 % des Wassers im Jahr 2019 ausmacht (Destatis, 2021).

Im Mittel werden 96 % des Kühlwassers zurück in Oberflächengewässer geleitet und 4 % verdunstet. Die Verschmutzung dieses Wassers liegt demnach in Form von erhöhten Temperaturen vor, wodurch die Gewässerqualität stark vermindert wird und Organismen der Ökosysteme See und Fluss negativ beeinflussen. Zusätzlich sinkt bei steigender Temperatur die Fähigkeit des Wassers, Sauerstoff zu speichern, was eine weitere Verminderung der Biodiversität und damit der Wasserqualität bedeutet. Eine weitere Nutzung ist dann mit erhöhter Aufbereitung verbunden (ideas into energy gGmbH & German Water Partnership e.V., 2021).

Neben den Kühlprozessen gibt es jedoch weitere Schnittstellen zwischen der Wasser- und Energiewirtschaft. Im Folgenden sind einige Beispiele aufgeführt (Bormann et al., 2019; EEA/Evrin Dogan Ozturk, 2019):

Wasser wird bspw. im Bereich Energieversorgung benötigt als:

1. Prozesswasser für Industrie
2. Kühlwasser für KW
3. Medium Wasserkraft für Energiegewinnung
4. Prozesswasser für Gewinnung von Energierohstoffen
5. Entwässerungsmedium von Tagebauen
6. Bewässerungsmedium von Energiepflanzen
7. Kulturmedien zur Faulgasgewinnung

Energie in Form von meist Strom ist notwendig für die Wasserwirtschaft für:

1. Wasserverteilung
2. Pumpspeicher
3. Trinkwasseraufbereitung
4. Grundwasserförderung
5. Pumpenergie zur Bewässerung
6. Abwasserreinigung

Für eine fundierte Bewertung der Ausbauziele der Energiewirtschaft vor dem Hintergrund der Ressource Wasser, ist eine detailliertere Untersuchung der Wassernutzung je Energiebereitstellungstechnologie notwendig.

8.2 Wasserbedarf der Energiebereitstellungstechnologien

Der Wasserbedarf hängt von drei wesentlichen Faktoren ab: der Energiequelle und der Energiebereitstellungstechnologie, dem Kühlsystem für das KW und der Wassernutzungsintensität (Terrapon-Pfaff et al., 2020). Dementsprechend sind die einzelnen Prozessschritte von der Energiequelle bis hin zur Verteilung relevant für den gesamten Wasserbedarf einer Energiebereitstellungstechnologie. In der Literatur existieren diverse Angaben für den Wasserbedarf von Energiebereitstellungstechnologien, teilweise nach einzelnen Prozessschritten unterteilt. Für die Meta-Analyse dieser Arbeit werden im weiteren Vorgehen jedoch die Gesamtvolumina an Wasser betrachtet, um eine Vergleichbarkeit zu schaffen. Man unterscheidet bei dem Wasserbedarf zwischen der Nutzung und dem Verbrauch mit dem Unterschied, das genutzte Wasser wieder zurück in den Wasserkreislauf geleitet wird und verbrauchtes Wasser nicht.

Thermische KW, wie Atom-, Kohle- und solarthermische KW, benötigen die größte Wassermenge während des Betriebs für die Kühlung (Greenpeace e.V., 2016). GUD-KW, betrieben mit Erdgas, brauchen aufgrund ihres höheren Wirkungsgrades weniger Wasser. Windkraft- und PV-Anlagen haben einen geringen Wasserbedarf im Betrieb, da hauptsächlich Wasser bei der Produktion der Anlagen anfällt. Der Wasserbedarf der Energieproduktion mittels Wasser-, Geothermie- und Biomasse-KW variiert enorm und ist unter anderem vom vorherrschenden lokalen Klima abhängig. Wie bereits erwähnt, ist ein weiterer wichtiger Indikator die spezifische Kühltechnik der KW, wobei konventionell zwischen Durchlauf- und Umlaufkühlung unterschieden wird. Erstere zeichnet sich durch eine hohe Wasserentnahme und einen geringen Wasserverbrauch aus, wobei letztere weniger Wasser entnehmen, doch der Großteil davon nicht in den Wasserkreislauf zurückgeführt, also verbraucht wird (van Vliet et al., 2016).

In der vorliegenden Arbeit wird aufgrund von fehlenden Daten, ohne Betrachtung der Kühltechnik, die Literatursauswertung vorgenommen. In Tabelle 11 sind die Literaturwerte des Wasserbedarfes für verschiedene Energiebereitstellungstechnologien aufgeführt.

Tabelle 11: Wasserbedarf von Energiebereitstellungstechnologien aus der Literatur.

Quelle	(Gerbens-Leenes et al., 2008)	(Bormann et al., 2019) nach (Meldrum et al., 2013)/ (Gleick & Peter H., 1994)	(Technische Universität Berlin, 2019)	(Terrapon-Pfaff et al., 2020)	(World Energy Council Europe, 2010)
Bezug	Energie	Strom, im Betrieb	Strom	Energie	Energie
Einheit	m ³ /MWh				
Art	Verbrauch	Nutzen (Verbrauch)	Verbrauch	Nutzen (Verbrauch)	Verbrauch
Energieträger					
Kohle	0,59	33,7 (1,3)	6,12	73 (1,4)	0,6
Mineralöl	3,8	-	0,54	69 (1,6)	3,6
Erdgas	0,4	18,9 (0,8)	1,94	69 (1,6)	0,4
Wasserkraft	80,3	-	15,8	0 (17)	0
PV	0,95	0,03 (0,03)	2,4	1,7 (1,7)	0,03
Wind	0	0,004 (0,002)	-	0 (0)	0
Kernkraft	0,3	37,9 (2,3)	8,3	88 (1,3)	0,3
Geoth.	-	1,2 (1,1)	-	70 (1,1)	-
Biomasse	-	0,95 (0,95)	14,8	69 (1,1)	divers
PtX	-	0 (0,5)	-	-	-

Es ist erkennbar, dass für die Energiebereitstellungstechnologien sehr diverse Zahlen angebracht werden. Für eine bessere Interpretationsgrundlage werden im nachfolgenden der Wasserverbrauch

und die Wassernutzung getrennt voneinander betrachtet. In der Abbildung 35 ist der Wasserverbrauch der Energiebereitstellungstechnologien aufgezeigt und das für die verschiedenen Literaturfundstellen.

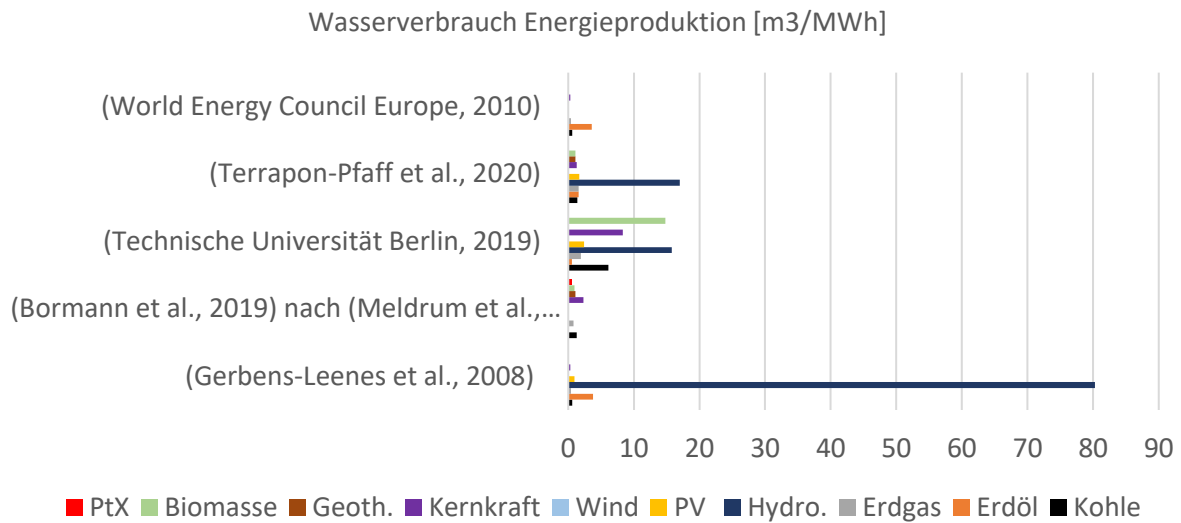


Abbildung 35: Wasserverbrauch von Energiebereitstellungstechnologien.

Es ist erkennbar, dass besonders die Wasserenergie einen hohen Verbrauch an Wasser aufgezeigt, wobei eine große Spannweite an Daten existiert. An zweiter und dritter Stelle sind zum einen die Biomasse und zum anderen die Kernkraft mit einem großen Wasserverbrauch auszumachen. Da die Datengrundlagen der Fundstellen nicht alle auf die gleiche Energieform zurückgreifen, ist in Abbildung 36 der Wasserverbrauch spezifisch für die Stromproduktion dargestellt.

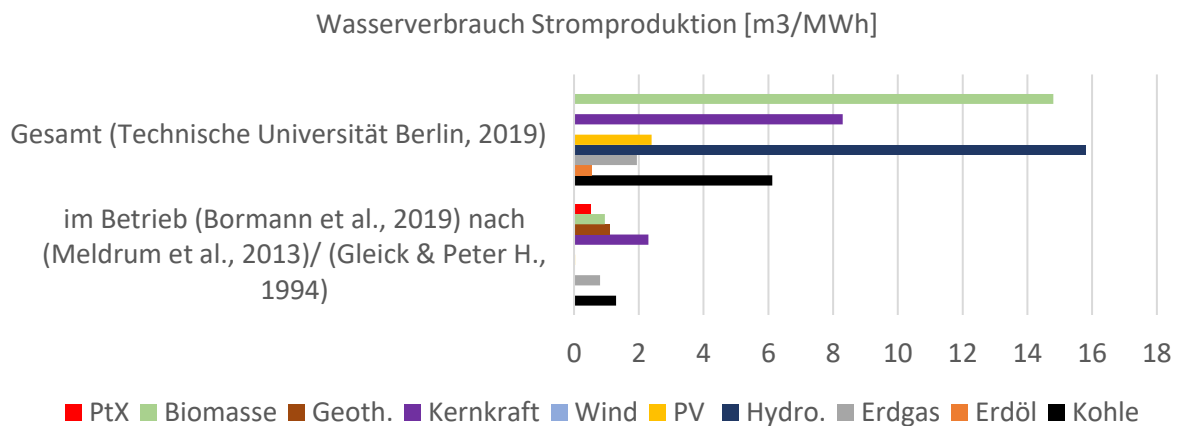


Abbildung 36: Wasserverbrauch für die Stromproduktion mit verschiedenen Energieträgern.

Es bestätigt sich, dass vorrangig Wasserkraft, Biomasse und Kernkraft im gesamten Prozess der Stromproduktion am meisten Wasser verbrauchen, aber auch die Kohle knapp dahinter große Mengen Wasser benötigt. Für den Betrieb der KW für die Energiebereitstellung hingegen ist die Kernkraft führend, gefolgt von der Kohle, wobei auch Geothermie, Biomasse, Erdgas und Power-to-X nur leicht dahinter angeordnet sind. Die Wasserkraft benötigt im Betrieb, laut der verfügbaren Quellen, somit kein oder nur wenig Wasser.

Für die Wassernutzung wurde auf zwei Quellen zurückgegriffen und in Abbildung 37 die Wassermengen nach Energiebereitstellungstechnologien aufgezeigt.

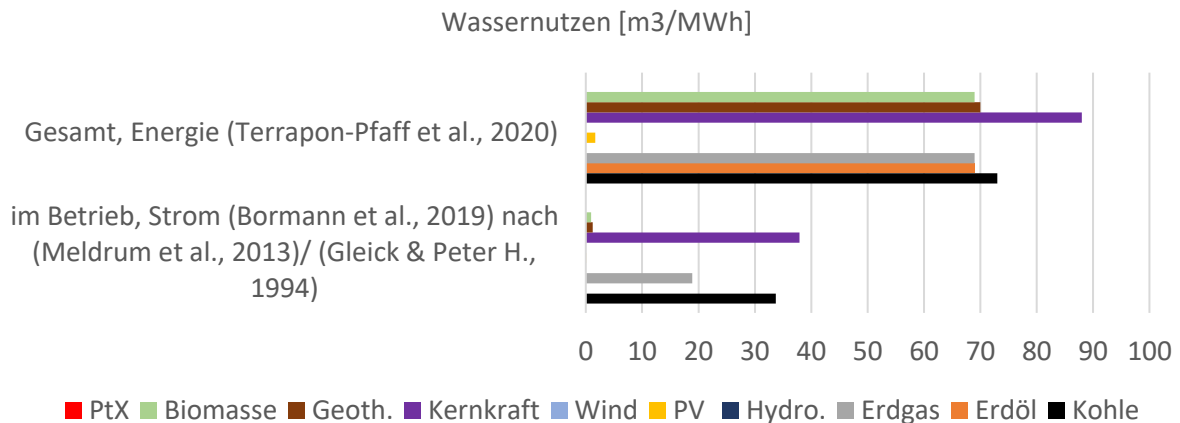


Abbildung 37: Wassernutzung nach Bereitstellungstechnologien.

Es lassen sich erneut die Wassernutzung im gesamten Prozess, sowie während der Betriebsphase der KW herauslesen. Auf den gesamten Prozess gesehen nutzt die Kernkraft am meisten Wasser, dicht gefolgt von Kohle, Erdöl und -gas, sowie Biomasse und Geothermie. Für Wind, PV, PtX und Wasserkraft sind nur marginale Werte aufgezeigt. Wichtig für die Einordnung ist, dass die Werte für den gesamten Prozess auf der Energieproduktion, aber die Betriebsdaten auf der Stromproduktion basieren und dadurch zusätzliche Unterschiede in der Größenordnung entstehen können.

Es wird deutlich, dass die unterschiedlichen Energiebereitstellungstechnologien unterschiedliche Volumina an Wasser nutzen und verbrauchen in den verschiedenen Phasen der Energieproduktion. Die Prozesskette der Energieproduktion lässt sich, wie in Abbildung 38 dargestellt, vereinfacht wie folgt einteilen:



Abbildung 38: Prozessschritte Energieproduktion.

Je nach Energiequelle sind die prozentualen Verteilungen des Wasserbedarfes verschieden auf die Prozessschritte aufgeteilt. Der Fokus in dieser Arbeit liegt auf dem Prozessschritt Betrieb. Laut Bormann et al. und Terrapon-Pfaff et al. liegen die Anteile für Kohle, Erdgas, -öl und Kernkraft bei über 90 %, wohingegen Windkraft und PV nur kleine Wassermengen während der Betriebsphase nutzen und/ oder verbrauchen und besonders der Anlagenbau den größten Wasserbedarf hat. Bei den Energieträgern Geothermie und Biomasse sind sehr weite Spannen zwischen den Anteilen angegeben, wobei die Annahmen für die jeweiligen Energiebereitstellungstechnologien entscheidend sind. Je nach Wahl des Kühlungs- und KW-art gibt es große Unterschiede, was den Wasserbedarf betrifft.

Aufgrund der kleinen Datengrundlage sind die aufgezeigten aquatischen Kennzahlen eher als Richtwerte zu verstehen. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die aquatischen Kennwerte über den gesamten Lebenszyklus der Energieproduktion von Terrapon-Pfaff et al. als Referenz genommen, da es die neueste Ausarbeitung aquatischer Kennzahlen ist und durch die Unterteilung in Wassernutzung und -verbrauch mit einer großen Bandbreite an betrachteten Energieträgern am adäquatesten ist. Es erfolgt innerhalb der Masterthesis des Weiteren die Untersuchung der Beispielregion Bremen. Spezifische aquatische Kennwerte der KW werden berechnet, die anschließend mit den Literaturwerten verglichen werden.

9. Beispielregion Bremen

Anhand der gewählten Beispielregion Bremen werden aquatische Kennzahlen generiert und Nutzungskonflikte zwischen Energiebereitstellungstechnologien aufgezeigt. Dafür wird der spezifische rechtliche Rahmen abgebildet, die Energie- und Wasserversorgung charakterisiert und eine Wasserbilanz erstellt, als auch für konkrete KW in Bremen der Wasserbedarf bestimmt.

Die sogenannte „Freie Hansestadt Bremen“ ist der offizielle Name für das Bundesland Bremen im Nordwesten Deutschlands. Der Stadtstaat ist ein „Zwei-Städte-Staat“ mit den beiden Stadtgemeinden Bremen und Bremerhaven. Dazwischen liegt niedersächsisches Gebiet und der Fluss Weser verbindet die beiden Städte, der in Bremerhaven in die Nordsee mündet (Statistisches Landesamt Bremen, 2021c).

9.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Die Hansestadt Bremen ist als Teil von Europa und der Bundesrepublik Deutschland verpflichtet, die geltenden Gesetze und Richtlinien einzuhalten und diese auf Landesebene in Gesetze zu integrieren und umzusetzen. Der rechtliche Rahmen bezieht sich immer auf das Bundesland Bremen, welches neben der Stadt Bremen ebenso Bremerhaven inkludiert.

Im Bereich der Energiewirtschaft gelten die Klimaschutzmaßnahmen für die angestrebte Klimaneutralität auf Bundesebene bis 2045, welche konkret im BremKEG detailliert für Bremen die Maßnahmen festlegt. Das 2015 veröffentlichte Gesetz ist noch am „alten“ Klimaziel bis 2050 orientiert und hat somit das Leitziel, die THG-Emissionen bis zum Jahr 2050 um 80 bis 95 Prozent gegenüber dem Vergleichsjahr 1990 zu senken (§1 (1) Satz 2 BremKEG). In 3.4 (1) der Fortschreibung des BremKEG werden in einer Stellungnahme gemäß § 5 Absatz 3 BremKEG die Ergebnisse der jährlichen CO₂-Berichterstattung dargestellt, welche erhebliche Abweichung der tatsächlichen Entwicklung der bremischen CO₂-Emissionen von den vorliegenden Klimazielen numerisch unterstreicht. Für die kommenden Jahre und Jahrzehnte liegt der Fokus besonders auf dem Ausbau erneuerbarer Energien (vorrangig Onshore Wind und PV), aber auch auf der Weiterentwicklung von innovativen Konzepten wie Wasserstoffstrategien und Sektorenkopplung. Details zur Bremer Wasserstoffstrategie sind im Abschnitt 9.2.2 zu finden. In 5.7 (2) der Fortschreibung des BremKEG wird als Ausblick auf die Vorarbeiten für den Zeithorizont 2030 genannt, dass das Bremer Klimaschutzziel für 2030 in der „nächsten Fortschreibung bis zum 31.12.2018 festgelegt“ wird, was bisher nicht eingehalten wurde. Dementsprechend existieren keine eindeutigen Ziele bezogen auf die THG-Emission und deren Reduktion in Bremen.

Im Auftrag von SKUMS hat das Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg 2021 eine Untersuchung zu den Klimaschuttszenarien für das Jahr 2030 herausgebracht, in dem ebenso die

Klimanotlage Bremens betont wird. Es ist ein Ziel-Szenario erarbeitet, in dem die CO₂-Emissionen im Land Bremen (ohne Betrachtung der Stahlindustrie) bis zum Jahr 2030 um 80 % gegenüber dem Basisjahr 1990 gesenkt werden können. Für die Erreichung der festgelegten Emissions-Ziele müssten im Jahr 2030 für die Erreichung der langfristigen Ziele im Jahr 2030 zwischen 46 % und 52 % CO₂ eingespart werden, was eine deutliche Erhöhung der jährlichen Minderungsrate ergibt (ifeu, 2021).

In der Koalitionsvereinbarung für die Regierungsperiode 2019-2023 bekennt sich Bremen ausdrücklich zum Pariser Abkommen und dem 1,5 °- Ziel. Für das bremische Klimaziel bis zum Jahr 2030 bedeutet das umgerechnet eine Reduktion der THG-Emissionen gegenüber dem Referenzjahr 1990 um 80 %, was eine Verschärfung gegenüber dem BremKEG aufweist. Das Ziel ist es, als Bundesland Bremen eine Vorreiterrolle beim Klimaschutz innerhalb Deutschlands einzunehmen und „so schnell wie möglich klimaneutral“ (Koalitionsvertrag, S.21) zu werden. Bremen ist dem Kohleausstiegsgesetz verpflichtet, der einen Kohleausstieg bis 2030 fordert, setzt jedoch an einem ambitionierteren Ziel für den Kohleausstieg für die Stromproduktion bis zum Jahr 2023 an.

Die Enquetekommission Bremen ist durch die Bremische Bürgerschaft eingesetzt und besteht aus 18 Mitgliedern verschiedener Fraktionen, die konkrete Vorschläge für die Emissionsreduktion liefern. Als Klimaziele sind die Reduzierung der THG-Emissionen einschließlich der Stahlindustrie bis zum Jahr 2030 um 60 %, bis zum Jahr 2033 um 85 % und bis zum Jahr 2038 um 95 % gegenüber dem Referenzjahr 1990 zu erreichen. Letzteres würde die Klimaneutralität des Landes Bremen darstellen. Die ambitionierten Zielpfade berücksichtigen das global verbleibende CO₂-Budget und den angemessenen Beitrag des Landes Bremens zur globalen Klimagerechtigkeit. Bezogen auf den Energie- und Abfallsektor werden konkrete Minderungszahlen von 70 % bis 2030 (bezogen auf das Jahr 1990) vorgeschlagen. Einheitlich zum Koalitionsvertrag wird der Kohleausstieg 2023 angesetzt. Weitere Maßnahmen für die Energiewirtschaft sind die Dekarbonisierung der Stromerzeugung, der Ausbau des Stromnetzes inklusive der Elektrifizierung des Stahlwerkes in Bremen, die Ausweitung und Dekarbonisierung der Fernwärme und der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur (Enquetekommission, 2021).

Auch bezogen auf die Wasserwirtschaft zeigt der Koalitionsvertrag Regelungen. Es wird betont, dass die WRRL der europäischen Ebene konsequent umgesetzt wird. Des Weiteren existiert das bremische Wassergesetz (BremWG), welches die Bewirtschaftung oberirdischer Gewässer und des Grundwassers regelt, aber auch die Abwasserbehandlung und einige Schutzmaßnahmen festlegt, es ist der Genehmigungsablauf zu entnehmen. Beispielsweise müssen laut § 40 Abschnitt 1 (1) BremWG, für die Errichtung, Änderung und Beseitigung von Wassergewinnungsanlagen, die der öffentlichen Wasserversorgung dienen und für andere Anlagen zur Wasserversorgung, die für einen Wasserbedarf von mehr als 10 m³ täglich bemessen sind, eine Genehmigung der Wasserbehörde eingeholt werden.

9.2 Energieversorgung in Bremen

Für die Darstellung der Energieversorgung in Bremen wird der Status Quo der Energielandschaft betrachtet, aber auch eine Prognose der Entwicklung in Form von der Wasserstoffstrategie für den Norden Deutschlands und konkret das Land Bremen gegeben.

9.2.1 Status Quo der Energielandschaft

Die Energiewirtschaft, und in dem Rahmen besonders die fossilen Quellen, sind ein großer Faktor für die Emissionshöhe. Über ¼ der Energie wurde im Jahr 2019 durch Steinkohle gewonnen und nur 1,6 % hatten einen erneuerbaren Ursprung (Statistisches Landesamt Bremen, 2021c). In Abbildung 39 ist die Verteilung der Energieträger im Jahr 2020 erkennbar. Steinkohle ist neben Mineralölen und Mineralölprodukten, Gasen und Strom weiterhin die wichtigste Energiequelle.

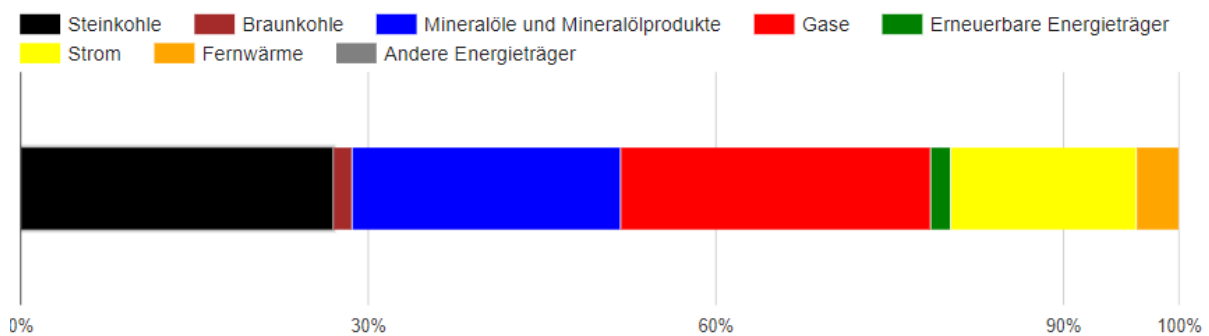


Abbildung 39: Anteile der Energieträger am Endenergieverbrauch in Prozent im Jahr 2020 im Bundesland Bremen (Statistisches Landesamt Bremen, 2022a).

In Bremen sind 1.418 MW (Stand 2021) KW-Leistung installiert. Davon sind über ¾ den fossilen Energieträgern zuzuordnen, wobei besonders Erdgas und Steinkohle Verwendung finden. Bei den EE ist besonders die Windkraft stärker ausgeprägt und Biomasse mit PV folgen mit kleineren Anteilen. Ein sehr kleiner Anteil wird dem Laufwasser zugeschrieben (UBA, 2022b).

Aktuelle Werte sind in Tabelle 12 aufgelistet. Neben Steinkohle ist nahezu gleichwertig Braunkohle ein großer Energieträger für das Bundesland Bremen. Vorreiter für die EE sind Onshore Windenergieanlagen, aber auch solare Strahlungsenergie und Wasserkraft wird genutzt, um die insgesamt knapp 1.600 MW Nettoleistung zu erzeugen.

Tabelle 12: Elektrische Nettonennleistung [MW] Bundesland Bremen Stand 31.05.2022 (Bundesnetzagentur, 2022b).

Energiequelle	Elektrische Nettonennleistung [MW]
Abfall	111
Batteriespeicher	18
Biomasse	14
Erdgas	459
Geothermie	0
Kernenergie	0

Energiequelle	Elektrische Nettonennleistung [MW]
Mineralölprodukte	86
Solare Strahlungsenergie	54
sonstige Energieträger (nicht EE)	160
Steinkohle	469
Wasser	10
Windenergie (Onshore)	198
Summe	1.579

Die Energiewende in Bremen wird langsam vollzogen. Auch in der Stromerzeugung wurden im Jahr 2020 gerade mal 3,9 MW installierte Leistung an solarer Strahlungsenergie zugebaut, was 295 Einzelanlagen entspricht. Im Jahr 2020 existierten somit insgesamt rund 2600 solare Einzelanlagen. Der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromproduktion besteht aus folgenden installierten Leistungen: 12,4 MW Biomasse, 50,9 MW solare Strahlungsenergie, 210,8 MW Wind Onshore und 2,1 MW Deponiegas (Föderal Erneuerbarer, 2019; SKUMS, 2021b).

Für die Untersuchung der Energielandschaft der Stadt Bremen wird im Folgenden die KW-Landschaft abgebildet, die für die Energieproduktion, das heißt Strom und Wärme, verantwortlich sind. In Bremen existieren sechs KW, die der swb AG angehören (Abbildung 40).



Abbildung 40: Standorte swb AG Kraftwerke (swb Erzeugung AG & Co. KG & swb Entsorgung GmbH & Co. KG, 2021).

Vier der KW gehören der swb Erzeugung AG & Co. KG an. Im KW Hastedt wird Block 15 betrieben, der 1989 an das Netz angeschlossen wurde und über eine Kondensationsmaschine Strom erzeugt (Bundesnetzagentur, 2022b). Eingespeist wird Steinkohle, die über eine KWK eine 80 %-iger Ausnutzung erreicht. Die Feuerungswärmeleistung beträgt 307 MW, womit unter anderem der Bremer Osten mit Heizwärme versorgt wird. 2018 erfolgte die Erweiterung um einen Wärmespeicher. Die

elektrische Nettoleistung wird mit 113 MW angegeben (swb Erzeugung AG & Co. KG & swb Entsorgung GmbH & Co. KG, 2021).

Es wird an dem Standort Hastedt ein Zubau im Rahmen des Kohleausstiegs erfolgen und ein KW mit einer elektrischen Leistung von 104 MW und einer thermischen Nettoleistung von 95 MW entstehen (Bundesnetzagentur, 2022a). Das neue BHKW wird auf Basis von Erdgas Energie in Form von Wärme erzeugen, womit vorrangig der Bremer Osten und das Mercedes Werk versorgt werden sollen. Geplant ist eine Inbetriebnahme im vierten Quartal des Jahres 2022 (swb AG, 2022).

Das zweite KW in Bremen ist das Heizkraftwerk (HW) Vahr, welches im Jahr 1959 in Betrieb genommen wurde und auf Erdgas basiert. Nach einigen Ausbaumaßnahmen besteht das HW Vahr aus Fernwärmekesseln 6 bis 9. Der Standort hat eine Feuerungswärmeleistung von 166 MW, wovon der Großteil thermisch als Fernwärme genutzt wird. Das HW Vahr wird vom KW Hastedt betrieben und betreut (swb Erzeugung AG & Co. KG & swb Entsorgung GmbH & Co. KG, 2021).

Im Hafen Bremens ist seit 1979 Block 6 beheimatet. Das KW Hafen wurde 1975 als konventionelles Kohle-KW für deutsche Steinkohle gebaut. Ende der 1980er-Jahre wurde der Block 6 um eine Rauchgasreinigungsanlage ergänzt. Im Block 6 biogene Brennstoffe eingesetzt und hat eine Feuerungswärmeleistung von 761 MW (ca. 330 MW elektrisch und ca. 28 MW thermisch). Im Jahr 2021 wurde Block 6 endgültig stillgelegt und im Bau ist ein Gemeinschafts-KW der Kooperationspartner OOWV, swb Erzeugung EWE Wasser GmbH und HanseWasser Ver- und Entsorgungs GmbH (Bundesnetzagentur, 2022a). Es handelt sich um eine Monoklärschlammverwertungsanlage, die voraussichtlich 2023 kommunale Klärschlamm verwerten soll (swb Erzeugung AG & Co. KG & swb Entsorgung GmbH & Co. KG, 2021; swb AG, 2022).

Das vierte KW liegt in Mittelsbüren und wurde 1957 durch eine Kooperation mit ArcelorMittal erschaffen mit dem anfänglichen Ziel der Blöcke 1-3, den Bahnstrom mit 16,7 Hertz für die deutsche Bundesbahn zu liefern, welche jedoch seitdem abgeschaltet wurden. Seit 2002 wird das Gichtgas der Stahlwerke, welches als Abfallprodukt bei der Stahlproduktion entsteht, bei einer Feuerungswärmeleistung von rund 500 MW verbrannt. Die Betriebsführung obliegt der INGAVER GmbH. Der Block 4 hat eine Bruttoleistung von 240 MW und eine elektrische Wirkleistung von 160 MW. Zusätzlich ist eine Gasturbine GT 3 angefügt, die ohne Abhitzkessel bei 330 MW Feuerungswärmeleistung betrieben wird. Der Generator ist in der Lage, innerhalb kurzer Zeit kurzfristig benötigte Energie in das Netz einzuspeisen und agiert auf Basis vom Mineralölprodukt Heizöl (swb Erzeugung AG & Co. KG & swb Entsorgung GmbH & Co. KG, 2021).

Die swb Entsorgung GmbH & Co. KG verfügt über zwei weitere KW in Bremen. Die stoffliche Verwertung aus dem Haushalts- und Kleingewerbemüll, und somit zugehörig zu dem Energieträger Biomasse, beträgt in der Stadt Bremen 52,25 % (Stand 2016) (SKUMS, 2017).

Das Mittelkalorik-Kraftwerk (MKK) wurde 2008 am Standort Hafen errichtet und produziert Energie durch die Verarbeitung von Siedlungsabfällen. Der biogene Anteil betrug im Jahr 2020 prozentual 50,04 %, wobei die restlichen Abfälle thermisch verwertet werden. Das KW ist eine Siedlungsabfallverbrennungsanlage mit Klärschlammvorschaltanlage. Im Jahr 2020 wurde das MKK um eine Beschickungsanlage zur Klärschlamm-Mitverbrennung erweitert. Der Klärschlamm-Bunker wurde als geschlossenes System installiert. Das MKK hat eine Bruttoleistung von 35 MW und eine elektrische Wirkleistung von 32 MW (swb Erzeugung AG & Co. KG & swb Entsorgung GmbH & Co. KG, 2021; Bundesnetzagentur, 2022b).

Das MKK hat ein gemeinsames Stoffstrommanagement durch den Bereich Vertrieb Entsorgung mit dem Müllheizkraftwerk (MHKW), das seit 1969 in Betrieb ist. Die Siedlungsabfallverbrennungsanlage mit 4 Kesseln hat eine redundante Fernwärmeerzeugung über Heizölbrenner in die Anlagenkonfiguration integriert (Bundesnetzagentur, 2022b). Der biogene Anteil betrug im Jahr 2020 prozentual 50,10 %, wobei die restlichen Abfälle thermisch verwertet werden. Eine Stromerzeugung bis zu 80.000 MWh/a wird ins übergeordnete Netz eingespeist. Insgesamt hat das KW eine Bruttoleistung und elektrische Wirkleistung von rund 65 MW. Seit Anfang 2012 kann auch vorentwässerter Klärschlamm verwertet werden (swb Erzeugung AG & Co. KG & swb Entsorgung GmbH & Co. KG, 2021).

In Mittelsbüren hat sich ein weiteres KW lokalisiert, das GKB (Gemeinschaftskraftwerk Bremen GmbH & Co. KG). Es handelt sich um ein Gas- und Dampfturbinenkraftwerk (GuD), bei dem den Gasturbinen Dampfturbinen nachgeschaltet sind. 2014 wurde es in Betrieb genommen und hat auf Basis der Energiequelle Erdgas eine Netto-Blockleistung von 444,5 MW (Bundesnetzagentur, 2022a). Gekühlt wird mit einer Umlaufkühlung mit Zellenkühlturm und der Wirkungsgrad beträgt rund 58 % (GKB, 2022).

Außerdem existiert in Bremen das KW Farge, welches zu Onyx Kraftwerk Farge GmbH & Co. KGaA gehört und 1969 in Betrieb genommen wurde. Der Steinkohleblock ist als Kondensationsmaschine betrieben und hat eine Nettokapazität von 350 MW (Bundesnetzagentur, 2022b). Jährlich werden 1,5 GWh an elektrischer Leistung produziert. Seit 2001 erfolgt eine Klärschlamm-Mitverbrennung, wobei der Rohstoff aus der benachbarten Kläranlage bezogen wird (Onyx Germany GmbH, 2020).

Im Oktober dieses Jahres 2022 soll in Folge des Kohlestromvermarktungsverbots der Kohleblock stillgelegt werden und ab dem Jahr 2024 Altholz als Energiegrundlage verwendet werden (SKUMS, 2021a; ONYX Power, 2021; Bundesnetzagentur, 2022a).

Der Anlagenbetreiber CR3-Kaffeeveredelung M. Hermsen GmbH hat drei Gasturbinen mit jeweils Nettoleistungen um die 5 MW zwischen 1993 und 2022 in Betrieb genommen und produziert auf Basis von Erdgas Energie. Zwei agieren mit nachgeschalteten Dampfturbinen und einmal wird mit einem

Abhitzeessel gearbeitet. Die Anlage wird nur intern für Produktionsprozesse genutzt und nicht weiter mit in die Betrachtungen einbezogen (CR3-Kaffeeveredelung M. Hermsen GmbH, o.D.; Bundesnetzagentur, 2022b).

Im Bereich der EE existiert seit 2011 ein tideabhängiges Laufwasser-KW in Bremen mit einer elektrischen Nennleistung von 10 MW, welches von der Weserkraftwerk GmbH & Co. KG betrieben wird. Abhängig von den Gezeiten der Nordsee beträgt die Fallhöhe im Wasserlauf-KW sechs bis hin zu zwei Metern. Es ist weitgehend unterirdisch errichtet und erzeugt jährlich ca. 39 Mio. kWh (SKUMS, 2022b).

Des Weiteren gibt es noch 8 KW auf Basis erneuerbarer Energien, die eine Größe unter 10 MW haben, und somit nicht genauer in der Kraftwerkliste mit auftauchen (Bundesnetzagentur, 2022b). Die verwendeten Energieträger sind Biomasse, Geothermie, solare Strahlungsenergie, Onshore- und Offshore Windenergieanlagen sowie Deponie- und Klärgas aus Biomasse. Beispielsweise in Blumenthal betreibt die BREWA UmweltService GmbH eine weitere Verbrennungsanlage für Ersatzbrennstoffe (SKUMS, 2019). Zusammen produzieren sie rund 129 MW elektrische Nennleistung. Aufgrund der geringen Größe werden auch sie nicht weiter innerhalb der Arbeit betrachtet.

Zusammengefasst wird bei der Betrachtung des gesamten Energieoutputs zwischen der Strom- und Wärmeproduktion, also der elektrischen und thermischen Energieproduktion unterschieden. In der vorliegenden Arbeit werden nur KW über 10 MW mit einbezogen. Die Produktionsdaten der GT3 werden aufgrund geringer Betriebsstunden exkludiert (swb Erzeugung AG & Co. KG & swb Entsorgung GmbH & Co. KG, 2021). Die Produktion für ArcelorMittal (Mittelsbüren) und CR3 werden aufgrund der direkten Weiterverwendung ebenfalls nicht mit betrachtet. Daraus ergeben sich für das Jahr 2020 folgende Kreisdiagramme in Abbildung 41 für die Strom- bzw. Wärmeproduktion.

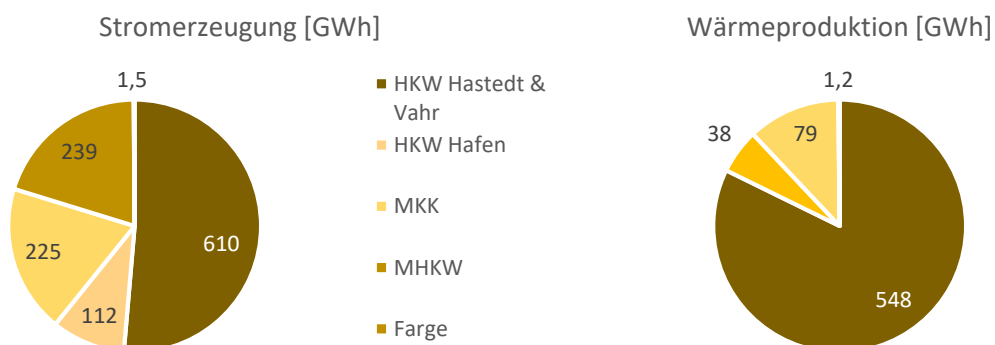


Abbildung 41: Strom- und Wärmeerzeugung in Bremen im Jahr 2020.

HW Hastedt und KW Vahr, die auf Steinkohle basieren, produzieren die größte Energiemenge in Bremen. In Bestätigung der aufgezeigten Energieverteilungen sind die fossilen Energieträger Vorreiter

im Jahr 2020 und nur ein geringerer Teil wird in diesem Fall durch die Abfallverbrennung im MKK und MHKW erzeugt, wobei die Stromproduktion bereits zu 25 % darauf basiert.

Steinkohle ist in Bremen die mengenmäßig größte Energiequelle, gefolgt von Mineralöl und Mineralölprodukten und Gasen. Restliche Energieträger sind nur in kleinen Mengen vertreten. Neben den drei Hauptenergiequellen werden ebenso Strom und EE genutzt, wobei letztere noch einen sehr geringen Anteil ausmachen (Statistisches Landesamt Bremen, 2022b).

Vergleicht man diese Unterteilung mit der Verursacherbilanz der CO₂-Emissionen, so sind besonders Strom, Steinkohle, Gase und Mineralölprodukte Vorreiter (Statistisches Landesamt Bremen, 2016). Dies unterstreicht den überdurchschnittlichen Anteil an fossilen Energieträgern in der Bremer Energiewirtschaft und zeigt die Notwendigkeit auf, EE zu integrieren und auf nachhaltige Innovationen zu setzen. Dafür ist unter anderem der Wasserstoff notwendig, um bei steigendem Einsatz erneuerbarer und damit fluktuierender Energiequellen die Versorgungssicherheit über alle Sektoren gewährleisten zu können.

9.2.2 Wasserstoffstrategie Bremen

Das Bundesland Bremen emittiert jährlich ca. 10 Mio. t CO₂-Emissionen (Stand 2017). Verglichen mit seiner Wirtschaftsleistung ist der Anteil am CO₂-Ausstoß Deutschlands relativ hoch, was folglich erhöhte Anstrengungen zur Senkung dieser Emissionen erfordert, um diese Zahl zu senken (Senatorin für Wirtschaft, Arbeit und Europa et al., 2021).

Das Bremer Stahlwerk ist mit einem Ausstoß von jährlich rund 4,2 Mio. Tonnen CO₂ und damit über 40 % der gesamten Emissionen der größte Emittent im Land Bremen. Das bei der Stahlproduktion entstehende Gichtgas wird, wie bereits beschrieben, in dem KW Mittelsbüren in Block 4 verstromt (Senatorin für Wirtschaft, Arbeit und Europa et al., 2021).

Der gesamte ArcelorMittal-Konzern hat sich Ende des Jahres 2020 dazu verpflichtet, bis 2050 klimaneutral zu werden. Dazu werden in Deutschland (unter anderem auch in Bremen) mit der Initiative Steel4Future an den Produktionsstandorten innovative Projekte gefördert, um Stahl in Zukunft klimaneutral herzustellen. Am Standort Bremen ist geplant, zunächst durch das Einspeisen von Erdgas und später von Wasserstoff in den Hochöfen, die CO₂-Emissionen zu reduzieren. Zur klimaneutralen Wasserstoffproduktion soll ein Elektrolyseur beitragen, der zuerst 2023 als 12 MW Prototyp und bis auf 300 MW ausgebaut werden soll (Lagner, 2020).

In Norddeutschland ist das Ziel, bis zum Jahr 2035 eine grüne Wasserstoffwirtschaft etabliert zu haben und eine nahezu vollständige Versorgung der relevanten Abnehmer zu gewährleisten. Der erste Schritt ist bis zum Jahr 2025 eine Installation von mindestens 500 MW und 5 Jahre später mindestens 5 GW Elektrolyseleistung (Wirtschafts- und Verkehrsministerien der norddeutschen Küstenländer, 2019).

Die gesamte im Norden eingebettete Nordwestregion hat sehr gute Voraussetzungen bezüglich der Infrastruktur und dem Personal bezogen auf Wasserstoffkonzepte. Die spezifischen Ziele sind es, bis 2030 Elektrolyseurkapazität von 2 GW zu ermöglichen (Metropolregion Bremen-Oldenburg im Nordwesten e.V., 2021).

Auch in Bremen und Bremerhaven wird grüner Wasserstoff als ein zentraler Baustein der Energiewende für den Standort angesehen und eröffnet der Wirtschaft im Land Bremen vielfältige Möglichkeiten und Geschäftsfelder, um nachhaltige, zukunftsorientierte Arbeitsplätze durch eine Wasserstoffwirtschaft zu sichern und zu schaffen (Senatorin für Wirtschaft, Arbeit und Europa et al., 2021).

9.3 Wasserversorgung in Bremen

Wie im Abschnitt 8.1 dargestellt, wird für die Energieversorgung sowohl Grundwasser als auch Flusswasser benötigt, je nach Anwendungsort, wodurch beide Themenbereiche im Folgenden behandelt und in die Rahmenbedingungen eingeordnet werden.

9.3.1 Klimatische Rahmenbedingungen

Die kreisfreie Stadt Bremen liegt in der Zone des gemäßigten Klimas und hat eine durchschnittliche Jahresmitteltemperatur von 9,1 °C. Zwischen Sommer- und Wintermonaten gibt es große Temperaturunterschiede: geringste monatliche Durchschnittstemperatur im Januar mit 1,5 °C und die höchste im Juli bei 17,3 °C. Bezogen auf die durchschnittliche Jahresniederschlagssumme in der gleichen Zeitperiode wird ein Wert von 708,9 mm angegeben, mit den geringsten Niederschlägen im Februar mit einer monatlichen Niederschlagsmenge von durchschnittlich 39,0 mm und den höchsten Werten im Juni mit durchschnittlich 76,5 mm. Die Klimaanalysen ergeben, je nach Klimamodell und -szenario, einen Anstieg der bodennahen Lufttemperatur bis zum Ende des 21. Jahrhunderts um 0,2 °C bis 4,9 °C, bezogen auf den Referenzzeitraum zwischen 1971 - 2020. Der Jahresniederschlag wird sich je nach Klimamodell entweder zu einer Abnahme von 12,5 % oder einer Zunahme von 30,4 % entwickeln (GERICS, 2020).

In Abbildung 42 sind die Jahresmittel der bodennahen Lufttemperatur und die Jahressumme der Niederschläge in Bremen in den Jahren 1951 - 2015 dargestellt.

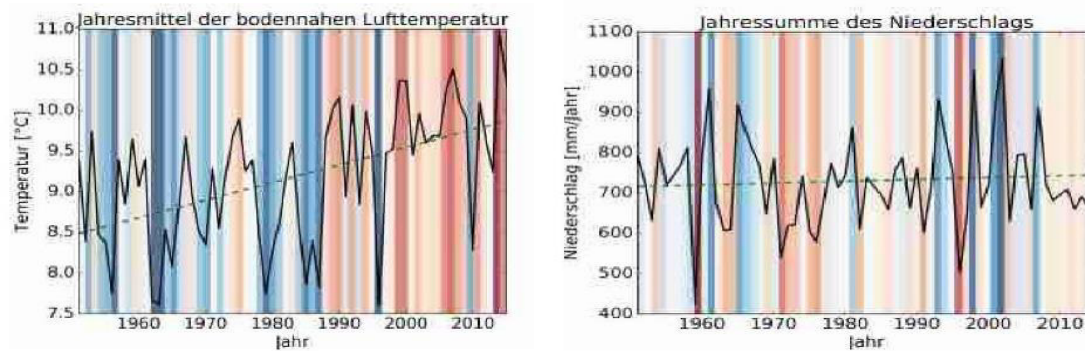


Abbildung 42: Jahresmittel der bodennahen Lufttemperatur und die Jahressumme der Niederschläge in Bremen 1951-2015 (GERICS, 2020).

Im Vergleich der 30-Jahres-Zeiträume zu Beginn und Ende der Beobachtungen, das bedeutet Periode 1951 - 1980 versus dem Zeitfenster 1986 - 2015, ergibt für die Jahresmitteltemperatur eine Zunahme um ca. 0,8 °C. Der durchschnittliche Jahresniederschlag zeigt eine mittlere Zunahme von 30,7 mm, was jedoch nur eine kleine Änderung bedeutet. Die Niederschlagsmengen ändern sich aufgrund der natürlichen Schwankungen jährlich (GERICS, 2020).

Neben den klimatischen natürlichen Bedingungen ist auch die vorherrschende Geologie in Bremen relevant für die nutzbaren Wasserressourcen.

9.3.2 Hydrogeologie Bremens

Die Stadt Bremen ist in den Marschen-Niederungen des Aller-Weser-Urstromtales gelegen. Die zwei vorherrschenden Landschaftseinheiten sind der hohen Geest, auch Bremer Schweiz genannt, angesiedelt im Bremer Norden und das Bremer Becken, welches durch sandige Ablagerungen, Auenlehme und Torfe gekennzeichnet ist. In der Umgebung finden sich Moorgebiete in den Niederungen der ehemaligen Schmelzwasserabflüsse und den Geesthochlagen des heutigen Niedersachsens. Der tiefere Untergrund ist mit sandig gefüllten Rinnenstrukturen durchzogen, die heute ein wichtiges Grundwasserreservoir bilden. Im quartären Eiszeitalter vor rund 2,6 Millionen Jahren wechselten sich Warm- und Kaltzeiten hoch frequentiert ab. Die Kaltzeiten sind unterschiedlich ausgeprägt gewesen und als letzte Kälteperiode wird die Weichsel-Kaltzeit angegeben, die vor ca. 11.500 Jahren endete. Heute befinden wir uns in der Warmzeit, dem Holozän. In der jüngsten Kaltzeit drang das Inlandeis aus nordöstlicher Richtung vor, erreichte jedoch nicht das Wesergebiet. Die Schmelzwasser vielerorts sorgten für eine Überprägung der Saaleablagerungen im Bereich des Bremer Beckens. In den Flussniederungen wurden durch dieses Schmelzwasser Sedimente abgelagert, die man auch als Wesersande bezeichnet. Die Ströme des Schmelzwassers haben ein starkes Erosionsvermögen und es entstanden Kliffkanten am Lesum Kliff, welches die Geestrücken in Bremen Nord von den Marschablagerungen des Bremer Beckens abtrennt. Besonders markant neben dem sonst flachen Umland sind die Geestrücken der Bremer Schweiz. Das im Holozän beginnende Abtauen sorgte für

einen Anstieg des Meeres- und lokalen Grundwasserspiegels, wodurch neue Flussniederungen und Küsten entstehen konnten. Als Folge bildeten sich Moore und Marsche, in denen sich Auenlehme ablagerten. Das geringe Vegetationsvorkommen sorgte für Verwehungen von Flusssanden der Weser und die Bremer Düne mit 5- 15 m entstand. Heute liegen dort bspw. die Altstadt und der Stadtteil Walle (GDfB, 2022a).

Bremen ist in dem hydrogeologischen Großraum der Norddeutschen Tiefebene lokalisiert und weiter untergliedert befindet es sich in im Nord- und mitteldeutschen Lockergesteinsgebiet und Nordseemarschen, wie in Abbildung 43 erkennbar.



Abbildung 43: Hydrogeologische Teilgebiete in Bremen und Niedersachsen (Nds. Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz, 2015b).

Der größte Teil Bremens liegt in dem Teilraum Unterweser-Marsch, der durch eine einförmige Oberfläche ohne große Höhenunterschiede zwischen 5 und 6 Metern gekennzeichnet ist. Etwas höher sind nur die Uferwälle am Flusslauf der Weser. Hydrogeologisch findet man vorrangig mehrstöckige Lockergesteinsaquifer, also Porengrundwasserleiter. Die Marschsedimente haben nur eine geringe Durchlässigkeit vorzuweisen. Durch schmale Flurabständen und künstliche Entwässerung ist die Grundwasserneubildung in den Gebieten gering und liegt unter 100 mm/a. Der zweite Teil Bremens ist die Hamme-Moorniederung, die ebenfalls durch das Lockergesteinsaquifer und damit durch

Porengrundwasserleiter charakterisiert ist. Es gibt geringe Flurabstände, wodurch das Grundwasser nicht gegen Verunreinigung geschützt ist. Im Teilraumgebiet Hamme-Moorniederung werden aufgrund geringer Eignung keine größere Grundwasserentnahmen durchgeführt (Elbracht et al., 2017).

In Abbildung 44 sind die Grundwasservorkommen nach Grundwasserleitern eingeteilt.

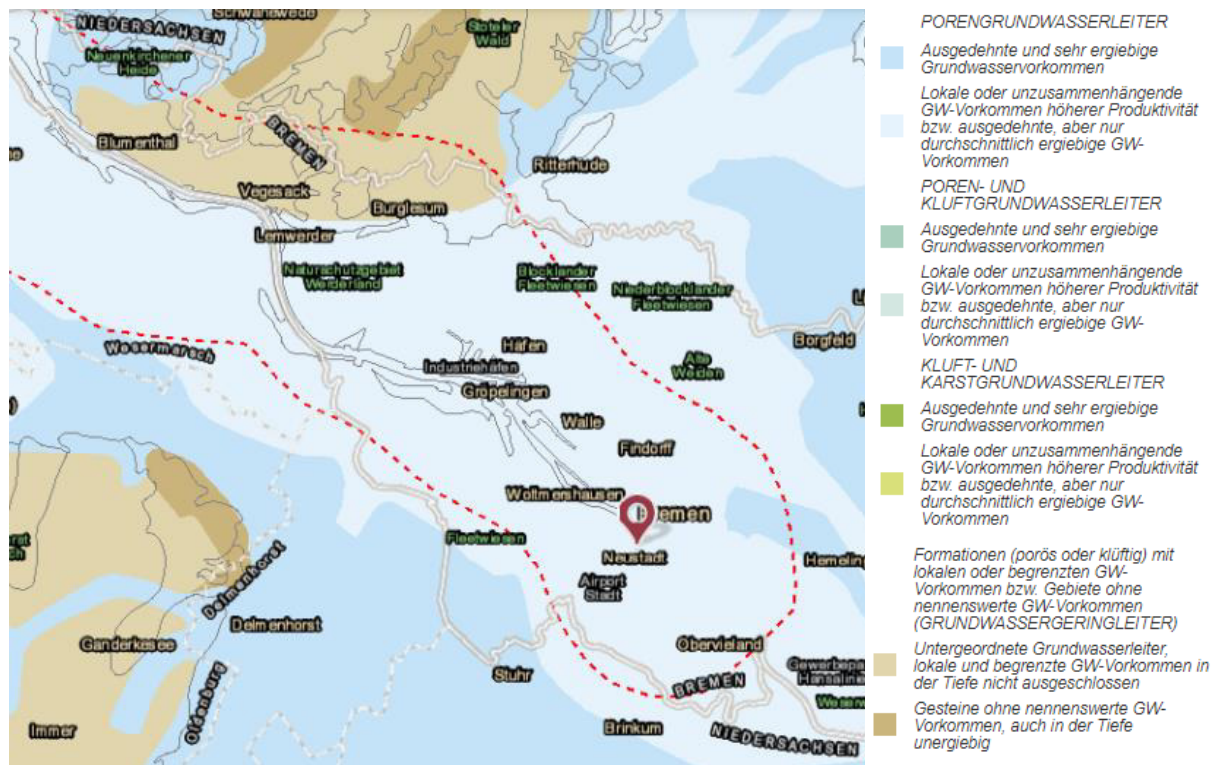


Abbildung 44: Grundwasservorkommen nach Ausdehnung und Produktivität (BGR, o.D.b).

Den größten Teil Bremens, wie der Abbildung zu entnehmen ist, machen die Porengrundwasserleiter aus, spezifiziert lokale oder unzusammenhängende Grundwasservorkommen höherer Produktivität, bzw. ausgedehnte, aber nur durchschnittlich ergiebige Grundwasservorkommen. Kleine Bereiche im Norden Bremens sind gekennzeichnet von untergeordneten Grundwasserleitern mit lokalen und begrenzten Grundwasservorkommen, die in der Tiefe liegen können. Im Umkreis von Bremen, das heißt, in Niedersachsen, sind ergiebige Grundwasservorkommen erkennbar. Die rot gestrichelte Linie zeigt die Versalzungszone des oberflächennahen Grundwassers im Binnenland an.

Im Folgenden wird das Vorkommen und die Qualität des Grundwassers in Bremen genauer betrachtet.

9.3.3 Grundwasservorkommen

Eine wichtige Wasserressource in Bremen ist das Grundwasser. Die Berechnungen der Volumina an Grundwasservorkommen werden über eingeteilte GWK vorgenommen (Nds. Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz, 2016a) . Der Grundwasserstand in Bremen im Jahr 2011 ist als gut

eingeoronet (GDfB, 2022b). Der Grundwasserstand in Bremen im Herbst 2011 ist der Abbildung 45 zu entnehmen.

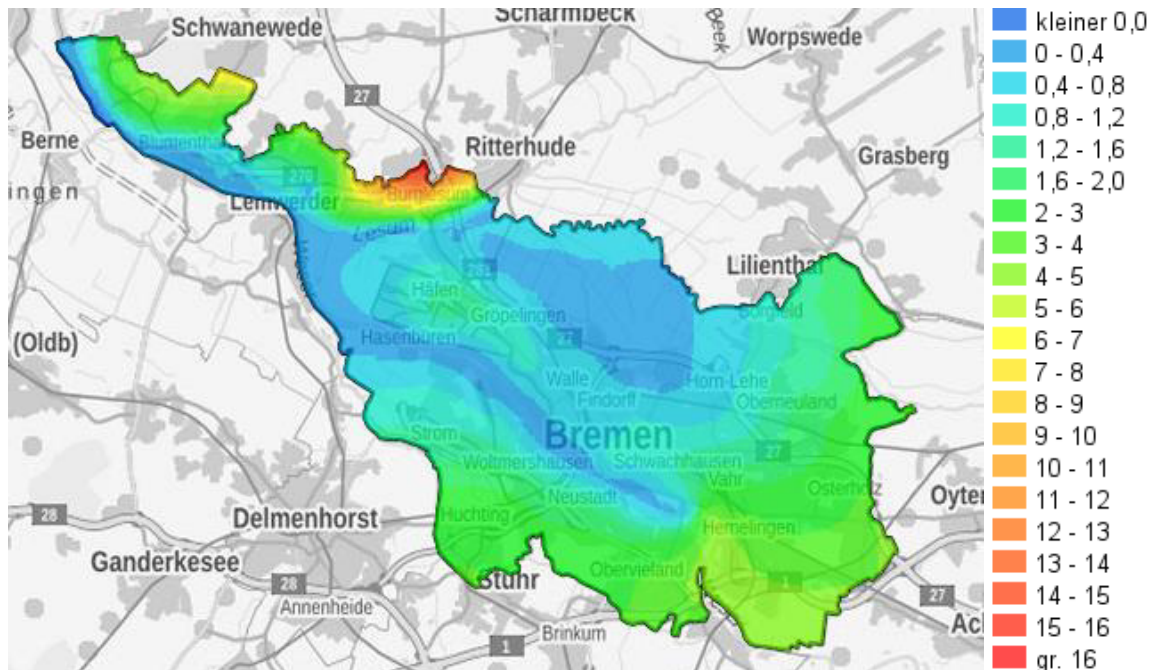


Abbildung 45: Grundwasserstand Bremen Herbst 2011 (mNN) (GDfB, 2020).

Der natürliche Wasserspiegel des Grundwassers lag im Jahr 2011 in Bremen vorrangig zwischen 0 und 5 mNN, was tendenziell einen sehr niedrigen Grundwasserspiegel darstellt.

In Deutschland zeigt die Trendanalyse, die seit 1971 durchgeführt wurde, dass die Überschreitung des mittleren höchsten Grundwasserstands einer zyklischen Entwicklung folgt, wohingegen die Unterschreitung des mittleren niedrigsten Grundwasserstands einem steigenden Trend hin zu einer größeren Anzahl von Monaten mit Unterschreitungen folgt. Das bedeutet, Dürreereignisse häufen sich, beziehungsweise Grundwasserstände sinken tendenziell (UBA, 2019e).

Die Grundwasserneubildung in Bremen ist nicht einheitlich, aber befindet sich in einem Rahmen zwischen 50 und 250 mm/a, was im unteren Bereich liegt (SKUMS, 2013; Nds. Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz, 2016b). Die Ergiebigkeit in Bremen und Niedersachsen ist eingeteilt nach Klassen in Abbildung 46 einsehbar. Von den Flächenanteilen ist in den beiden Bundesländern erkennbar, dass vorrangig als ergiebig eingeschätzte Grundwasservorkommen existieren, aber auch 1/3 weniger ergiebig bis keine Grundwasservorkommen aufweisen.

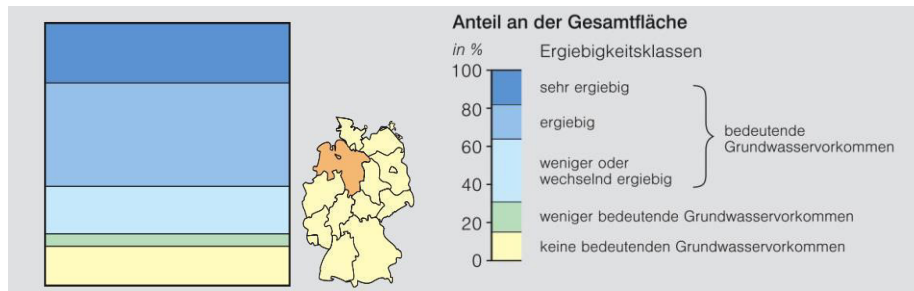


Abbildung 46: Ergiebigkeitsklassen von Grundwasservorkommen in Bremen und Niedersachsen (Vierhuff, o.D.).

Die Zusammenfassung von Bremen und Niedersachsen verfälscht die Aussage für Bremen, da zum einen Bremerhaven mit einbezogen wird und Niedersachsen ein höheres Grundwasservorkommen aufweist, wodurch die Abgrenzung nicht eindeutig zu ziehen ist.

Bremen weist vorrangig gute, aber auch sehr gute Entnahmebedingungen der grundwasserführenden Gesteine auf, wie in Abbildung 47 erkennbar ist.



Abbildung 47: Entnahmebedingungen in den Grundwasserführenden Gesteinen Niedersachsens und Bremens (Nds. Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz, 2016b).

Sehr gute Entnahmebedingungen sind ein Indikator für große und Grundwasser leitende Schichtpakete und damit sandige Grundwasserleiter. Das Merkmal dieser Gebiete ist eine gute Grundwasserneubildung, wodurch sehr große Wassermengen bei geringer Absenkung entnommen werden können und das auch längerfristig. Die sehr guten Entnahmebedingungen werden dem Kriterium der Durchlässigkeit zugeordnet, wobei Transmissivitäten von über $100 \text{ m}^2/\text{h}$ in diese Kategorie fallen. Gute Entnahmebedingungen sind charakterisiert durch einen Zahlenwert zwischen

20 und 100 m²/h. In dem Fall ist die Entnahme größerer Grundwassermengen möglich, wenn ein ausreichendes Wasservolumen vorhanden ist. Derartige Verhältnisse sind für Lockergesteine in Norddeutschland zu finden (LBEG, 2015).

Eine weitere Ursache für gute Entnahmebedingungen kann die Bodenfeuchtigkeit sein. In Abbildung 48 ist das Bodenfeuchteprofil unter Gras in Bremen dargestellt, genauer beschrieben Bodenfeuchte, in Prozent nutzbarer Feldkapazität (Einheitszeichen % nFK) für die Zeitperiode 11.06.2022 bis 11.07.2022.

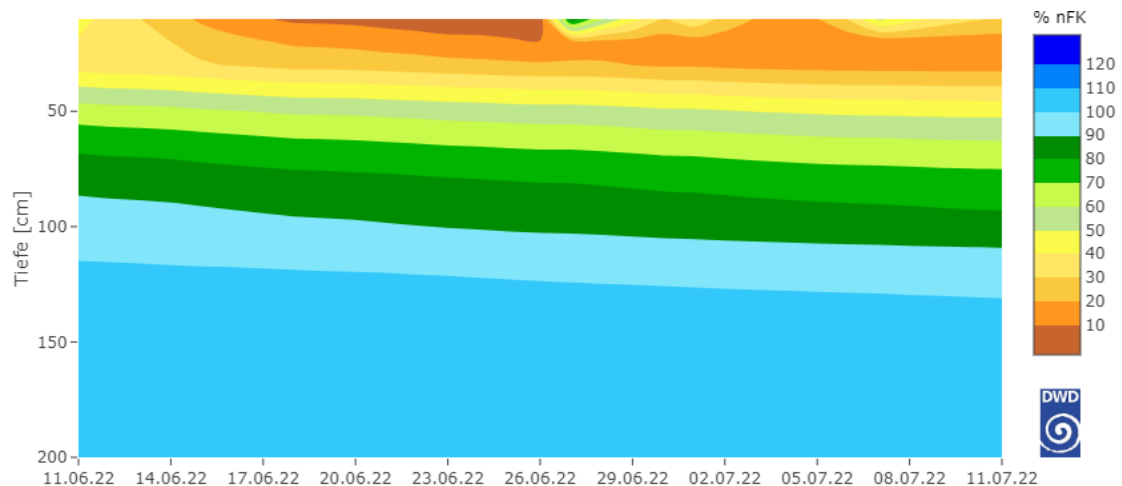


Abbildung 48: Bodenfeuchteprofil in Bremen unter Gras (DWD, 2022b).

Die nutzbare Feldkapazität kennzeichnet die Menge des im Boden vorhandenen Wassers, auf den die Pflanzen zurückgreifen können. Wasserstress ist gekennzeichnet durch einen Wert kleiner 50 % nFK und Werte über 100 % nFK. Dies bedeutet, dass die Böden übersättigt sind (DWD, 2022a).

Es ist erkennbar, dass ab einer Tiefe von ungefähr 50 cm sich ein Wasserstress abzeichnet, wobei tiefere Schichten eine gute nutzbare Feldkapazität zwischen 50 und 100 % aufzeigen. Kann der Boden nicht genügend pflanzenverfügbares Wasser nachliefern, erleidet die Pflanze Wasserstress und drosselt die CO₂-Aufnahme und mehr Emissionen werden in die Atmosphäre gelassen (Gerten, 2021).

Neben der Menge an Grundwasservolumina ist ebenso die Grundwassergüte entscheidend für die Nutzungsmöglichkeiten der Wasservorkommen. Besonders die Charakteristika des Grundwasserleiters ist relevant für des in ihm strömenden Grundwassers und wird auch als geogener Hintergrundwert bezeichnet (Nds. Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz, 2015a).

In Abbildung 49 ist die Versalzung des Grundwassers in Bremen grafisch aufgezeigt.

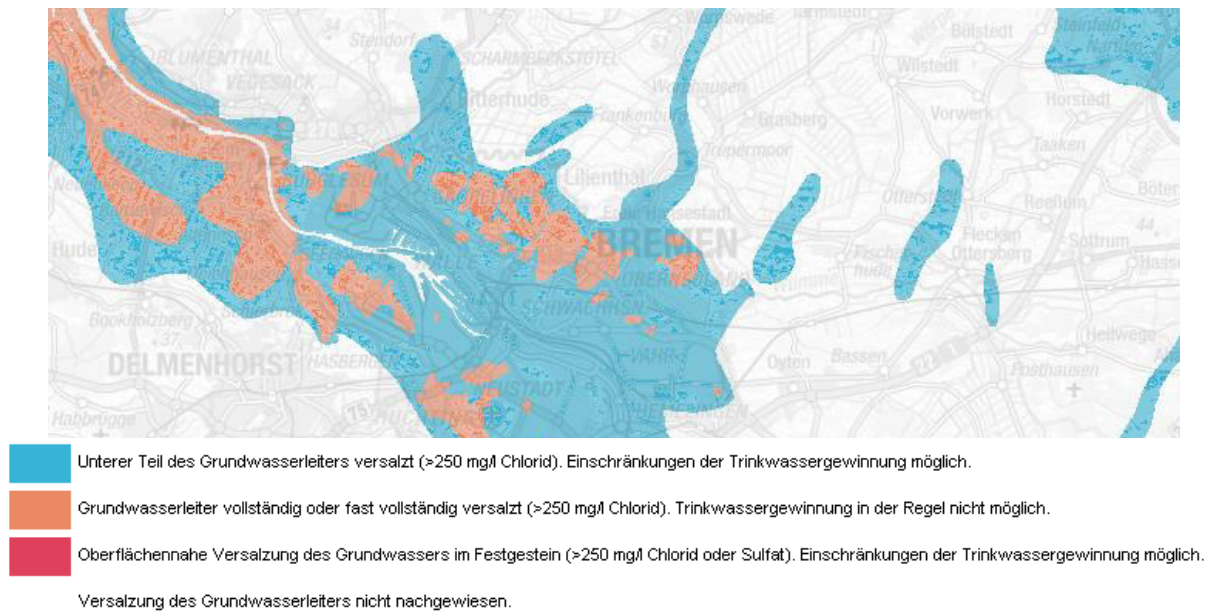


Abbildung 49: Versalzung des Bremer Grundwassers (LBEG, o.D.).

Verschlechterungen der Grundwasserqualität durch Versalzung haben die Ursache im Eindringen von Salzwasser aus der Weser in angrenzende Grundwasserleiter und durch Ablaugung der bis in die Nähe der Erdoberfläche aufgestiegenen Salzstöcke, in denen es in einigen Bereichen Bremens zu hohen Salzgehalten im Grundwasser kommt, wie bspw. im Gebiet des Lesumer Salzstocks unterhalb von Lilienthal (GDfB, 2022b). Die Beschaffenheit des Bremer Grundwassers wird folglich teilweise durch hohe Salzkonzentrationen geprägt, die im unteren Teil des Grundwassers, aber auch oberflächennah, auftreten können. Vereinzelt ist das Grundwasser auch vollständig oder fast vollständig versalzen. Das bedeutet, es sind über 250 mg/l an Chlorid vorzufinden (SKUMS, 2013; Nds. Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz, 2015a).

Neben der Versalzung sind für die qualitative Bewertung des Grundwassers jedoch noch weitere Inhaltsstoffe entscheidend. Die Bewertung des chemischen Zustandes der GWK in Bremen sind in Abbildung 50 einsehbar und umfasst neben dem Salz- auch den Schadstoffgehalt als Kriterium.

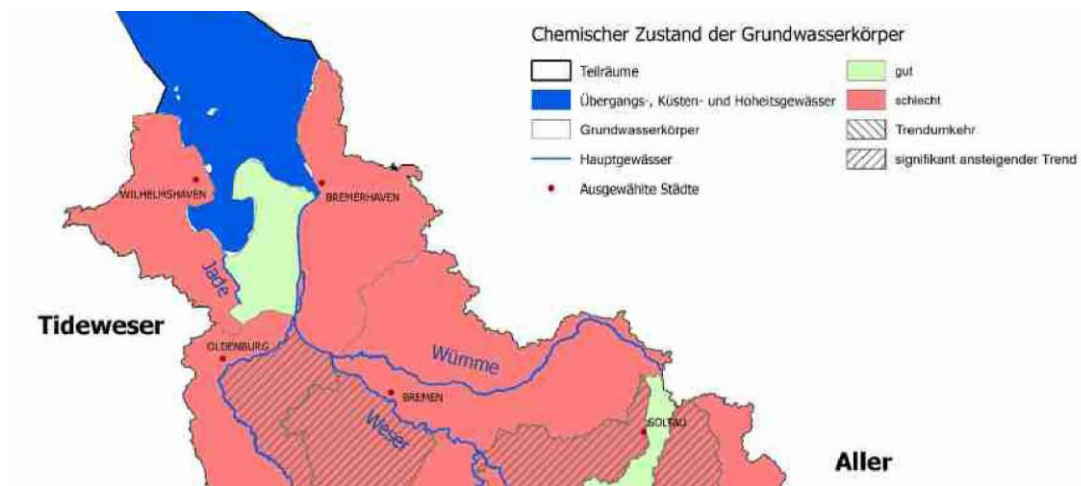


Abbildung 50: Chemischer Zustand der Grundwasserkörper (FGG Weser et al., 2021).

Der chemische Zustand des Bremer Grundwassers kann also zusätzlich auf Basis der Schadstoffwerte von Nitrat und Pestiziden bewertet werden. In Bremen wurden im Zeitabschnitt von 2006 bis 2011 über 100 Messstellen auf Nitratbelastungen untersucht. Der Mittelwert ist mit 11,9 mg/l an Nitrat festgesetzt, wobei 50 % der Messstellen einen Wert von 0,2 mg/l aufgezeigt haben. Der höchste Messwert wurde mit 181 mg/l angegeben und über der Schwelle von 50 mg/l lagen 42 von den insgesamt 636 Messwerten, was ungefähr 6,6 % entspricht. Es waren 10 Messstellen vom erhöhten Nitrat-Vorkommen betroffen (8,4 %). Die Pestizidbelastung geht in Deutschland, aber auch in Bremen, zurück, was vorrangig durch den Rückgang länger nicht mehr zugelassener Stoffe begründet werden kann. In der Auswertung der Befunde seit 1986 in Bremen zeigt sich, dass ca. 2 % aller 34.000 Messungen Pflanzenschutzmittel-Befunde Werte über der Bestimmungsgrenze aufweisen, wovon insgesamt 124 Werte (0,4 %) über dem Grenzwert für Pflanzenschutzmittel bzw. Pestiziden lagen (SKUMS, 2013).

9.3.4 Trinkwasserversorgung in Bremen

Die kommunale Trinkwasserversorgung wurde in Bremen anfangs durch das Wasserwerk (WW) auf dem Werder übernommen, welches unter dem Namen „umgedrehte Kommode“ ein denkmalgeschütztes Stadtwahrzeichen darstellt. In Bremen wird das gesamte Trinkwasser aus Grundwasser bereitgestellt, jedoch ist das Bezugsgebiet größer als die Landesgrenze. Bremen hat eine kleine Fläche als Bundesland, wodurch ein Bezug des Trinkwassers aus dem umliegenden Niedersachsen erforderlich ist (Langer & Koch, 2018; Gesundheitsamt Bremen, 2022).

In Bremen stammt das Trinkwasser aus Wasserschutzgebieten und wie bereits erläutert, handelt es sich um eine bremisch-niedersächsische Koproduktion. Dabei werden über 80% aus niedersächsischen Grundwasserwerken und die restlichen Mengen aus Tiefbrunnen im Wasserschutzgebiet Blumenthal in Bremen-Nord gewonnen (Wasserforum Bremen, 2022).

Die Stadt Bremen benötigt 41 Mio. m³ an Trinkwasser jährlich (BUND Bremen, 2022). Der Bedarf der Stadt Bremen wird mit 15 bis 17 % durch die Wassergewinnungsgebieten Blumenthal und Vegesack in Bremen-Nord in Kombination mit dem WW Blumenthal gedeckt. Somit sind über 80 % des Bedarfs durch Wasserlieferungen aus dem niedersächsischen Umland aufzufüllen (Langer & Koch, 2018; swb AG & Landesinstitut für Schule Bremen, 2018).

Von den zugekauften niedersächsischen Trinkwassermengen sind im Jahr 2016 rund 14 Mio. m³ von den Harzwasserwerken (HWW), was einen Anteil von ca. 45 % des Wasserbedarfs Bremen-Stadt ausmacht. Der zweitgrößte Anteil mit 30 % und 9,7 Mio. m³ Wasser wird vom Trinkwasserverband Verden (TVV) bezogen und mit 3 Mio. m³ und einem Anteil von ca. 10 % der Rest vom Oldenburg-Ostfriesischen Wasserverband (OOWV). Das WW Blumenthal förderte ca. 5,4 Mio. m³ und damit ungefähr 15 % des Trinkwasserbedarfes in Bremen (Langer & Koch, 2018; Faltermann, 2021).

Laut Hamann und B. Christmann lieferte der TVV im Jahr 2021 zwischen 7 und 8 Mio. m³ Trinkwasser und nach Aussage der Pressestelle OOWV wurde im gleichen Jahr eine Menge von 4 Mio. m³ geliefert. Dies zeigt eine leichte prozentuale Verschiebung auf, wobei die Gesamtmenge nahezu nicht verändert ist und als identisch für das Jahr 2021 angenommen werden kann.

Die Bezugsquellen für das Bremer Trinkwasser sind in Abbildung 51 dargestellt. Die HWW beziehen das Grundwasser aus den Wassergebieten in Ristedt und Hildesheim. TV Verden hingegen ist mit den Wasserschutzgebieten in Wittkoppenberg und Panzenberg verknüpft. Und der OOWV hat als Quelle Wildeshausen.

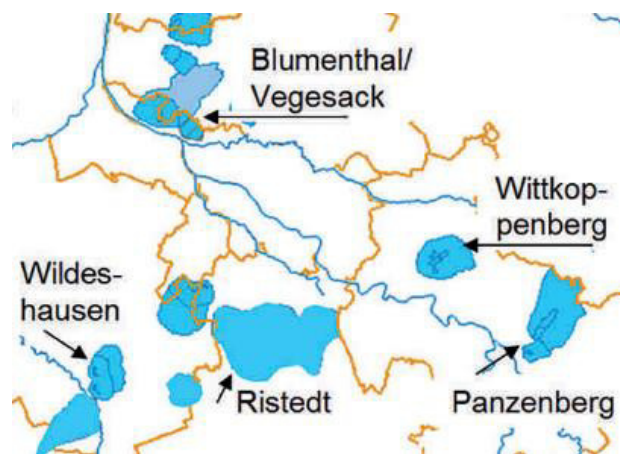


Abbildung 51: Bezugsquellen für das Trinkwasser Bremens in Niedersachsen (SKUMS, 2013).

Trinkwasser aus der heimischen Förderung kommt aus dem WW Blumenthal. Darunter wird auch das Wasser erfasst, welches in Bremen-Vegesack gewonnen wird (Serena Bilanceri, 2020). Die swb betreiben in Bremen-Blumenthal ein WW, das aus 12 Tiefbrunnen Grundwasser fördert, welches aufbereitet werden muss (wesernetz Bremen GmbH, 2022). Seit 1996 werden jährlich 1 Mio. m³ Wasser gefördert, über eine Rohrleitung nach Blumenthal transportiert und im dortigen WW zu Trinkwasser aufbereitet (swb Vertrieb Bremen GmbH, 2022).

Die zweite wichtige Wasserart sind die oberflächennahen Wasserquellen. Die Eigenschaften in Bremen werden in dem folgenden Abschnitt untersucht und dargestellt.

9.3.5 Oberflächennahes Wasser

Betrachtet man das Vorkommen des oberflächennahen Wassers, bzw. des Weserwassers, so ist der Wasserstand ein Kriterium für die Menge an Wasser. In Abbildung 52 ist der Wasserstand der Weser im Ort Intschede (südlich von Bremen in Niedersachsen) aufgezeigt.

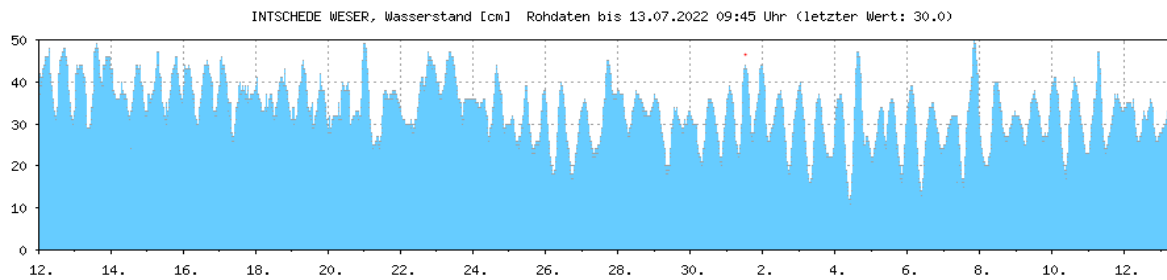


Abbildung 52: Wasserstand der Weser/ Intschede [cm], Stand 13.07.2022 9:45 Uhr (Bundesanstalt für Gewässerkunde, 2022).

Das Mittel der letzten 10 Jahre liegt bei 132 cm und es ist auffällig, dass über den gesamt dargestellten Monat dieser Wert nicht erreicht wird und maximal die Hälfte des Pegelstandes zu erkennen ist (WetterOnline Meteorologische Dienstleistungen GmbH, 2022).

Wie bereits in Abschnitt 7.2 erklärt, ist der Hauptindikator der mittlere Abfluss für die Wasserverfügbarkeit der oberflächennahen Gewässer. In Tabelle 13 sind für die Messstelle Intschede Abflusswerte der letzten 60 Jahre aufgelistet.

Tabelle 13: Abflusswerte der Mittelweser am Messpunkt Intschede 19941-2020 nach (FGG Weser et al., 2021).

Gewässer und Messstelle	Messstelle Intschede
Einzugsgebiet [km ²]	37.718
Niedrigster bekannter Abfluss [m ³ /s]	59,7
Mittlerer Niedrigwasserabfluss [m ³ /s]	121
Mittlerer Abfluss [m ³ /s]	315
Mittlerer Hochwasserabfluss [m ³ /s]	1.208
Höchster bekannter Abfluss [m ³ /s]	3.500
Zeitraum der Hauptwerte [m ³ /s]	1941 - 2020

Der mittlere Abfluss ist eine Zahl, die den Wasserhaushalt von Fließgewässern beschreibt und den langjährigen durchschnittlichen Abfluss angibt, im Falle von Bremen für die Weser. Darauf basierend ist die Wasserbilanz, also das Gleichgewicht zwischen den hydrologischen Komponenten Niederschlag, Verdunstung und Abfluss. Bei steigender Lufttemperatur nimmt ebenso die Verdunstungsrate zu und weniger Wasser verbleibt für Grundwasser und Abfluss an der Oberfläche. Hingegen erfolgt eine Intensivierung des Wasserkreislaufes, wenn höhere Temperaturen die Verdunstung steigern und damit einen größeren Wassergehalt in der Atmosphäre besteht. Folgen sind heftigere Regenfällen und höhere Abflüssen (Arbeitskreis KLIWA, 2022).

Der Parameter der mittleren Abflusshöhe für die Messstelle wird berechnet durch folgende Gleichung (UBA, 2019a):

$$Abflusshöhe Ah [mm] = \frac{\text{mittlerer Abfluss} \left[\frac{m^3}{s} \right]}{\text{oberirdisches Einzugsgebiet} [km^2]} * 86,4 [s] * \frac{365}{2} [Tage] \quad (1)$$

Das bedeutet nach Gleichung (1) für die Messstelle in Intschede nach Tabelle 13 folglich:

$$Abflusshöhe\ Ah_{Intschede} = \frac{315 \frac{m^3}{s}}{37.718\ km^2} * 86,4\ s * \frac{365}{2} = 131,69\ mm \quad (2)$$

Das Ergebnis ist eine Abflusshöhe von 131,69 mm. Diese Zahl muss in Bezug auf die Entwicklungen der Abflusshöhen der letzten Jahrzehnte in Deutschland gesetzt werden. In Abbildung 53 sind die Abflusshöhen in Deutschland im hydrologischen Winterhalbjahr und Sommerhalbjahr aufgezeigt.

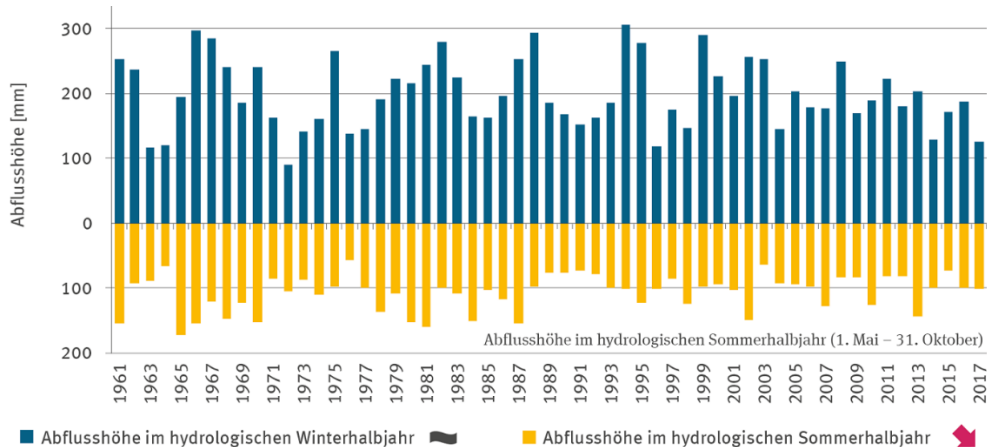


Abbildung 53: Abflusshöhe Deutschland 1961-2017 (UBA, 2019f).

Es ist erkennbar, dass der mittlere Abfluss seit 1961 tendenziell sinkt, dies aber als nicht statistisch signifikant eingeordnet wird. Hingegen zeigt der Trend im Sommerhalbjahr ein signifikantes Abnehmen der Abflusshöhe. Die Messstelle Intschede für die Weser bestätigt die sinkenden Werte der Abflusshöhe. Dementsprechend wird auch die Wasserverfügbarkeit der oberflächennahen Gewässer in Bremen bzw. des Flusses Weser weniger. Neben der verfügbaren Wassermenge ist für die Verwendung auch die Güte der oberflächennahen Gewässer entscheidend. Der chemische Zustand der Oberflächenwasserkörper der Weser wird, wie in Abbildung 54 einsehbar, als nicht gut eingeschätzt.

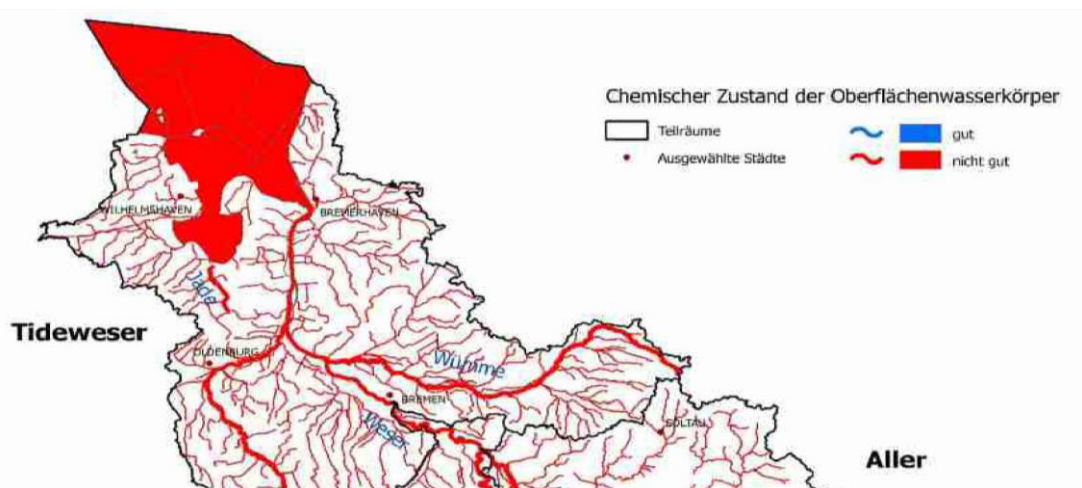


Abbildung 54: Chemischer Zustand der Oberflächenwasserkörper in Bremen und Umgebung (FGG Weser et al., 2021).

Wie auch beim Grundwasser ist unter anderem der Salzgehalt entscheidend für die Qualität des Oberflächengewässers. Als mittlere Konzentration gilt ein Wert von unter 100 mg Chlorid/l. Der Grenzwert für Trinkwasser liegt bei über 400 mg/l und ab einem Wert von über 1000 mg/l ist der Salzgeschmack feststellbar. In der gesamten Weser wurden im Jahr 2020 abflussabhängig rund 3,6 Mio. m³ Salzabwasser detektiert. Da das Trinkwasser aus den Grundwasserquellen bezogen wird, ist der Grenzwert für Trinkwasser nicht relevant (FGG Weser et al., 2020; SKUMS, 2022a).

Insgesamt verfehlen 92% der Oberflächengewässerkörper der gesamten Weser den ökologischen Standard. Als Ursache für den schlechten chemischen Zustand der Weser gelten strukturelle und morphologische Änderung der Fließgewässer (Krippenstapel et al., 2022).

Der Fluss Weser ist ein sommerwarmes Fließgewässer und die gemessenen Wassertemperaturen weisen jahres- und tageszeitliche Unterschiede auf. An der Messstelle in Hemelingen liegt die Temperatur zwischen 0°C und 24°C. Der Trend in den Sommermonaten der Weser geht, betrachtet über die letzten 10 Jahre, hin zu einem Anstieg der durchschnittlichen Temperatur um rund 1,2 °C (Rothstein et al., 2008). Wassertemperaturerhöhungen von Flüssen beeinflussen die chemischen, physikalischen und biologischen Prozesse im Wasser. Ein weiteres Merkmal des Weserwassers ist der nahezu konstante pH- Wert zwischen 7,8 und 8,5. Der konstante Wert entsteht, da unter normalen Bedingungen jedes Fließgewässer ein Puffersystem aufweist und sich der pH-Wert um den Neutralpunkt von 8 ergibt (SKUMS, 2022a).

9.4 Wasserbilanz Bremen

Zusammenfassend für die Wasserverfügbarkeit lässt sich eine Wasserbilanz für Bremen erstellen. Das Bundesland Bremen weist, wie in Abbildung 55 ersichtlich, eine grünliche bis gelbe Verfärbung auf, was eine Wasserbilanz zwischen -100 und 0 mm/v, also je Vegetationsperiode, kennzeichnet. Es ist die Bilanz für das Sommerhalbjahr dargestellt, welches von April bis September definiert ist.

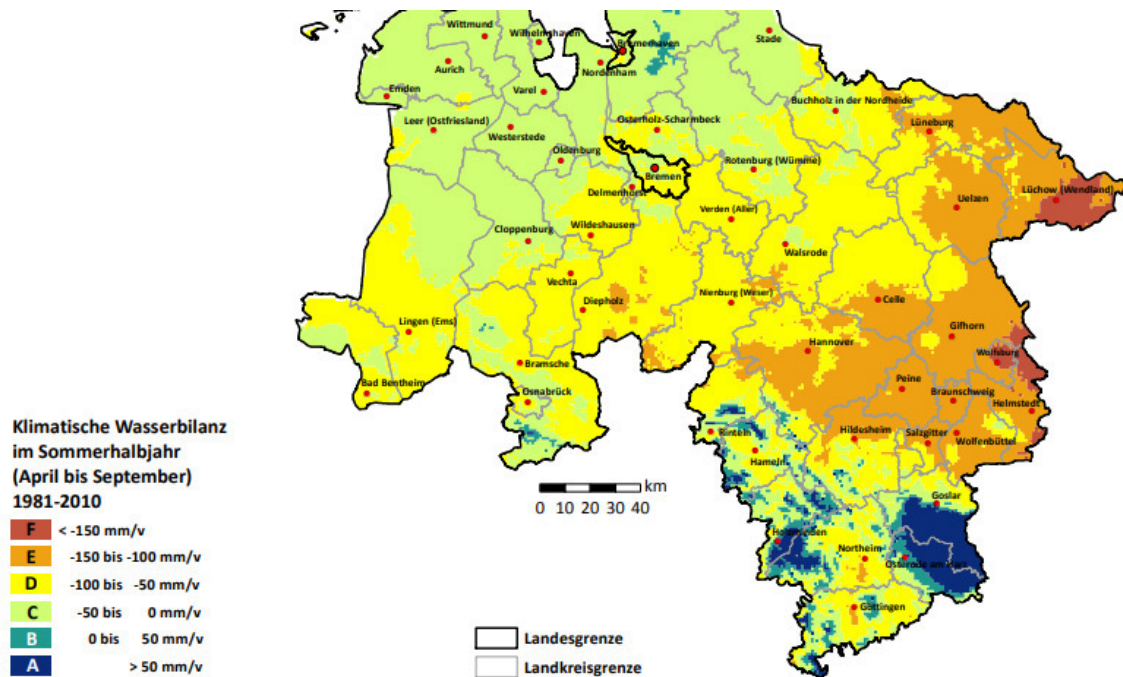


Abbildung 55 Klimatische Wasserbilanz im Sommerhalbjahr für Niedersachsen und Bremen (LBEG, 2017).

Die Stadt Bremen liegt bei der Differenz aus Wassergewinnung und Wassernutzung in einem negativen Bereich, was bedeutet, dass die Nutzung der Gewinnung überwiegt und somit eine Tendenz hin zu einem Wasserstress besteht. Der interne (gebietsbürtige) Abfluss berechnet sich aus der Differenz von Niederschlägen mit 784 l / m^2 und der Verdunstung mit 471 l / m^2 und beträgt in Bremen 313 l / m^2 aus dem Durchschnitt zwischen den Jahren 1961 - 1990. Im Klimawandelszenario, der eine moderate Entwicklung der Erderwärmung zugrunde gelegt wurde, wird für das Jahr 2050 ein Abfluss von 370 l / m^2 berechnet, was einen potenziell positiven Einfluss des Klimawandels für die Stadt Bremen der Jahre 2021 - 2050 aufzeigt. Berechnet man zu dem gebietsbürtigen Abfluss die Zuflüsse in Bremen, so erhält man das natürliche Wasserdargebot von 164.929 l / m^2 im Jahr (Hirschfeld et al., 2016).

Die sogenannte regionale Nutzungsbilanz liegt bei -79 l / m^2 im Jahr 2016, welches die Bilanz aus öffentlicher und nichtöffentlicher Wassergewinnung und den Nutzungen ist. Bremen ist eine Region, in der auf zusätzliches Wasser aus angrenzenden oder auch weit entfernten Gegenden zugegriffen werden muss. In Bremen wird das Wasser als Kühlwasser für KW und Industrie (3555 l / m^2), als Prozesswasser in der Industrie (72 l / m^2), für künstliche Bewässerung ($0,1 \text{ l / m}^2$) und in Haushalten und Kleingewerben (76 l / m^2) genutzt (Hirschfeld et al., 2016).

Im folgenden Abschnitt wird der Zusammenhang zwischen der Energie- und Wasserwirtschaft in Bremen detaillierter, bezogen auf die einzelnen Energiebereitstellungstechnologien, untersucht und die aquatischen Kennzahlen für Bremer KW ermittelt.

9.5 Aquatische Kennzahlen für Bremer Kraftwerke

Im Bundesland Bremen wurden im Jahr 2009 223 km³ Wasser in KW geleitet, gegenüber insgesamt 3561 km³ entnommenem Wasser (SKUMS, 2013). Der VKU gibt für die Mitglieder in Niedersachsen und Bremen eine Energieproduktion von 25.489 Mio. kWh Strom und 5.594 Mio. kWh Wärme an. Die VKU-Mitglieder haben deutschlandweit einen Beitrag von 62 % beziehungsweise 79 % an der Energieproduktion. Für die Wasserversorgung wurden 485 Mio. m³ Wasser gefördert und 268 Mio. m³ Abwasser abgegeben (VKU, 2021).

Für die Wassernutzung der KW ist Wasser besonders als Kühlwasser im Einsatz. In Abbildung 56 sind die Kühlwassermengen der swb-KW erkennbar.

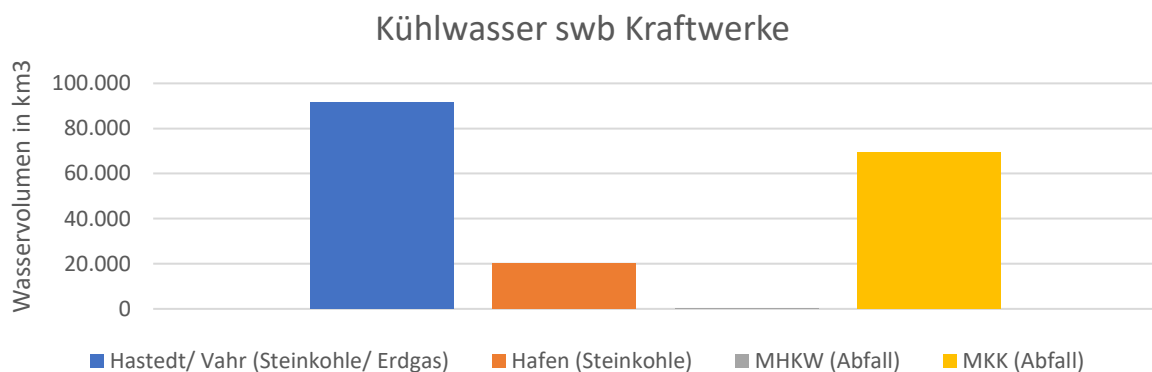


Abbildung 56: Kühlwassermengen Kraftwerke swb Bremen, Stand 2020 nach (swb Erzeugung AG & Co. KG & swb Entsorgung GmbH & Co. KG, 2021).

In Hastedt und Vahr für das Steinkohle-KW, aber auch für das MKK, werden die größten Wassermengen bezogen. Für eine vergleichbare Aussage ist die Wassermenge mit der Energieproduktion, das heißt der Summe aus Strom und Wärme, ins Verhältnis zu setzen und wird wie folgt berechnet:

$$\text{spezifische Wassernutzung} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{MWh}} \right] = \frac{\text{genutzte Wassermenge} [\text{m}^3]}{\text{produzierte Energiemenge} [\text{MWh}]} \quad (3)$$

Diesem Muster folgend, wurden nachfolgende spezifische Kühlwassernutzungen für die vier KW berechnet.

Die KW Hastedt und Vahr werden zusammen betrieben und betreut. Dementsprechend existieren keine separaten Daten. In Hastedt wird Energie auf Basis von Steinkohle erzeugt mit einer Kondensationsmaschine mit Entnahme. Das KW Vahr hingegen verwendet Erdgas und nutzt einen Fernwärmekessel (Bundesnetzagentur, 2022b). Die Kühlungsarten sind nicht angegeben. Aus den Umweltberichten der swb Erzeugung AG & Co. KG und swb Entsorgung GmbH & Co. KG ist ersichtlich, dass das Verhältnis von der Energieproduktion aus Steinkohle und Erdgas ungefähr $\frac{3}{4}$ zu $\frac{1}{4}$ entspricht,

wodurch jedoch keine Aussage über den Wasserverbrauch getroffen werden kann. Basierend auf den Ausarbeitungen von Terrapon-Pfaff et al. wird angenommen, dass die spezifischen Wassernutzungen annähernd als identisch anzusehen sind, die in der nachfolgenden Gleichung berechnet sind:

$$\text{spezifische Wassernutzung}_{\text{HastedtVahr}} = \frac{91.468.553 \text{ m}^3}{1.158.208 \text{ MWh}} = 78,97 \frac{\text{m}^3}{\text{MWh}} \quad (4)$$

Das HKW Hafen basiert auf dem Energieträger Steinkohle. Die Kühlungsart ist nicht spezifiziert und der Wassernutzen beträgt auf Basis der Umweltberichte (swb Erzeugung AG & Co. KG & swb Entsorgung GmbH & Co. KG, 2021):

$$\text{spezifische Wassernutzung}_{\text{Hafen}} = \frac{20.325.242 \text{ m}^3}{149.947 \text{ MWh}} = 135,55 \frac{\text{m}^3}{\text{MWh}} \quad (5)$$

Das MKK verwertet Abfall und läuft über eine Gegendruckmaschine mit Entnahme (Bundesnetzagentur, 2022b). Der biogene Anteil des Mülls liegt bei 50,04 % Biomasse, da jedoch keine detaillierten Daten für die spezifischen Energieproduktion und Wassernutzung in den öffentlich verfügbaren Angaben über das MKK (swb Entsorgung GmbH & Co. KG, o.D.) erkennbar sind, muss durch eine Gesamtbetrachtung der spezifische Wassernutzen des KW für alle Abfälle angenommen werden.

$$\text{spezifische Wassernutzung}_{\text{MKK}} = \frac{69.556.848 \text{ m}^3}{739.918 \text{ MWh}} = 94,00 \frac{\text{m}^3}{\text{MWh}} \quad (6)$$

Das MHKW besitzt zwei Gegendruckmaschinen ohne Entnahme und Kondensationsmaschine mit Entnahme (Bundesnetzagentur, 2022b) und verwertet zu 50,10 % Biomasse bzw. biogener Abfall neben thermischer Verwertung von Reststoffen. Es existieren keine detaillierten Daten für die spezifische Energieproduktion und Wassernutzung (swb Entsorgung GmbH & Co. KG, o.D.), wodurch eine Gesamtbetrachtung der spezifische Wassernutzen des KW für alle Abfälle angenommen wird.

$$\text{spezifische Wassernutzung}_{\text{MHKW}} = \frac{156.146 \text{ m}^3}{436.656 \text{ MWh}} = 0,36 \frac{\text{m}^3}{\text{MWh}} \quad (7)$$

Neben der Wassernutzung ist teilweise auch der Wasserverbrauch, der auf Basis von Trinkwasser erfolgt und vorrangig für Betriebsmittel und sanitäre Anlagen in den KW genutzt wird, relevant. In Abbildung 57 sind die verbrauchten Trinkwassermengen dargestellt.

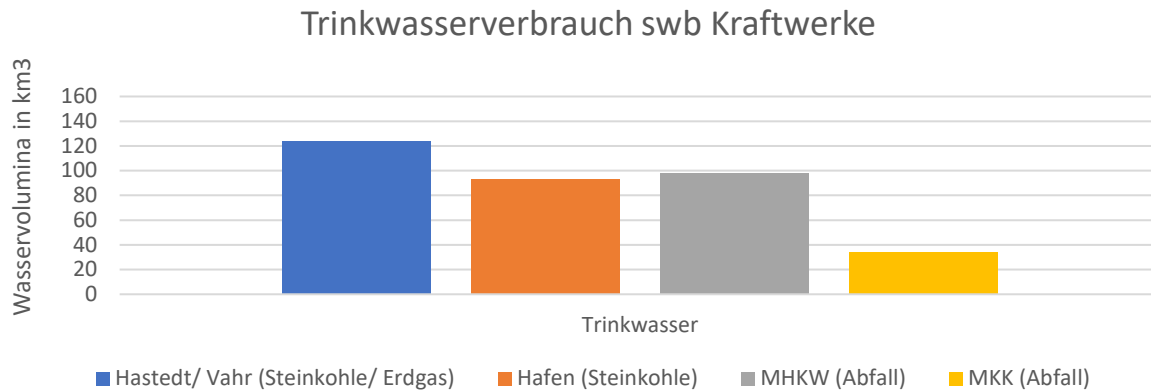


Abbildung 57: Trinkwasserverbrauch Kraftwerke swb Bremen, Stand 2020 nach (swb Erzeugung AG & Co. KG & swb Entsorgung GmbH & Co. KG, 2021).

Die Trinkwasserverbräuche für die KW Hastedt/ Vahr, HKW Hafen und das MHKW sind mengenmäßig nahezu gleichwertig und das MKK zeigt deutlich geringere Verbrauchswerte auf. Wie bei dem Kühlwasserbedarf ist erneut ein Verhältnis zu der produzierten Energiemenge notwendig, um vergleichbare Werte zu erhalten.

Unter den identischen Bedingungen wie für die Wassernutzungsberechnung sind die Wasserverbräuche der vier KW im Folgenden dargestellt (swb Erzeugung AG & Co. KG & swb Entsorgung GmbH & Co. KG, 2021):

$$\text{spezifischer Wasserverbrauch}_{\text{Hastedt/Vahr}} = \frac{123.710 \text{ m}^3}{1.158.208 \text{ MWh}} = 0,11 \frac{\text{m}^3}{\text{MWh}} \quad (8)$$

$$\text{spezifischer Wasserverbrauch}_{\text{Hafen}} = \frac{92.888 \text{ m}^3}{149.947 \text{ MWh}} = 0,62 \frac{\text{m}^3}{\text{MWh}} \quad (9)$$

$$\text{spezifischer Wasserverbrauch}_{\text{MKK}} = \frac{34.290 \text{ m}^3}{739.918 \text{ MWh}} = 0,05 \frac{\text{m}^3}{\text{MWh}} \quad (10)$$

$$\text{spezifischer Wasserverbrauch}_{\text{MHKW}} = \frac{97.570 \text{ m}^3}{436.656 \text{ MWh}} = 0,22 \frac{\text{m}^3}{\text{MWh}} \quad (11)$$

Insgesamt gibt der swb Konzern an, im Jahr 2020, eine Trinkwassermenge von 347.000 m³ verwendet zu haben und rund 182 Mio. m³ Durchsatz an Kühlwasser aufzuweisen. Des Weiteren wurde Prozesswasser mit einem Volumen von rund 153.000 m³ benötigt. Aufgesplittet nach Konzernabteilungen wird für die swb Entsorgung 0,18 m³/MWh Trinkwasser und für Kühlwasser 94 m³/MWh aufgelistet. Bei der swb Erzeugung wird 0,11 m³/MWh im Trinkwasserbereich, 0,08 m³/MWh an Prozesswasser und ein Durchsatz von 60 m³/MWh an Kühlwasser angegeben (swb AG, 2022).

Für ArcelorMittal und das ONYX-Kraftwerk sind keine Daten, bezogen auf die Wassernutzung oder den -verbrauch, verfügbar. Es werden allgemeine Nachhaltigkeitsziele ohne hinterlegte Daten in den Umweltberichten formuliert. ArcelorMittal Bremen gibt an, Wasser zur Kühlung und für verschiedene Prozesse, zum Beispiel zur Abgasreinigung, zu nutzen, wobei es der Weser entnommen und für die

verschiedenen Zwecke aufbereitet wird (ArcelorMittal, 2022). ONYX Power plant, nach Möglichkeit bis zum Jahr 2030, den Standort Farge auf die Verwertung nachhaltiger und CO₂-freundlicher Brennstoffe umzustellen, mittels thermische Verwertung von Altholz (ONYX Power, 2020).

Die Energieproduktion durch Windkraftanlagen benötigt kein Wasser und die eingesetzten Wassermengen für Reinigungsarbeiten sind als vernachlässigbar anzusehen. Ebenso für PV-Anlagen wird an sich kein Wasser benötigt und die geringe Mengen, ebenfalls für die Reinigung von ungefähr 1,7 m³/MWh, sind als vernachlässigbar im Betrieb einzustufen (Terrapon-Pfaff et al., 2020).

Bezogen auf die Wasserkraft existiert das Weserkraftwerk in Bremen mit einer elektrischen Produktion von im Jahr 2020 28,4 Mio. kWh (Weserkraftwerk Bremen GmbH & Co. KG, 2021). Die maximal nutzbare Wassermenge beträgt 220 m³/s, welche an etwa 180 Tagen im Jahr erreicht wird (SKUMS, 2022b). Bei dem Laufwasser-KW werden enorme Mengen in der Millionenhöhe an Wasser genutzt, diese jedoch nahezu nicht hinsichtlich ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften verändert. Nach der Nutzung wird das Wasser zurückgeführt und bleibt also vollumfänglich im Gewässersystem erhalten (Bormann et al., 2019). Dementsprechend ist nicht von Wassernutzung oder -verbrauch zu energetischen Zwecken im bisher verwendeten Sinn zu sprechen und die Hydroenergie wird in dieser Arbeit im weiteren Verlauf nicht mit betrachtet.

Mineralöl wird als Energieträger für die GT 3 in Mittelsbüren verwendet, die aufgrund von geringen Jahresbetriebsstunden und der dementsprechenden vernachlässigbaren CO₂-Emissionen, jedoch nicht mit in der Umwelterklärung der swb aufgelistet wurde, wodurch für diese fossile Energiequellen keine Daten bezogen auf den Wasserbedarf einsehbar sind (swb Erzeugung AG & Co. KG & swb Entsorgung GmbH & Co. KG, 2021).

Eine der großen Zukunftsinnovationen ist Wasserstoff und auch Bremen hat eine Wasserstoffstrategie entwickelt. Für die Bereitstellung des Gases ist Wasser als Edukt notwendig und basierend auf den Ausbauplänen werden im Folgenden die spezifischen Wasserverbrauchsdaten berechnet: Im Idealzustand, also bei vollständiger stofflicher Umsetzung, werden laut der chemischen Gleichung für die Wasserspaltung durch Strom 8,94 kg Wasser benötigt, um 1 kg Wasserstoff als Produkt zu erhalten. Je nach Art des Elektrolyseurs variiert diese Zahl von 9,4 bis 14,4 kg laut Praxiswerten. Neben der Verwendung als Edukt wird Wasser ebenso in die Elektrolyseuren gefüllt (10- 20 %), um die Komponenten zu schützen, was die Wassernutzung erhöht (Birth et al., 2021; Fraunhofer IFF, 2021). Wie bereits in Abschnitt 9.2.1 herausgestellt, wird ein Elektrolyseur für die klimaneutrale Stahlproduktion am Standort Mittelsbüren geplant, der als Prototyp in 2023 mit 12 MW Größe geplant und bis auf 300 MW ausgebaut werden soll (Lagner, 2020). Im Rahmen des Projektes „Resiliente Energiesysteme“ werden für die Prototyp-Version des Elektrolyseurs mit rund 50 kg/h an Wasserstoff gerechnet. Um die gesamte Stahlproduktion klimaneutral rechnen zu können, müssten 700- 1000 MW

an Elektrolyseurgröße und damit 20- 50 t Wasserstoff stündlich produziert werden. Laut Fuhrländer würde bereits für 15 t Wasserstoff pro Stunde über 11 Mio. m³ an Wasser jährlich zur Verfügung stehen müssen. Aufgrund der Entwicklungsphase können keine belastbaren Daten herausgegeben werden und die Annahmen entsprechen nur ersten Hochrechnungen. Bereits die Tendenz zeichnet eine große Wasserverbrauchsmenge ab und sollte stets in die Wasserbetrachtungen in Bremen mit einbezogen werden. Im Gespräch mit dem Leiter des KW-Standorts Mittelsbüren swb Erzeugung und Geschäftsführer INGAVER GmbH Dr. Thomas Kalkau wurde angedeutet, dass eine Möglichkeit die lokale Verschiebung des Elektrolyseurs hin zu der Küste Deutschlands in die Nähe der Offshore-Produktion für grünen Strom in der Überlegung ist, aber auch dies ist nicht belegbar zum aktuellen Stand.

Zusammenfassend sind für Bremen folgende aquatische Kennzahlen herausgearbeitet, wobei die verschiedenen Kennzahlen für einen Energieträger als Spannweite aufgrund fehlender Daten aufgenommen sind (Tabelle 14).

Tabelle 14: Aquatische Kennzahlen Bremer Kraftwerke.

Energieträger	Wassernutzung	Wasserverbrauch	Quelle/ Bezug
Steinkohle	78,97- 135,55 m ³ /MWh	0,11- 0,62 m ³ /MWh	KW Hastedt/ Hafen
Erdgas	78,97 m ³ /MWh	0,11 m ³ /MWh	HKW Vahr
Mineralöl	k.A.	k.A.	GT 3 Mittelsbüren
Abfall/ Biomasse	0,36- 94 m ³ /MWh	0,05- 0,22 m ³ /MWh	MHKW/ MKK
PV	0 m ³ /MWh	0 m ³ /MWh	Literatur
Windkraft	0 m ³ /MWh	0 m ³ /MWh	Literatur
Wasserkraft	220 m ³ /s	0 m ³ /MWh	Weserkraftwerk
Wasserstoff	k.A.	11 Mio. t/a	KW Mittelsbüren

Den größten Wasserbedarf unter den fossilen Energiequellen haben KW mit dem Energieträger Steinkohle, dicht gefolgt von Erdgas. Für Mineralöl konnten keine Werte generiert werden. Für die EE zeigt die Biomasse ein sehr diverses Spektrum. PV, Windkraft und Wasserkraft verbrauchen kein Wasser, wobei letzteres jedoch große Mengen an Wasser nutzt. Wasserstoff als ein PtX-Verfahren zeigt einen hohen Wasserverbrauch durch Wasser als Edukt auf.

10. Nachhaltigkeitsbewertung der Ausbaupfade

In diesem Kapitel werden die energetischen Ausbaupfade von Bremen und Deutschland quantitativ aufgearbeitet und anschließend qualitativ bewertet. Dafür werden die Primärenergieverbräuche auf Basis der Energieprognosen bestimmt und diese mit den generierten aquatischen Kennzahlen oder Literaturwerten multipliziert und anschließend in einer Nachhaltigkeitsbewertung der Wasserbedarfe qualitativ untersucht.

10.1 Quantitativer Wasserbedarf in Bremen

Als Basis für die Berechnung des Wasserbedarfes ist der Primärenergieverbrauch Bremen zu bestimmen, der sich auf den Prognosen der Energiewirtschaft gründet. In Abbildung 58 sind die berechneten Verbräuche für das Jahr 2019 für das Land Bremen aufgezeigt.

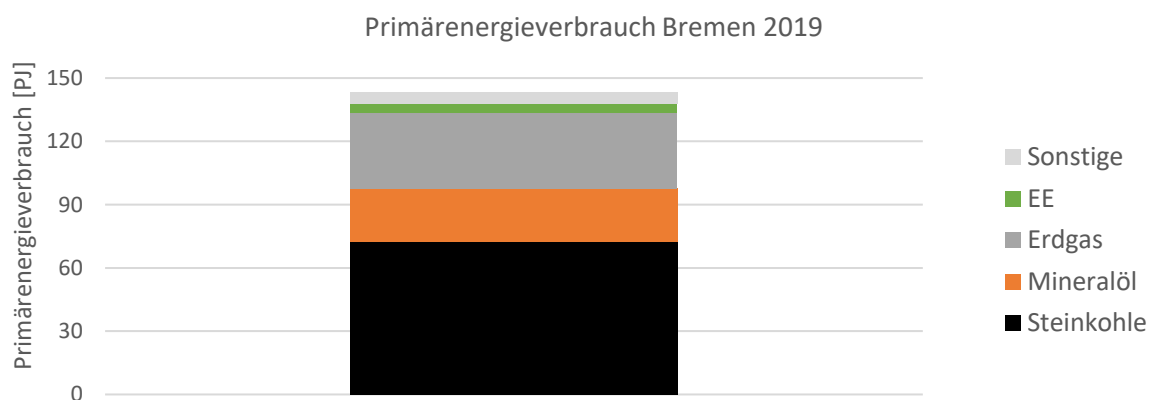


Abbildung 58: Primärenergieverbrauch Bremen Stand 2019 nach (Statistisches Landesamt Bremen, 2021a).

Den größten Anteil hat aktuell der Energieträger Steinkohle. Mineralöl und -produkte und Erdgas sind die zweit- und drittgrößten Energiequellen, wobei die EE im Jahr 2019 nur einen geringen Anteil einnehmen. Für das Jahr 2045 sind keine Daten verfügbar auf Landesebene.

Für eine detaillierte Aufspaltung der EE sind die spezifischen Primärenergieverbräuche in PJ für das Referenzjahr 2019 in Abbildung 59 aufbereitet.

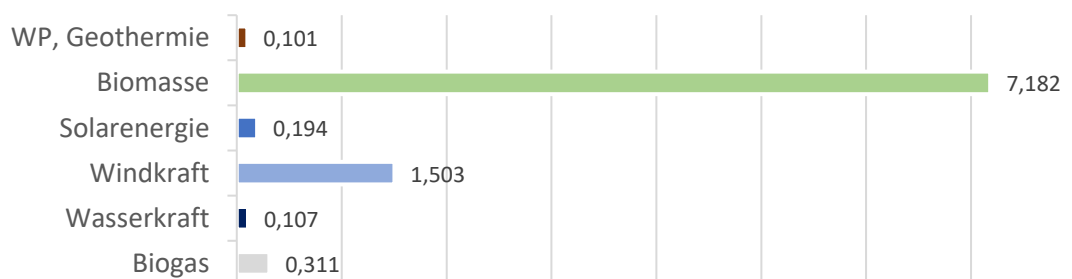


Abbildung 59: Primärenergieverbrauch Bremen nach EE in PJ, Stand 2019 nach (Statistisches Landesamt Bremen, 2021b).

Mit über $\frac{3}{4}$ des Verbrauches ist die Biomasse im Land Bremen der wichtigste EE, gefolgt von der Windkraft mit ungefähr einem Drittel. Weitere EE sind die Wasserkraft, Biogas (Klär- und Deponiegas), Solarenergie und Geothermie/ Wärmepumpe (WP).

Die Berechnung des Wasserbedarfes für das Land Bremen erfolgt über die Multiplikation der aquatischen Kennzahlen (Abschnitt 9.5) mit den Primärenergieverbräuchen (umgerechnet in MWh), wobei eine Unterscheidung zwischen Wassernutzung und Wasserverbrauch vorgenommen wird. Für die Wassernutzung und den Wasserverbrauch bei der Energieproduktion mittels Mineralöl wird auf Literaturwerte nach Terrapon-Pfaff et al. zurückgegriffen. Biogas (Klär- und Deponiegas) wird nach Bormann et al. mit den identischen aquatischen Kennzahlen wie Biomasse bewertet. Geothermie und Wärmepumpen werden durch fehlende Datengrundlage nicht mit betrachtet. Die Wasserbedarfe sind zahlenmäßig in Tabelle 15 abgebildet.

Tabelle 15: Wasserbedarf in Bremen im Jahr 2019.

Energie-träger	Aqu. Kennzahl [m ³ /MWh]	W-Verbrauch [m ³ /MWh]	Energieverbrauch [MWh]	W-Bedarf Nutzung [km ³]	W-Bedarf Verbrauch [km ³]
Steinkohle	78,97 - 135,55	0,11- 0,62	20.111.111	1,58 -2,73	2,21 – 12,47
Erdgas	78,97	0,11	9916.667	0,78	0,001
Mineralöl	69	1,6	7.027.778	0,48	0,011
Biomasse	0,36 - 94	0,05 - 0,22	1.995.000	7,18*10 ⁻⁴ – 0,19	9,98*10 ⁻⁵ – 4,39*10 ⁻⁴
Biogas	0,36 - 94	0,05- 0,22	86.388	31-8.121	4,3-19
PV	0	0	53.889	0	0
Windkraft	0	0	417.500	0	0
Wasserkraft	220 m ³ /s*	0	29.722	nicht definiert	0
Summe				2,86 - 4,19	0,0147 - 0,253

*Wassernutzung geht in die Millionen Kubikmeter pro MWh, keine Betrachtung in Zahlen

Bezogen auf den Energieverbrauch hat der Energieträger Steinkohle in Bremen im Referenzjahr 2019 das meiste Wasser genutzt als auch verbraucht. Hier wird jedoch auch die große Spannweite der Wasserbedarfskennzahlen deutlich, die aus den generierten aquatischen Kennzahlen schlussfolgern. Weitere große Wassernutzer sind die Energieproduktionsprozesse mit Erdgas sowie Mineralöl und -produkte, wobei letztere zusätzlich besonders hohe Verbrauchszahlen aufweisen. EE zeigen für die Energiebereitstellung insgesamt eine geringere Wassernutzung. Hingegen für die Wasserkraftanlagen ist keine zahlenmäßige Abgrenzung vorgenommen, da sehr große Volumina genutzt werden, aber das Wasser wird durch diese Technologie nicht in seiner Güte verändert wird und deshalb als nicht kritisch anzusehen ist. Besonders die Windenergie- und PV-Anlagen sind auffällig, da sie aufgrund der Literaturrecherche ohne Wassernutzung und -verbrauch im Betrieb auskommen. Biomasse und -gas zeigen eine hohe Diversität durch die angesetzten aquatischen Kennzahlen auf. Im Land Bremen wurden im Jahr 2019 rund 3 bis 4 km³ Wasser für die Energieproduktion genutzt und 0,015 bis 0,25 km³ verbraucht. In der nachstehenden Abbildung 60 sind die prozentualen Verteilungen in der

Wassernutzung und dem Wasserverbrauch zwischen den Energiebereitstellungstechnologien in Bremen ersichtlich.

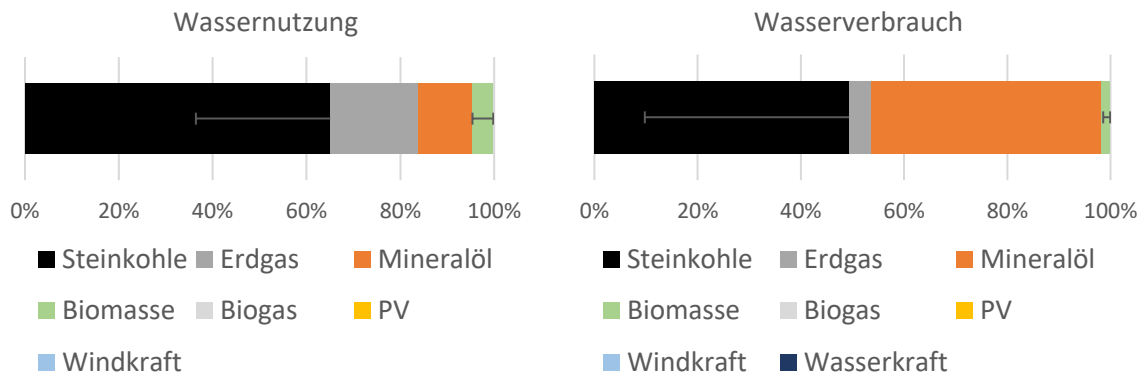


Abbildung 60: Prozentuale Verteilung Wasserbedarf Bremen Stand 2019.

Sowohl genutztes als auch verbrauchtes Wasser sind im Jahr 2019 in Bremen zu über 95 % auf fossile Energieträger zurückzuführen, wenn die Wasserkraft für die Nutzung nicht mit in Betracht gezogen wird. Besonders Steinkohle ist ein großer Wassernutzer, aber auch -verbraucher. Erdgas zeigt eine hohe Wassernutzung, aber dafür nur einen geringen Wasserverbrauch, wohingegen Mineralöl mehr Wasser prozentual verbraucht als nutzt.

Für eine Bewertung der Ausbaupfade ist eine Betrachtung auf deutschlandweiter Ebene notwendig, da die festgelegten Zielwerte auf dieser Ebene beschlossen und öffentlich einsehbar sind.

10.2 Quantitativer Wasserbedarf in Deutschland

Auf Basis der neu errechneten aquatischen Kennzahlen und der Literaturrecherche werden in diesem Abschnitt die benötigten Wassermengen in der Skalierung deutschlandweit verglichen. Als Grundlage werden die folgenden Werte für den Primärenergieverbrauch, wie in Abbildung 61 dargestellt, angenommen.

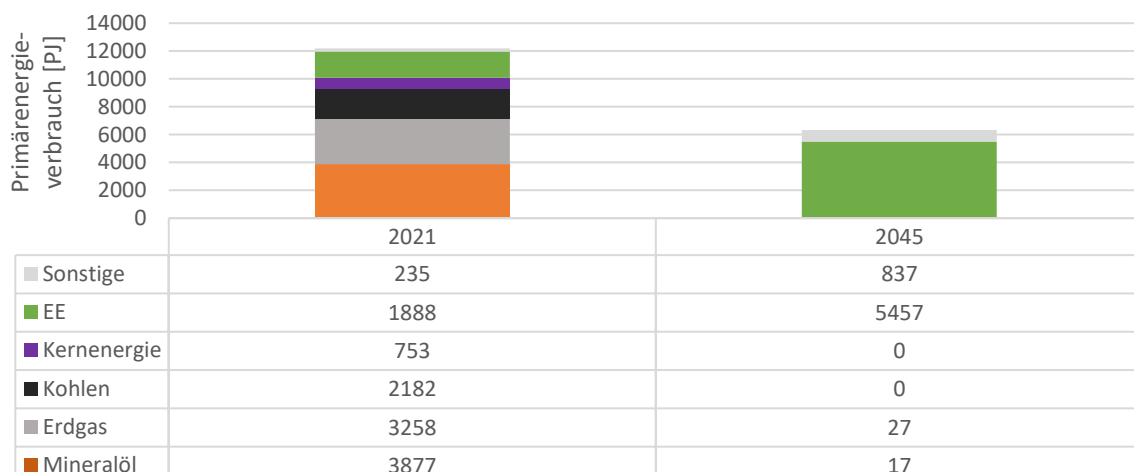


Abbildung 61: Primärenergieverbrauch Deutschland 2021 und 2045 (AG Energiebilanzen e.V., 2021b) und (Prognos AG et al., 2021).

Den größten Anteil hat aktuell der Energieträger Mineralöl, dicht gefolgt von Erdgas. Der Primärenergieverbrauch der EE ist im Jahr 2021 dem der Kohlen gleichzusetzen. Dieses Verhältnis soll sich laut Prognosen bis zum Jahr 2045 drastisch ändern, wobei nahezu der gesamte Energieverbrauch über EE bestimmt sein soll.

Für eine detaillierte Aufsplittung der EE sind die spezifischen Primärenergieverbräuche für das Jahr 2021 in Abbildung 62 aufbereitet und beziffert in absoluten Zahlen.

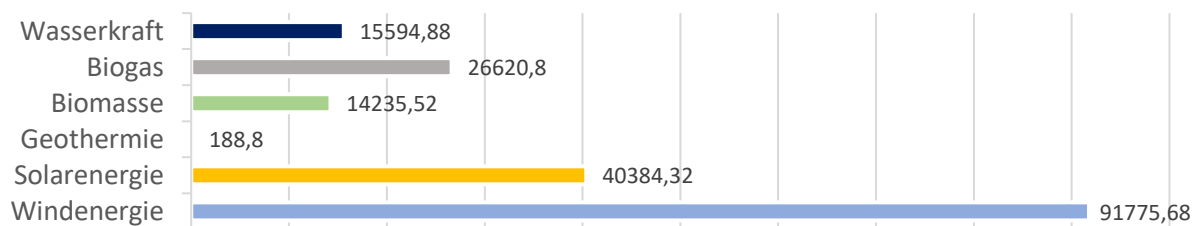


Abbildung 62: Primärenergieverbrauch Deutschland nach EE in MWh, Stand 2021 nach (AG Energiebilanzen e.V. & BMWi, 2022).

Die aquatischen Kennzahlen werden entsprechend Tabelle 15 verwendet. Die Energieträger Kernenergie und Geothermie sind als Literaturwerte nach Terrapon-Pfaff et al. aufgelistet, da in Bremen keine Daten verfügbar sind. Nach Bormann et al. ist die Annahme getroffen, dass Biogas den gleichen aquatischen Kennwert wie Biomasse zugeteilt wird. Die Kategorie Sonstige wird aufgrund fehlender Detaillierung nicht mit betrachtet. Alle weiteren Annahmen und Berechnungsschritte sind wie in Abschnitt 10.2 getroffen und durchgeführt. Die Volumina für Wassernutzung und -verbrauch sind gebündelt für Deutschland im Jahr 2021 in Tabelle 16 aufgeführt.

Tabelle 16: Wasserbedarf in Deutschland im Jahr 2021.

Energie-träger	Aqu. Kennzahl [m ³ /MWh]	W-Verbrauch [m ³ /MWh]	Energieverbrauch [MWh]	W-Bedarf Nutzung [km ³]	W-Bedarf Verbrauch [km ³]
Kohlen	78,97-135,55	0,11 - 0,62	606.111.111	47,86 -82,16	0,066 – 0,38
Erdgas	78,97	0,11	905.000.000	71,47	0,099
Mineralöl	69	1,6	1.076.944.444	74,31	1,72
Kernenergie	88	1,3	209.166.667	18,41	0,27
Windenergie	0	0	91.776	0	0
Solarenergie	0	0	4.038	0	0
Geothermie	70	1,1	189	1,32 *10 ⁻⁵	2,07*10 ⁻⁷
Biomasse	0,36 - 94	0,05 - 0,22	14.236	5,12*10 ⁻⁶ – 0,0013	(0,71 - 3,12) *10 ⁻⁶
Biogas	0,36 - 94	0,05 - 0,22	26.621	9,58*10 ⁻⁶ – 0,0025	(1,3 - 5,86) *10 ⁻⁶
Wasserkraft	220 m ³ /s*	0	15.595	nicht definiert	0
Summe				212,05-246,35	2,16 - 4,35

*Wassernutzung geht in die Millionen Kubikmeter pro MWh, keine Betrachtung in Zahlen

In Deutschland wurden im Jahr 2021 rund 212 bis 246 km³ Wasser genutzt und 2 bis 4 km³ verbraucht. Verglichen mit dem Wasserdargebot Deutschlands von 188 km³ (Abschnitt 7.3.5) ergibt sich bezogen auf das genutzte Wasser ein Delta, welches der Datengrundlage und Rundungsfehlern geschuldet ist. Simultan zum Land Bremen zeigt sich auch in Deutschland, dass die Kohlen ein wichtiger Energieträger sind, jedoch Mineralöl und Erdgas höhere Energieproduktionen im Jahr 2021 vorweisen. In Kombination mit der aquatischen Kennzahl ergeben sich nahezu identische Verteilungen der Wasserbedarfe, wobei Mineralöl in der Verwendung einen dreimal so hohen Wasserverbrauch, verglichen mit den anderen beiden, hat. Deutschlandweit wird Kernenergie noch eingesetzt, welche ungefähr ¼ der Wassernutzungsmenge, aber dreimal so viel Wasser verbraucht, verglichen mit Erdgas. Für eine Einschätzung des Anteils erneuerbarer Energie, aber auch der Verteilung fossiler Energieträger am Wasserbedarf Deutschland sind die prozentuale Verteilung in Abbildung 63 dargestellt.

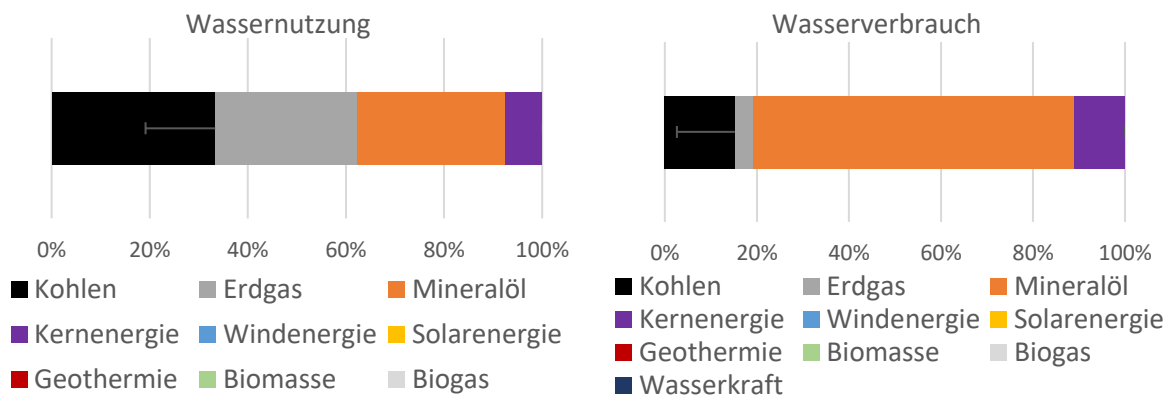


Abbildung 63: Prozentualer Wasserbedarf Deutschland Stand 2021.

Es ist erkennbar, dass wie nach der Auswertung der absoluten Zahlen, die drei Energieträger Kohle, Erdgas und Mineralöl jeweils um die 30 % der Wassernutzung ausmachen, wobei die Kernenergie nahezu die restlichen 10 % nutzt. EE sind in dieser Abbildung nicht zu erkennen, da sie einen bisher so geringen Anteil an der Wassernutzung ausmachen. Der Wasserverbrauch im Jahr 2021 lässt sich auf die vier gleichen Energieträger zurückführen, wobei Mineralöl mit knapp 70 % das größte Volumen benötigt. Auch in der Wassernutzung sind EE durch die Auflösung nicht einsehbar durch geringe Anteile.

Zusammengefasst ist, deutschlandweit betrachtet, der Wasserbedarf des Energiesektors nahezu vollständig auf fossile Energiebereitstellungstechnologien zurückzuführen.

Für eine quantitative Auswertung der Ausbaupfade ist simultan zu dem Jahr 2021 eine Aufteilung der EE notwendig, um eine Zuordnung der Verbräuche vornehmen zu können. Aufgrund fehlender Daten wurde die prozentuale Verteilung entsprechend Abbildung 62 im Jahr 2021 vorgenommen und diese auf die Gesamtenergiemenge bezogen. Dadurch ergeben sich die Werte der Energieverbräuche in

Tabelle 17, die durch Multiplikation mit den aquatischen Kennzahlen die Wasserbedarfe der Energiebereitstellungstechnologien ergeben.

Tabelle 17: Wasserbedarf in Deutschland im Jahr 2045.

Energie-träger	Aqu. Kennzahl [m³/MWh]	W-Verbrauch [m³/MWh]	Energieverbrauch [MWh]	W-Bedarf Nutzung [km³]	W-Bedarf Verbrauch [km³]
Kohlen	78,97-135,55	0,11 - 0,62	0	0	0
Erdgas	78,97	0,11	7.500.000	0,59	825
Mineralöl	69	1,6	4.722.222	0,33	7.556
Kernenergie	88	1,3	0	0	0
Windenergie	0	0	736.846.583	0	0
Solarenergie	0	0	324.236.750	0	0
Geothermie	70	1,1	1.515.833	0,11	1.667
Biomasse	0,36 - 94	0,05 - 0,22	114.293.833	0,041 - 10,74	5.715 - 25.145
Biogas	0,36 - 94	0,05 - 0,22	213.732.500	0,077 - 20,09	0,011 - 0,047
Wasserkraft	220 m³/s*	0	125.207.833	Nicht definiert	0
Summe				1,14 - 31,86	0,026 - 0,44

*Wassernutzung geht in die Millionen Kubikmeter pro MWh, keine Betrachtung in Zahlen

Es wird, ausgehend von dem Energieverbrauch, deutlich, dass die Energieproduktion nahezu vollständig auf EE basiert und nur geringe Mengen an Erdgas und Mineralöl verwendet werden. Die Prognose zeigt, dass vorrangig Wind- und Solarkraft verwendet werden, die laut Literaturrecherche kein Wasser nutzen und/ oder verbrauchen. Die benötigte Gesamtwassermenge bezogen auf die Nutzung sinkt um rund 88 %, verglichen mit dem Jahr 2021, und der Wasserverbrauch verringert sich um gute 90 % (Maximalwerte). Ohne Einbezug der Wasserkraft ist bei der Annahme der Maximalzahlen für das Jahr 2045 Biogas der größte Wassernutzer und auch -verbraucher. An zweiter Stelle reiht sich die Biomasse ein. Die Anteile sind aus Abbildung 64 zu entnehmen.

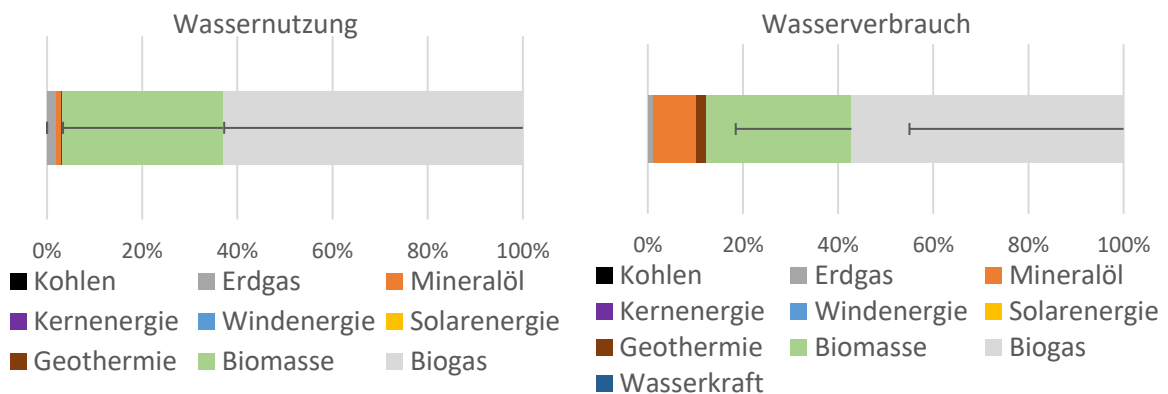


Abbildung 64: Prozentualer Wasserbedarf Deutschland Prognose 2045.

Die prozentuale Verteilung bestätigt die Schlussfolgerungen auf Basis der absoluten Zahlenwerte. Der größte Einfluss als Energiebereitstellungstechnologie auf die Wassernutzung und den

Wasserverbrauch lässt sich durch eine Sensitivitätsanalyse bestimmen. Der Energieverbrauch reduziert sich um knapp 65 % im Jahr 2045 verglichen mit dem Jahr 2021. Wassernutzung und -verbrauch erfahren eine Minderung um jeweils knapp 90 % gerundet. Der Unterschied zwischen dem Energieträgermix ist der Anstieg der EE. Ausgenommen der Wasserkraft sind die notwendigen Wassermengen für die Energieproduktion auf Basis erneuerbarer Energien zahlenmäßig insgesamt geringer, was sich auch in an aquatischen Kennzahlen bereits gezeigt hat.

Neben der Energieversorgung entnehmen, wie in Abbildung 32 in Abschnitt 8.2 dargestellt, auch die Wirtschaftssektoren öffentliche Wasserversorgung, Bergbau (inklusive Gesteins- und Erdengewinnung), verarbeitendes Gewerbe und Landwirtschaft Wasser für die eigene Verwendung. Auf Basis der Forschungsergebnisse von Bormann et al. und der BDI Studie aus dem Jahr 2018 (BCG & BDI e.V., 2018) entwickelt sich das Volumen und die Verteilung der Wassernutzungen auf die Wirtschaftsbereiche zukünftig wie Abbildung 65 erkennbar.

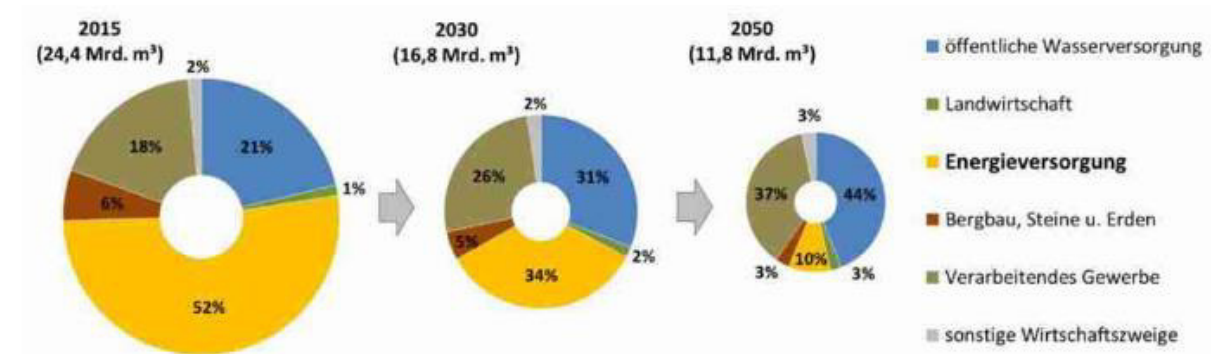


Abbildung 65: Wasserentnahmeprognose Deutschlands bis 2050 (80% Pfad der BDI Studie 2018) (Bormann et al., 2019).

Der Wasserbedarf des Energiesektors nimmt stetig ab. Diese Tendenz kann bereits mit den aktuellen Zahlen verifiziert werden, da von einem Anteil im Jahr 2015 von 52 % an der Wasserentnahme eine Verringerung auf 42 % im Jahr 2021 erkennbar ist. Hauptsächlich wird das Wasser für Kühlzwecke im Energiesektor genutzt. Ursachen für die Entwicklung der Wasserentnahme sind unter anderem der Umbau des Energiesystems durch den Kohleausstieg, die Förderung erneuerbarer Energien im Strom- und Wärmesektor und der Ausstieg aus der Atomenergie, welche eine Reduzierung der Kühlwasserentnahmen um 50–60 % bis 2030 und auf das Jahr 2050 um 70–85 % mit sich bringt (BMU, 2021).

Auch insgesamt werden die Wasserentnahmen in Deutschland abnehmen, wie die Abbildung 64 zeigt. Auf Basis des 80 %- Pfades der BDI-Studie (BCG & BDI e.V., 2018) wird bis 2030 um etwa 30 % und bis 2050 über die Hälfte der Wasserentnahmen sinken. Insgesamt rückt der Wasserbedarf der Energieversorgung hinter die Bedarfe der Wirtschaftssektoren der öffentlichen Wasserversorgung und des verarbeitenden Gewerbes. Verglichen mit dem Jahr 2015 bis zum Jahr 2021 ist bereits ein Anstieg

der Entnahmen in den beiden Sektoren um 6 % bzw. 2 % erkennbar, wodurch die dargestellten Tendenzen bestätigt sind.

10.3 Qualitative Bewertung der Ausbaupfade

Für die qualitative Bewertung der Ausbaupfade ist zuerst die Nachhaltigkeitsbewertung einzelner Energiebereitstellungstechnologien vorzunehmen nach dem Schema, welches in Abschnitt 4.5 beschrieben wird. Die Bewertung erfolgt auf Basis von ökologischen, ökonomischen und sozio-kulturellen Kriterien. Für Kriterium 1.1 THG-Emissionen werden die Werte der Tabelle 9 (CO₂ Faktoren) genutzt. Der kumulierte Wasserverbrauch (Kriterium 1.2) ergibt sich aus den Literaturbetrachtungen (Abschnitt 8.2) und den aquatischen Kennzahlen (in Abschnitt 8.2 Tabelle 11 und in Abschnitt 9.5 Tabelle 15). Das dritte ökologische Kriterium der Wasserqualität nach Benutzung, bzw. vor Rückführung in den Wasserkreislauf, bezieht sich unter anderem auf das genutzte Kühlwasser. Vorrangig wird es einer Temperaturerhöhung unterzogen und somit in die Stufe 2 eingeordnet. Die Bewertung der Redundanz (ökonomisches Kriterium 2.1) wird auf Basis der Fluktuation der einzelnen Energiebereitstellungstechnologien vorgenommen. Des Weiteren sind die Importquoten der Energieträger für die Bewertung der Energieabhängigkeit aus dem Abschnitt 5.1.1 zu entnehmen. Die sozio-kulturellen Kriterien basieren auf einer Einschätzung aktueller gesellschaftlicher Bewegungen. Die einzelnen Nachhaltigkeitseinstufungen je Energiebereitstellungstechnologie sind den Tabellen im Anhang zu entnehmen (Anhang 1 bis Anhang 11).

Die beschriebenen Kriterien sind in ein Netzdiagramm eingepflegt mit entsprechender dreistufiger Skala, wobei sie von oben beginnend mit dem Uhrzeigersinn um das Netz angeordnet sind. Der Abbildungen 66 ist die Wasserfußabdrücke der Energiebereitstellungstechnologien im Betrieb der Kraftwerke zu entnehmen., aufgesplittet nach fossilen und erneuerbaren Energiequellen. Je kleiner die Fläche ist, desto nachhaltiger gestaltet sich die Energieproduktion. EE sind grünlich unterlegt, um eine optische Abgrenzung zu erzeugen.

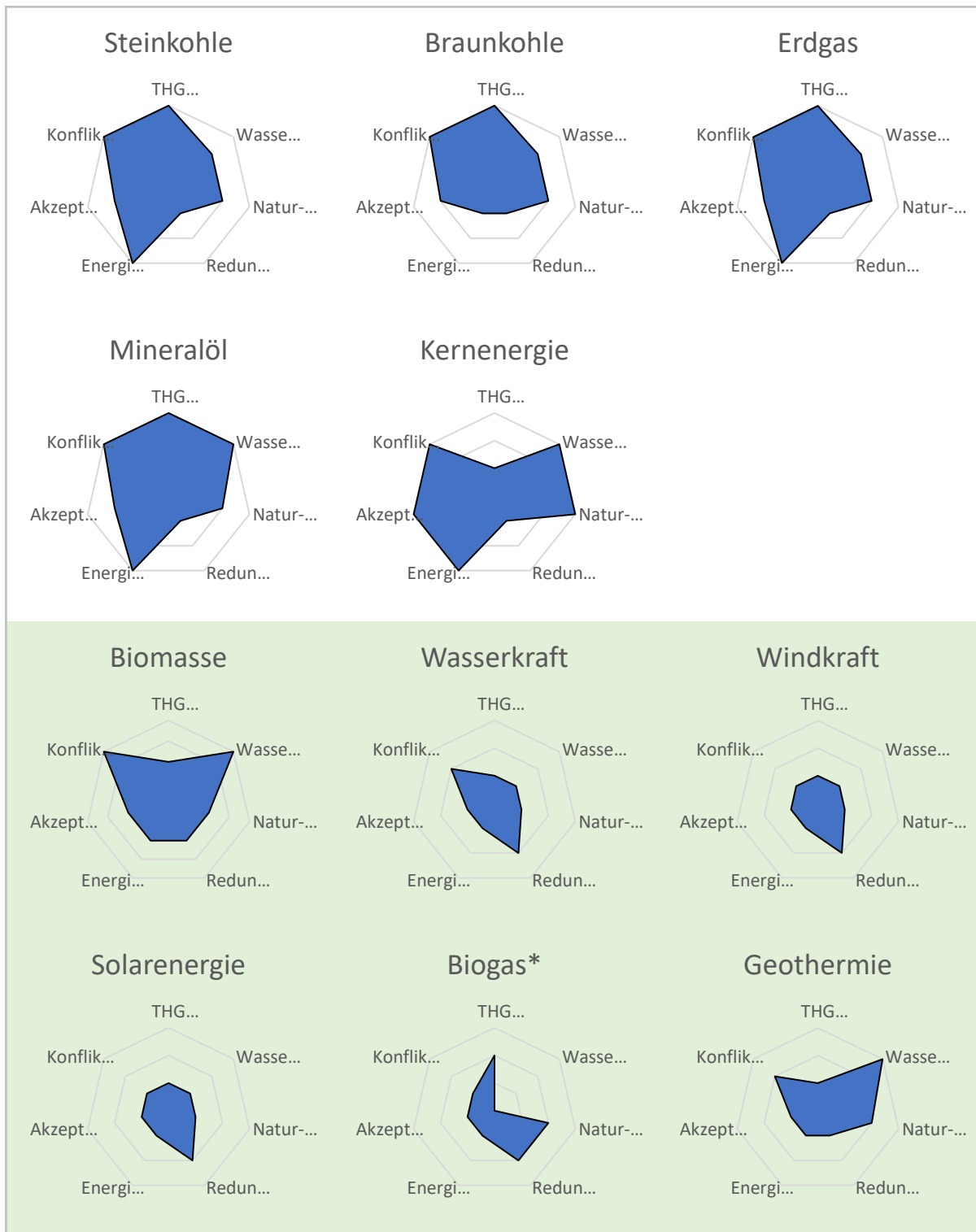


Abbildung 66: Wasserfußabdrücke der Energiebereitstellungstechnologien (*ohne Wasserverbrauchswert).

Es ist erkennbar, dass die fossilen Energiebereitstellungstechnologien einen größeren Wasserfußabdruck haben als die EE. Jedoch gibt es spezifische Unterschiede und Ausnahmen.

Ökologisch betrachtet sind zum einen die THG-Emissionen zu bewerten. Bis auf die Kernenergie schneiden die fossilen Energieträger schlecht ab (Stufe 3), wohingegen die betrachteten EE überwiegend auf Stufe 1 liegen (Ausnahme: Biogas). Der Wasserverbrauch, also die nicht mehr nutzbare Wassermenge, wird für die fossilen Energieträger mit Stufe 2 bis 3 bewertet. Die beiden

Energieträger Biomasse und Geothermie verbrauchen viel Wasser, wohingegen die restlichen Technologien mit Stufe 1 einen geringen Verbrauch der Ressource Wasser aufzeigen. Für Biogas wurden weder Kennwerte generiert, noch gab es Literaturwerte. Als dritter Aspekt wird die Naturverträglichkeit bewertet, das heißt, die Wasserqualität nach der Wassernutzung. Aufgrund von größtenteils Kühlwassernutzungen werden Stein-, Braunkohle und Erdgas in Stufe 2 eingeordnet, wohingegen Mineral- und Kernenergie die Wasserqualität maßgeblich verschlechtern (Stufe 3). Über alle erneuerbare Energietechnologien hinweg wird die Naturverträglichkeit mit 1 oder 2 zugeordnet, wodurch sie im Schnitt eine bessere Rückführung des genutzten Wassers möglich macht. Zusammengefasst ist der ökologische Wasserfußabdruck der erneuerbaren Energiebereitstellungstechnologien kleiner als der des fossilen Ursprungs.

Die zweite Dimension ist die Ökonomie und das erste wirtschaftliche Kriterium ist die Redundanz der Energiebereitstellungstechnologien. Hier zeigt sich die Stärke der fossilen Energieträger, da sie eine Versorgungssicherheit gewährleisten, die unter anderem an der Möglichkeit der Rohstoffspeicherung liegt. EE hingegen sind teilweise von Fluktuationen betroffen (siehe Wind- und Solarenergie) und eine Speicherung ist aktuell noch umständlich und mit großem Aufwand und Wirkungsgradeinbußen verbunden durch notwendige Umwandlungsprozesse (siehe Wasserstoff). Im Schnitt sind die EE in Stufe 2 eingeordnet, da über sektorielle Zusammenarbeit eine Versorgungssicherheit über mehrere Energieträger gewährleistet werden kann. Der zweite betrachtete Faktor im Bereich der Wirtschaft ist die Importabhängigkeit. Mit Ausnahme der vorrangig im Inland abgebauten Braunkohle sind die fossilen Energieträger zu großen Anteilen Importrohstoffe, wodurch diese Energieproduktion von anderen Kooperationsländern oder Verbündeten abhängt. EE hingegen sind alle in Deutschland, wenn auch mit regionalen Unterschieden, vorhanden und somit ist nur eine sehr geringe Energieabhängigkeit gegeben, wobei in Zukunft die zu produzierende Energiemenge je Technologie diese Einschätzung hin zu mehr Abhängigkeit und Importnotwendigkeiten verändern könnte. Aus der wirtschaftlichen Perspektive sind erneuerbare und fossile Energiebereitstellungstechnologien ausgeglichen über die beiden betrachteten Kriterien hinweg.

Der sozio-kulturelle Bereich verkörpert die dritte Säule der Nachhaltigkeit, wobei eine Einschätzung auf aktuellen gesellschaftlichen Strömungen getroffen wird und nicht auf absoluten Zahlen. Ein wichtiger Umsetzungspunkt ist die gesellschaftliche Akzeptanz. Diese kann sowohl Entwicklungen fördern als auch aufhalten. Die meisten fossilen Energieträger zerstören durch den Abbau die Natur und teilweise ebenso Wohnraum. Durch, wie beschrieben, große Importzahlen führt dies zu der Einstufung im mittleren Bereich. Die Kernenergie hingegen wird gesellschaftlich meist boykottiert, dies jedoch aufgrund gefürchteter gesundheitlicher Folgen und den radioaktiven Altlasten. EE werden in den Medien als die Zukunftslösung für Klimawandel und Unabhängigkeit vermarktet und erfahren

damit eine immer größere Akzeptanz, die trotz einzelner Diskussionen (Bau von Windkraftanlagen) als, über die gesamte Gesellschaft betrachtet, als positiv angesehen werden kann (Stufe 1). Ein besonders wichtiger Aspekt in dieser Arbeit ist das potenzielle Konfliktpotential der jeweiligen Energieträger, basierend auf Ressourcenverbrauch und -zugänglichkeit, als auch der Abhängigkeit anderer Länder. Das Konfliktpotential fossiler Energieträger wird als hoch eingestuft, während die EE je nach Verfügbarkeit geringere Wahrscheinlichkeiten für eine Auseinandersetzung mit sich bringen. Was das konkret für Konflikte im Bereich Wasser sein können und wie mögliche Lösungsstrategien aussehen, wird näher in Kapitel 11 betrachtet. In der sozio-kulturellen Dimension sind die EE besser eingestuft als die fossilen Energieträger aus der Wassersperspektive.

Erneuerbare Energiebereitstellungstechnologien emittieren weniger THG-Emissionen, verbrauchen im Durchschnitt weniger Wasser je Energieeinheit und haben einen kleineren Einfluss auf die Wassergüte. Ökonomisch betrachtet sind die Schwachstellen die Redundanz, jedoch zeigen die den Vorteil der Energieunabhängigkeit. Sozial gesehen sind sie gesellschaftlich akzeptiert und weisen nur ein geringes Konfliktpotential auf. Qualitativ betrachtet ist das Ziel der Ausbaupfade, mehr EE zu integrieren, nachhaltiger als der aktuelle Energiemix. Durch die angestrebten Effizienzsteigerungen und die damit verbundene geringere Energieproduktion wird der Wasserbedarf absolut gesenkt.

In diesem Kapitel wurde der Zusammenhang der Ausbaupfade mit dem Wasserbedarf der Energiebereitstellungstechnologien und deren Nachhaltigkeit betrachtet. Bereits erwähnt wurde das Konfliktpotential von Energiequellen. Inwieweit dieses auch für die Ressource Wasser relevant ist und in Beziehung zu der Energieproduktion steht, wird in dem folgenden Kapitel erörtert.

11. Konfliktsituationen Wasser

Aus der Verknüpfung von Energie- und Wasserwirtschaft, die folgend auf der endlichen Ressource an Süßwasser basiert, entstehen Nutzungskonflikte und damit Konkurrenzsituationen zwischen den einzelnen Energiebereitstellungstechnologien. Gleichzeitig besteht eine Wechselbeziehung zu einer potenziellen Gefährdung der Gewässerqualität durch energiewirtschaftliche Aktivitäten. Das steigende Bewusstsein lässt sich in der Gesetzgebung entsprechend wiederfinden und zeigt sich in gesetzlichen Regelungen, wie z.B. WRRL, Trinkwasser- und Düngeverordnung (Bormann et al., 2019).

11.1 Konfliktursachen und -arten

Als Konfliktursachen sind drei Oberkategorien abzugrenzen: Konkurrenz um Wassermengen, Konflikte aufgrund der Wasserqualität und Flächennutzungskonkurrenzen.

Bei der Konkurrenz um die Wassermenge sind besonders die Wasserentnahmen von Grund- und Oberflächenwasser betroffen, die in Konkurrenz stehen können. Dies zeigt sich zum einen bei dem identischen Nutzungstyp, wie bspw. der Trinkwassernutzung in städtischen und ländlichen Regionen. Zum anderen aber auch zwischen verschiedenen Wassernutzungstypen, das heißt, der öffentlichen Wasserversorgung und z.B. der landwirtschaftlichen Bewässerung oder Energiekühlwasser. Im Bereich des Bergbaus sind Wasserentnahmen notwendig, welche die lokal verfügbaren Grundwasserressourcen beeinflussen und zu Konfliktsituationen führen können (UBA, 2021a). Bei Niedrigwasserverhältnissen und fortlaufenden Wasserentnahmen, aus bspw. Flüssen, können Konflikte mit der Schifffahrt und der Energiewirtschaft entstehen (BMU, 2019).

Es wird aufgrund klimatischer Entwicklungen zu einer Verschärfung der Nutzungskonflikte in der Wasserwirtschaft kommen und zu einer Verstärkung der ungleichen Verteilung des Wassers, wobei Wasser als Rohstoff, aber auch für viele Prozesse, ein relevantes Glied einnimmt. Eine Idee zum Entgegenlenken sind die Anwendungen digitaler Lösungen für Verbrauchssteuerung und nachhaltiges Wassermanagement vor Ort (Hoffian et al., 2022).

Ein Beispiel dafür ist die numerische Grundwassermodellierung, die zur Optimierung, bzw. zur Darstellung, der notwendigen Wasserschutzgebiete eingesetzt werden kann. Des Weiteren können die Wasserherkunft und hydrogeologische Einflussfaktoren untersucht werden (Ertl & Perfler, 2019).

Die rechtliche Lage im Falle von Knappheit ist nicht eindeutig geklärt und obwohl die öffentliche Wasserversorgung theoretisch gesetzlich abgesichert scheint, ist in Deutschland der Trinkwasserversorgung kein absoluter Vorrang gewährt. Hingegen haben die größten Wasserverbraucher meist noch jahrelang genehmigte Rechte, wodurch sie zugestandene Wassermengen entnehmen können. In diesen Verträgen ist die Klimakrise und deren Folgen bezogen auf die Wassersituation nicht mit berücksichtigt (Huth et al., 2022).

Nicht nur fossile Energieträger führen zu einer langjährigen Belastung von Grund- und Oberflächenwasser durch den Abbau und die Verstromung. EE, und mengenmäßig vorrangig durch den Ausbau von Technologien zur Erzeugung synthetischer Gase und flüssiger Kraftstoffe aus Grünstrom, werden den Wasserbedarf anheben (Bormann et al., 2019).

Die Konflikte aufgrund der Wasserqualität sind eng verknüpft mit der landwirtschaftlichen Nutzung. Durch eine Intensivierung der landwirtschaftlichen Nutzflächen und dem damit verbunden Einsatz von Dünge- und Pflanzmitteln, wird die Grundwasserqualität gefährdet. Daraus resultieren Nutzungskonflikte für den Naturschutz, die Trinkwasserversorgung und andere Wassernutzungen. Neben dem Grundwasser können durch Abdrift bei der Anwendung, Ausschwemmung und Erosion auch oberflächennahe Gewässer betroffen sein und die ökologische Gewässerqualität sinkt. Eine weitere Herausforderung ist der Umgang mit behandeltem Abwasser aus der Industrie und kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen, besonders bei Niedrigwasserverhältnissen. Bezogen auf die Energiewirtschaft ist besonders die Kühlwasserentnahme für die Energieerzeugung zu betrachten, da es aufgrund höherer Gewässertemperaturen zu Folgen für die aquatische Ökologie kommen kann (BMU, 2019).

Besonders die bisher ungenutzten Flächen sind von Veränderung und damit einer Belastung der Qualität von Trinkwassereinzugsgebieten bedroht. Im Bereich des Energiepflanzenanbaus für die Biogaserzeugung ist eine höhere Bewirtschaftungsintensität in der Fläche abzusehen, mit der Folge, dass die Gewässerqualität aufgrund steigender Stickstoffeinträge sinkt (Ditfurth, 2020).

Als dritte Oberkategorie gelten die Flächennutzungskonkurrenzen. Areale, die an Gewässer grenzen, sind unterschiedlichen Ansprüchen und Nutzungen ausgesetzt und je nach den Parametern kann es zu einer Vereinbarung der Ausrichtungen oder einem direkten Konkurrenzkampf zueinanderkommen. Letzteres tritt meist zwischen den Sektoren Hochwasserschutz, Landwirtschaft, Siedlungs-, Industrie- und Verkehrsflächen und Naturschutz auf. Neben der direkten Nutzung von Flächen kann es aufgrund von verschiedenen Funktionsansprüchen Konflikte geben, da sich Funktionen gegenseitig einschränken können. Beispielsweise bedeuten Wasserschutzgebiete, Trinkwasservorrang- und Trinkwasservorbehaltsgebiete für die landwirtschaftliche Nutzung Einschränkungen. Bei räumlichen Konflikten ist keine örtliche Nähe Voraussetzung, wie Konflikte zwischen Ober- und Unterliegern an Flüssen zeigen oder auch die Diskussion um Grenzen von Wasserschutzgebieten zwischen den Städten und den ländlichen Räumen (BMU, 2019).

11.2 Trinkwasser- Nutzungskonflikte

Das Grundwasser ist zum einen die wichtigste Trinkwasserressource Deutschlands, hat aber auch einen entscheidenden Einfluss auf die Güte und das Volumen der Oberflächengewässer. Aus der Perspektive der Volumina sind die GWK in einem guten Zustand (siehe Abbildung 44). Diese Bewertung ist jedoch

regional gesondert zu betrachten. Über die Zeitspanne 1961 bis 2017 sind im Mittel aller betrachteten Messstellen vermehrt niedrige Grundwasserstände aufgezeichnet wurden. Ursache dafür könnte zumindest teilweise im Braunkohletagebau liegen, in dessen Betrieb der Grundwasserspiegel großflächig abgesenkt werden muss. Neben der Menge ist erneut auch die Wasserqualität zu betrachten, wobei die GWK in Deutschland besonders von Verunreinigungen des Grundwassers durch die Landwirtschaft betroffen sind (UBA, 2021a). Es herrscht eine direkte Konkurrenz mit der Trinkwassergewinnung. Hauptverunreinigungen sind Nitrat mit 27,1 % an überschrittenen GWK bezogen auf die Norm und Pflanzenschutzmittel, wobei hier 2,8 % über dem Grenzwert liegen (BKG et al., 2019). Besonders in trockenen Gebieten ist dies negativ zu bewerten, da bei zu hoher landwirtschaftlicher Düngung im Falle von Wasserknappheit nicht auf zusätzliche Trinkwasserressourcen zugegriffen werden kann. Die Klimakrise führt zu vermehrt trockenen und heißen Sommern, wodurch regional die Grundwasserneubildung abnehmen wird. Die Konkurrenz um Grundwasserressourcen wird verschärft (BMU, 2019).

Neben dem Grundwasser ist die Uferfiltration oder die örtliche Grundwasseranreicherung für die Trinkwassergewinnung wichtig und macht etwa 17 % der öffentlichen Wasserversorgung in Deutschland aus. Unter anderem wird die Uferfiltration durch Seen und Flüsse gespeist, in denen ein Teil des Wassers aus behandeltem kommunalem Abwasser besteht, welches auch Klarwasser genannt wird. Der Umfang des Einflusses von Klarwasseranteilen auf die örtliche Trinkwassergewinnung ist regional verschieden. Im Falle von Niedrigwasser treten von über 10 bis 20 % auf und in Teileinzugsgebieten sogar 20 bis 30 % oder mehr, wie bspw. auch in der Weser. Klarwasseranteile haben einen negativen Einfluss auf die Wassergüte und verstärken den Nutzungskonflikt um die noch nutzbaren Ressourcen durch Uferfiltration (BMU, 2019).

Bei einer Studie über die Auswertung von rund 350 Verfahren zu Wasserkonflikten in der juristischen Datenbank Juris zeigt sich, dass in der letzten Dekade die gerichtlichen Konflikte um Wasser im Vergleich zu den zehn Jahren davor in 11 von 16 Bundesländern zugenommen haben, teilweise sehr drastisch, wie bspw. in Bayern mit verdoppelten Verfahren (Huth et al., 2022).

Prognosen zeigen, dass der Nordosten Deutschlands sowie Regionen mit negativer Wasserbilanz (wie auch Bremen) mehr von Konflikten zwischen Wasserwirtschaft und der Landwirtschaft durch Trockenheit betroffen sein werden. Der Nordwesten hingegen wird eine zunehmende Versalzung des Grundwassers erfahren. Ursachen dafür liegen in dem ansteigenden Meeresspiegel mit simultan steigenden Wasserentnahmen. Laut dem Magazin „Kommunal“ und dem „ARD-Politikmagazin Report München“ wurden deutschlandweit tausende Kommunen und deren Zweckverbände befragt und das Problem der Wasserknappheit stellen insgesamt 57 % der insgesamt 1480 Bürgermeisterinnen und Bürgermeister und Mitarbeiter von Zweckverbänden fest (Norddeutscher Rundfunk, 2022a). Es wird

Milderung des Konfliktes der Energiewirtschaft mit der Wasserwirtschaft durch den geplanten Ausstieg aus Kohle- und Atomkraft erwartet (BMU, 2019). Jedoch sind auch neue Konflikte möglich bei einem Anstieg des Biomasseanbau oder der vermehrten Nutzung von Wasserkraft (IWW, 2019).

11.3 Ableitungen von Lösungsstrategien

Wasser ist fast nie die alleinige Ursache oder der Ursprung von Konflikten. Selbst bei Nutzungskonkurrenzen sind es weitere Faktoren, wie bspw. die mangelnde Bereitschaft der Regierung, den wirtschaftlichen Folgen durch eingeschränkte Wasserverfügbarkeit politisch entgegenzutreten, welche die Konflikte begünstigen (Deutsche Welthungerhilfe e.V., 2022).

Lösungsstrategien, um den zukünftigen Herausforderungen der Konkurrenzsituationen zu begegnen, können auf verschiedenen Ebenen entwickelt und umgesetzt werden. Wasser ist meist nicht nur durch physische Gründe knapp und oft sind es Verteilungs- und Managementprobleme, die zu regionaler Knappheit führen. Wassernutzungskonflikte sollten dementsprechend über eine Integration eines Managements effektiv gehandhabt und in ihren Auswirkungen limitiert werden. Dabei sollte systematisch die Nexus-Perspektive zwischen Wasser- und Energiewirtschaft bedacht werden (BMZ, 2022). Die Lösungsansätze können dabei technisch, politisch sowie rechtlich-institutionell sein (Deutsche Welthungerhilfe e.V., 2022).

11.3.1 Rechtliche und planerische Maßnahmen

Auf rechtlicher Basis sollte die vorrangige Nutzung der Gewässer verbindlich festgeschrieben werden. Im rechtlichen Rahmen sind dazu das deutsche Wasserrecht, insbesondere das Wasserhaushaltsgesetz (WHG), und die Landeswassergesetze, als auch das Trinkwasserschutzrecht mit einzubeziehen. Bisher ist der Vorrang der öffentlichen Wasserversorgung nicht klar und eindeutig festgeschrieben (DVGW, 2021). Zum Teil umfassen die Landeswassergesetze aber bereits konkrete Regelungen über eine bevorzugte Nutzung der Gewässer von Seiten der Wasserwirtschaft. Trotz der Gesetzgebungen ist durch verfassungsrechtliche Gründe kein absoluter, uneingeschränkter und ausnahmsloser Vorrang der Trinkwasserversorgung abbildbar, auch nicht in Bremen (BMU, 2019).

Ein weiteres Standbein ist die Raumplanung, welche die Flächenkonkurrenzen eingrenzen kann. Der Begriff Raumplanung ist weder rechtlich noch wissenschaftlich eindeutig und wird meist als öffentliche Aufgabe der überfachlichen, integrativen Koordinierung von Nutzungsansprüchen an Räume verstanden. Weiter betrachtet kann Raumplanung auch alle Tätigkeiten umfassen, die auf die räumliche Entwicklung der Gesellschaft, der Wirtschaft und der natürlichen, gebauten und sozialen Umwelt in einem definierten Gebiet Einfluss haben. Aus fachwissenschaftlicher Perspektive ist die Raumplanung der Oberbegriff für die integrative, überfachliche Planung auf den drei Ebenen: Bundesraumordnung, Landes-/ Regional- und kommunale Raumplanung, wobei es vor allem um die

Koordination unterschiedlicher und teils konkurrierender (Flächen-) Nutzungsansprüche im Raum geht (Danielzyk & Münter, 2018).

Die Leitvorstellung der Raumordnung ist nach § 1 (1) Nummer 1 Satz 1 ROG, die unterschiedlichen „Anforderungen an den Raum aufeinander abzustimmen und die auf der jeweiligen Planungsebene auftretenden Konflikte auszugleichen“. Somit ist nach § 1 (2) Satz 1 ROG „eine nachhaltige Raumentwicklung, die die sozialen und wirtschaftlichen Ansprüche an den Raum mit seinen ökologischen Funktionen in Einklang bringt und zu einer dauerhaften, großräumig ausgewogenen Ordnung mit gleichwertigen Lebensverhältnissen in den Teilräumen führt“. Nach § 2 (2) Nummer 4 Satz 1 ist der Raum unter anderem „in seiner Bedeutung für die Funktionsfähigkeit der Böden und des Wasserhaushalts zu entwickeln, zu sichern oder, soweit erforderlich, möglich und angemessen, wiederherzustellen“ und ebenso „sind Grundwasservorkommen zu schützen“ (§ 2 (2) Nummer 6 Satz 2).

Diese Planungsleitlinien können durch Raumordnungspläne als Ziele oder Grundsätze der Raumordnung konkretisiert und in der nachfolgenden Bauleitplanung detailliert werden. Ein Instrument zur Sicherung der Trinkwassergewinnung ist das Festlegen von Vorranggebieten durch die zuständigen Behörden der Länder, in denen „für bestimmte raumbedeutsame Funktionen oder Nutzungen, wie bspw. der Trinkwassergewinnung, andere Nutzungen vollständig ausgeschlossen werden“ (nach § 7 (3) Nummer 1 Satz 1 ROG) oder „bestimmten raumbedeutsamen Funktionen oder Nutzungen (z. B. Trinkwassergewinnung) ein besonderes Gewicht“ (nach § 7 (3) Nummer 2 Satz 1 ROG) beigemessen wird.

Diese genannten Instrumente der Raumordnung sind behördenverbindlich, was bedeutet, dass bspw. Landeigentümer*innen oder Wirtschaftsvertreter*innen nur indirekt, durch z. B. Baugenehmigungen, Einfluss nehmen können. Strategische Entscheidungen und Richtungen werden durch politische Vertreter*innen und Gremien vorgegeben. Somit ist die Raumplanung an politischen Zielen orientiert und trifft keine selbstständigen Grundsatzentscheidungen. Nutzungskonflikte involvieren eine Vielzahl von Akteuren und Stakeholdern, die in dem Prozess mitgedacht werden müssen (BMU, 2019).




11.3.2 Transportoptionen Wasserstoff

Bezogen auf Bremen ist eine limitierte Menge an geeignetem Wasser ohne Aufbereitungsaufwand für die Nutzung von Elektrolyseuren erkennbar. Die provisorische Hochrechnung des Wasserbedarfes für die vollständige CO₂-Neutralisation des Bremer Stahlwerkes zeigt auf, dass vor dem Hintergrund des ohnehin größtenteils aus dem Umland bezogenen Trinkwassers die Errichtung einer größeren Elektrolyseuranlage vor Ort nicht realisierbar erscheint (siehe Abschnitt 9.2.2). Dementsprechend ist eine Verlegung des Ortes hin zu den Küstenregionen und damit direkt zu den Offshore

Windenergieanlagen als Grünstrom-Produzent*innen möglich. Folglich ist eine logistische Regelung für den Rücktransport des Wasserstoffes notwendig.

Es existieren vielfältige Optionen für den Import von Wasserstoff, welche anhand des Einsatzzweckes, dem Zeithorizont der Umsetzung und den geografisch-politischen Gegebenheiten differenziert zu bewerten sind. Man unterscheidet zwischen Wasserstoff in Reinform (gasförmig oder flüssig) und chemisch gebundenem an eine Trägersubstanz wie an flüssige organische Wasserstoffträger (LOHC) (SCI4climate.NRW, 2021). Wichtige Kriterien sind die Distanz und der Wirkungsgrad bezogen auf den eingesetzten Wasserstoff (Stemmler, 2022).

In Abbildung 67 sind die möglichen Transportoptionen und deren Potenzial beziehungsweise Entwicklungsstand hinsichtlich großskaliger Importe von Wasserstoff nach Deutschland im Jahr 2030 aufgezeigt. Die grünliche Färbung steht für eine prinzipielle Machbarkeit, wohingegen Gelb eine eingeschränkte Machbarkeit durch ein nicht ausreichendes Mengenpotenzial oder anderer ungünstiger Anforderungen darstellt. Die Farbe Orange kennzeichnet eine unwahrscheinliche Eintrittswahrscheinlichkeit bis zum Jahr 2030 und in Magenta sind die Optionen eingefärbt, auf die im Jahr 2030 definitiv nicht zurückgegriffen werden kann.

	 Pipeline	 Schiff	 LKW
Beimischung		-	-
H ₂ (g)	vereinzelt	-	
H ₂ (l)	-		
LOHC	-		
Ammoniak	unwahrscheinlich		

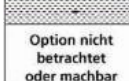




				
Option nicht betrachtet oder machbar	machbar	eingeschränkt machbar	unwahrscheinlich	nicht bis 2030 realisierbar

Abbildung 67: Transportoptionen und deren Potenzial/ Entwicklungsstand im Jahr 2030 (SCI4climate.NRW, 2021).

Es ist erkennbar, dass der Import von Wasserstoff im Jahr 2030 möglich, jedoch nur per LKW realisierbar ist. Folglich würde die Anzahl nötiger Transportfahrten ansteigen, im Falle von komprimiertem Wasserstoff bis zu 2,5 Mio. Fahrten pro Jahr, und damit die Umweltbilanzierung von Wasserstoff verschlechtern. Es gibt einige Einschränkungen beim Transport mit dem LKW, wie bspw. hinsichtlich der Straßenverkehrsordnung und damit verbundene Gewichtseinschränkungen. Mit zunehmender Transportdistanz steigen ebenso die Kosten des Transports. Mit Flüssigwasserstoff und Ammoniak könnten je LKW die größten Mengen transportiert werden, aber aktuelle Verflüssigungskapazitäten und Ammoniakherstellungsanlagen stellen bei dem Zeithorizont 2030 die limitierende Größe dar (SCI4climate.NRW, 2021).

Im Bereich der Kostenstruktur ist ebenso bei den Pipelines der Transportaufwand dominierend und bei dem Transport mittels Schiffs der Umwandlungsprozess. Daneben ist die relevante Kostenposition für alle Transportoptionen der Wasserstoff selbst. Bei der Entscheidungsfindung sollte die Effizienz ausschlaggebend sein, die direkt den Bedarf an erneuerbarer Stromerzeugung im Exportland beeinflusst (Stemmler, 2022).

Die Analysen geben die Handlungsempfehlung vor, dass sich besonders bis zum Jahr 2030 verstärkt auf eine einheimische und damit verbrauchsnahe Erzeugung fokussiert werden sollte, um die Transportdistanzen zu minimieren (SCI4climate.NRW, 2021).

11.3.3 Wasseraufbereitung

Die Nutzbarkeit von aufbereitetem Wasser orientiert sich an der notwendigen Wasserqualität für die Energiebereitstellungstechnologien. (UBA, 2020a)

Laut Kapitel 2 Abschnitt 2 § 54 (1) Nummer 1-2 WHG ist Abwasser, „das durch häuslichen, gewerblichen, landwirtschaftlichen oder sonstigen Gebrauch in seinen Eigenschaften veränderte Wasser und das bei Trockenwetter damit zusammen abfließende Wasser (Schmutzwasser) sowie das von Niederschlägen aus dem Bereich von bebauten oder befestigten Flächen gesammelt abfließende Wasser (Niederschlagswasser)“.

In den folgenden Abschnitten wird die Abwasseraufbereitung, aber auch die Entsalzungstechniken betrachtet und aktuelle neue Innovationen in den beiden Bereichen mit Synergien zu EE aufgelistet.

11.3.3.1 Abwasseraufbereitung

Als große Wassernutzer gelten die Energiewirtschaft, die Landwirtschaft, der urbane Raum, aber auch der Industriesektor. Durch limitierte Wasserressourcen und vor dem Hintergrund des Aktionsplanes der EU zur Kreislaufwirtschaft (Stichwort Circular Economy) ist die Kreislaufführung von industriell genutztem Wasser ein aktiver Part in effizienter Ressourcennutzung. Der Fachbegriff aus industrieller Sicht ist Integrated Water Resources Management (IWRM) und umfasst sämtliche, meist überregionale Nutzungsinteressen und Aktivitäten, die sich auf die Wasserhaushalte auswirken können (BMZ, o.D.; Becker et al., 2019).

Der Fokus lag bei der Behandlung und Entsorgung und wird zunehmend hin zu Wiederverwendung, Recycling und Ressourcenrückgewinnung erweitert. Positive Nebeneffekte sind die Erhöhung der Kosteneffizienz und das Erschaffen neuer Wirtschaftsbereiche durch die Rückgewinnung von Nebenprodukten. Die aktuelle Relevanz zeigt sich darin, dass unter dem Titel „Kreislaufführung von industriell genutztem Wasser“ durch das BMBF bereits sieben Verbundprojekte gefördert werden, die

bereits einige Forschungsergebnisse für bestimmte Industriezweige vorweisen können, zu denen die Energiewirtschaft jedoch nicht zählt (DECHEMA e.V., 2022).

Im Bereich der Energiewirtschaft ist der Energieverbrauch innerhalb der Abwasserbehandlung mitzudenken, da die Energie dafür erneut produziert werden muss. Dementsprechend sind für die Bilanz die Energieeinsparungen und die simultane Energiegewinnung relevant, die insgesamt 10 - 20 % Strom aus anderen Quellen einsparen könnten. Beispielsweise zeigt die Energieproduktion aus Abwasser (Klärgas) ein Plus von um die 1 - 2 % jährlich (BMU, 2021).

Auch in der öffentlichen Wasserversorgung kann der Stromverbrauch deutlich reduziert werden und es werden Einsparpotenziale von 25 % und mehr prognostiziert. Bisher wurde dies nicht vollständig ausgenutzt und der mittlere Stromverbrauch von Kläranlagen sank von 4,2 TWh im Jahr 2006 auf rund 3,8 TWh im Jahr 2016, also um knapp 10 %. Gleichzeitig ist das prognostizierte Steigerungspotenzial bei der Eigenstromproduktion in Kläranlagen über 300 %. Kläranlagen haben somit die Möglichkeit, aus eigenen Ressourcen einen Großteil ihres Strombedarfs selbst zu decken oder teilweise auch Stromüberschüsse zu erwirtschaften. Unter anderem kann ein relevanter Beitrag zur bedarfsgerechten Entlastung und Stabilisierung von Stromnetzen geleistet werden. Klärgas ist als eine flexibel einsetzbare erneuerbare Ressource anzusehen mit vielen Anwendungsbereichen, wie im Wärme- und Kältesektor sowie im Transportsektor. Im Elektrizitätssektor liegt das ungenutzte Potenzial bei ungefähr 2 TWh jährlich (UBA, 2018). Die Bio-Brennstoffzelle auf Kläranlagen repräsentiert ein Verfahren zur Energiegewinnung bei der Abwasserbehandlung, bei der durch Mikroorganismen elektrische Energie direkt aus organischen Stoffen produziert wird. Ein Nebeneffekt ist die Teilreinigung des Abwassers. PtG-Möglichkeiten ergeben sich durch die mikrobiellen Elektrolysezellen, welche Wasserstoff und darauf basierend in Nachfolgeprozessen z.B. Methanol erzeugen (BMBF, 2018).

Der Stromverbrauch von Trinkwasserversorgung und Abwasserbehandlung in Deutschland beträgt 6,6 TWh jährlich, was ungefähr dem Stromverbrauch von 2 Mio. privaten Haushalten entspricht. Eine Energieoptimierung in den Anlagen der Trinkwasseraufbereitung und -verteilung muss unbedingt Risiken der Qualitätssicherung, wie in der Versorgungssicherheit, ausschließen. Mögliche Maßnahmen sind die Druckzonenoptimierung und Netzentkoppelung, die Stromeinsparungen von 10 bis 15 % und in Einzelfällen sogar bis über 60 % möglich machen könnten (BMBF, 2018).

Eine Innovation des Unternehmens Graforce ist das berührungslose Verfahren zur Herstellung grünen Wasserstoffes, bei dem ein hochfrequentes Plasmafeld zu einer Aufspaltung der Wassermoleküle führt, genannt Plasmalyse. Neben dem Aufspalten des Wassers erfolgt simultan gleiches mit Stickstoffmolekülen und es kommt zu neuen Verbindungen. Über eine Membran werden die Gase sortiert. Sauerstoff wird an die Luft abgegeben und die übrigen Gase werden in Tanks gespeichert. Das

Resultat ist gereinigtes Wasser und zur Weiterverarbeitung mögliche gespeicherte Gase, wie Wasserstoff, Methan, CO₂ und Stickstoff. Statt vorgereinigtem Wasser kann Abwasser verwendet werden und das bei höherer Energieausbeute und das Wasser ist nach der Plasmalyse sauberer, wodurch eine Rückführung in den natürlichen Kreislauf möglich ist. In Berlin steht seit 2018 eine Pilotanlage für die industrielle Erprobung (BDEW, 2020).

Industrielle Prozessabwässer zeigen meist eine hohe Konzentration an Verunreinigungen auf, wodurch die biologische Abwasseraufbereitung meist nicht ausreicht. Die Belastungen sind zu hoch für verbreitete Reinigungsverfahren. Eine Innovation ist ein elektrochemisches Reinigungsverfahren unter der Verwendung von Diamantelektroden. In Versuchsreihen konnte bewiesen werden, dass die organische Belastung durch die elektrochemische Behandlung nahezu vollständig (99 %) aufgelöst wurde. Die Diamantelektroden erzeugen Radikalverbindungen mit einem sehr hohen Oxidationspotential, was auch zu einer Oxidation von allen organischen Verbindungen zu CO₂ und Wasser führt. Aktuell benötigt der Prozess einen hohen Energieeinsatz. Als Nebenprodukt im Reinigungsprozess entsteht ein Elektrolysegas, welches einen Wasserstoffanteil von bis zu 60 % hat und vielseitig weiterverwendet werden kann (Völker, 2020).

Ein weiterer innovativer Ansatz ist die Verwertung industrieller Reststoffe mittels der dunklen Fermentation. In einer zweistufigen Versuchsanlage wird seit Anfang des Jahres 2022 aus Abwässern aus der Nahrungsmittelbranche mit hohem Anteil von Stärke und Zucker Wasserstoff und, nachgeschaltet als Folgeprodukt, auch Methan gewonnen. Ziel der Forschung ist die Einbindung der dunklen Fermentation in ihre Abwasserbehandlung (wegewerk GmbH, 2022).

11.3.3.2 Entsalzungsverfahren

In einer Welt mit steigender Süßwasserknappheit ist die Entsalzung von Wasser zentrales Thema, um der Wasserkrise entgegenzuwirken, da Meerwasser die größte Wasserquelle auf der Erde darstellt (Ding & Ho, 2021), genauer gesagt zwei Drittel (Panagopoulos, 2021). Dadurch kann Meerwasser als unlimitierte Ressource betrachtet werden. Eine zweite und dritte Wasserquelle stellen Brack- und geothermales Wasser dar, welches meist in Untergrundquellen zu finden ist (Bundschuh et al., 2021).

Auch für die Wasserstoffherstellung sind hohe Gütewerte entscheidend und dies kann entweder durch aufbereitetes Oberflächen-, Grundwasser oder durch entsalztes Meerwasser gewährleistet werden (UBA, 2020a).

Es existieren aktuell zwei Oberkategorien für Entsalzungstechnologien, die thermalbasierten, phasenändernden und die membranbasierten, nicht-phasenändernden Technologien beziehungsweise Prozesse. Erstere imitieren den natürlichen Wasserprozess der Verdunstung und Kondensation und letztere arbeiten druckgesteuert und operieren mit gezielter Einschränkung der

Bewegung spezifischer Ionen durch semipermeable Membranen. Die Klassifizierung ist der Abbildung 68 zu entnehmen. Thermalbasierte Technologien sind die mehrstufige Destillation (MSF), Multi-Effekt Destillation (MED), Solekonzentrator (BC), Solekristallisator (BCr), eutektische Gefrierkristallisation (EFC), windunterstützte intensivierte Verdunstung (WAIV) und Sprühtrockner (SD). Zu den membranbasierten Technologien zählen Umkehrosmose (RO), Nanofiltration (NF), Elektrodialyse (ED), umgekehrte Elektrodialyse (EDR), Hochdruck-Umkehrosmose (HPRO), Vorwärtsosmose (FO), osmotisch assistierte Umkehrosmose (OARO), Membrandestillation (MD), Membrankristallisation (MCR) und Elektrodialyse Methathesis (EDM) (Panagopoulos, 2021).

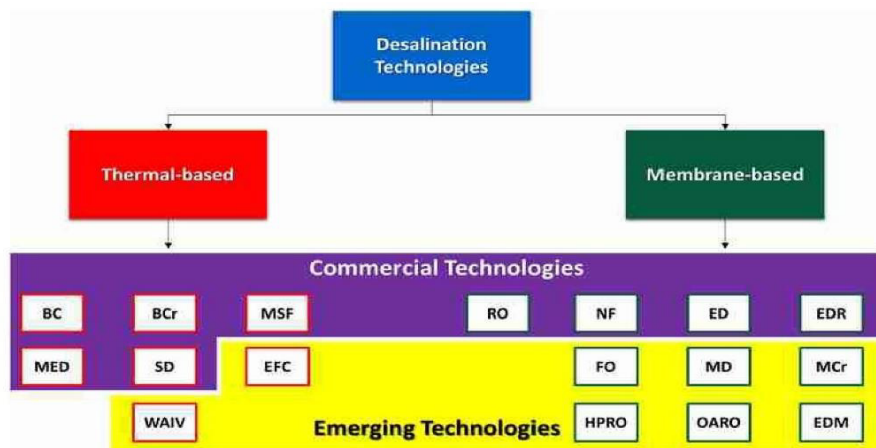


Abbildung 68: Klassifizierung Entsalzungstechnologien (Panagopoulos, 2021).

Generell benötigen thermalbasierte Technologien Thermalenergie und Strom, wohingegen membranbasierte Technologien nur Strom als Ausgangsvoraussetzung aufweisen (Panagopoulos, 2021). Folglich sind letztere besonders interessant für Innovationen in Kombination mit EE. Die zwei konventionellen Verfahren der Umkehrosmose und die Membrandestillation werden im Folgenden kurz erläutert und im Anschluss aktuelle Synergie-Technologien aufgezeigt.

Die Umkehrosmose dient der Meerwasser-Entsalzung (UBA, 2020a). Es gehört zu den Membranfiltrationsverfahren, da eine semipermeable Membran für die Reinigung verwendet wird. Dabei werden Partikel, wie bspw. Salze mit einer Größe bis 1 nm, eliminiert und dies bei einem notwendigen Betriebsdruck von 10 bis 15 bar je Salzgehalt (Baur et al., 2019). Ohne äußere Einwirkung würde es zum Konzentrationsausgleich hin zu der Seite mit niedrigerer Ionenkonzentration kommen, was die Diffusion des Wassers hervorruft. Bei dem Prozess übertrifft jedoch ein künstlich erzeugter Druck den natürlichen osmotischen Druck, wobei das Wasser durch die Membran diffundiert. Auf der anderen Seite verbleiben somit die gelösten Ionen im Konzentrat zurück und dieses mit Salz angereicherte Konzentrat wird kontinuierlich abgelassen. Eine Aufbereitung des Wassers vor der Umkehrosmose ist notwendig, um Ablagerungen an der Membran zu vermeiden (Wiedenmannott, 2017).

Die konventionelle Methode der Entsalzung, die Umkehrosmose, ist sehr energieintensiv und hat nur eine geringe Wasserrückführung durch hohe Salzkonzentrationen der Lake (Ding & Ho, 2021).

Eine zweite Option für die Entsalzung ist die Membrandestillation, die zu den thermischen Trennverfahren zählt und zwei Flüssigkeiten unterschiedlicher Temperatur teilt. Dafür wird eine hydrophobe und poröse Membran verwendet (Dietrich, 2017). Bei diesem Verfahren ist die treibende Kraft des Stofftransports die spezifische Dampfdruckdifferenz zwischen Feed- und Destillatseite, die durch die Temperaturunterschiede entsteht und mittels der Antoine-Gleichung bestimmt werden kann. Die Membran lässt nur dampfförmige Anteile durch. Das flüssige Wasser, gelöste Bestandteile und Partikel mit einer Größe über dem Porendurchmesser, sammeln sich auf der Feedseite. Auf der Destillatseite herrscht ein geringeres Temperaturniveau, was zur Kondensation führt (Nellessen et al., 2021).

Verglichen mit der Umkehrosmose gibt es keine Begrenzung durch den osmotischen Druck und es bietet sich die Möglichkeit, dass theoretisch 100 % reines Wasser abgetrennt werden (Nellessen et al., 2021). Damit weist das Verfahren eine höhere Wasser-Rückführungsrate auf, wobei nachteilig die Temperaturpolarisation und damit die hohen Elektrizitätskosten zu nennen sind (Ding & Ho, 2021).

Neben den Hauptprozessen gibt es weitere Restentsalzungsverfahren, bspw. die Elektrode-Ionisation, angewendet nach der Umkehrosmose, bei der 99,9 % der Ionen entfernt werden und eine Elektrodialyse mit einem Ionenaustauscher kombiniert wird (Wiedenmannott, 2017). Ebenso als Restentsalzungsstufe dient der Mischbetaustauscher, der nach einem Ionenaustauscher oder nach der Umkehrosmose geschaltet werden kann (Wilhelm, 2008).

11.3.3.3 Synergie-Technologien

Die Wechselwirkungen von Wasser und Energie hat signifikante Folgen für die jeweilige Verfügbarkeit und Sicherheit. Trotzdem werden heutzutage die Energietechnologien und die Wasserproblematik weitgehend unabhängig voneinander betrachtet. Für eine Entwicklung hin zu Synergien, sind integrierte Lösungen notwendig. Solarenergie ist eine Möglichkeit, einen nachhaltigen Energie-Wasser-Nexus zu erreichen. Die Solarstrahlung als Energiequelle hält vielseitige Möglichkeiten für die Entsalzungsverfahren vor dem Hintergrund der wachsenden Wasserarmut und limitierter fossiler Energieressourcen bereit (Ding & Ho, 2021).

Wie bereits erwähnt, ist die Umkehrosmose eine sehr energieeffiziente Option zur Meerwasserentsalzung. Mit der Voraussetzung, dass nur elektrische Energie notwendig ist, bietet sich eine Kombination von Umkehrosmose- und PV-Anlagen an. Diese Synergie ist ein Lösungsansatz zu einer energieautarken Brack- und Meerwasserentsalzung, da das solare Strahlungsangebot in vor ariden und semiariden Gebieten, die meist stark von Trinkwasserknappheit betroffen sind, sehr hoch ist (Sanna et al., 2019).

Eine weitere Synergie ergibt sich aus Membrandestillation und photothermischer Destillation zu einem nachhaltigen Entsalzungsprozess, der photothermischen Membrandestillation. Es wird Sonnenlicht genutzt, um eine lokale Erwärmung auf der Speisewasser-Membran-Schnittstelle zu generieren und produziert dabei ohne zusätzlichen Strombedarf Frischwasser. Auch PV nutzt das Sonnenlicht als Energiequelle, wobei bei halbdurchlässigen Panels jedoch nur kurzwellige Photonen für die Stromerzeugung genutzt werden und langwellige dagegen in Wärme resultieren. Diese Abwärme lässt den Alterungsprozess der Anlage schneller ablaufen und schwächt die Effizienz des Panels. Für das Nutzen des gesamten solaren Spektrums ist die Entwicklung eines Systems von photothermischer Destillation und PV zielführend. In dem hybriden Ansatz werden hochenergetische, kurzwellige Photonen für die PV-Zelle verwendet und die anderen niedrigerenergetischen für die Thermalenergie genutzt, die dann in dem Entsalzungsprozess zum Einsatz kommen, wie in Abbildung 69 zu sehen ist. Neben der Produktion von Frischwasser, wird simultan die Kühlung des PV Panels gewährleistet (Ding & Ho, 2021).

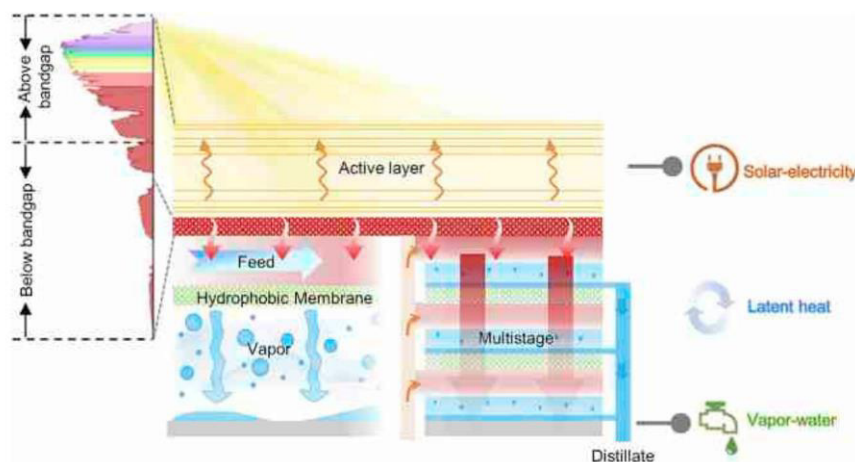


Abbildung 69: Schematische Illustration der selektiven Nutzung des gesamten solaren Spektrums (Ding & Ho, 2021).

Die PV-Zelle ist dabei auf dem Destillator platziert, um die kurzwelligen Photonen zu filtern und die langwelligen durchzulassen. Durch das Integrieren von einem mehrstufigen Querstrom-Membrandestillator kann das latente Wärmerecycling weitgehend verbessert werden. Es wurden bereits mehrere Entwicklungsstufen und Praxistests vollzogen. Der aktuelle Engpass der Innovation liegt in den kostspieligen Ionenaustauschmembranen (Ding & Ho, 2021).

Eine umfassende Studie von Bundschuh et al. und weitere Forschungsprojekte unter der BMBF-Fördermaßnahme „Zukunftsfähige Technologien und Konzepte zur Erhöhung der Wasserverfügbarkeit durch Wasserwiederverwendung und Entsalzung“ (WavE) herausgegeben von DECHEMA e.V. haben gezeigt, dass auch weitere erneuerbare und alternative Technologien neben der solaren Energie als Quelle erfolgreich mit verschiedenen Entsalzungsmethoden kombiniert werden können.

11.3.4 Betroffenheit nach Sektoren

Anpassungsmaßnahmen bezogen auf den Klimawandel in den vier Themenkomplexen Wasserwirtschaft, der Land-/Forstwirtschaft, der Energiewirtschaft sowie in Städten sind mehrfach untersucht und dokumentiert, wie in Abbildung 70 ersichtlich ist. Es sind die relative und absolute Häufigkeit von Textverweisen auf Ereignisse, die in der Literatur beschrieben wurden, angegeben.

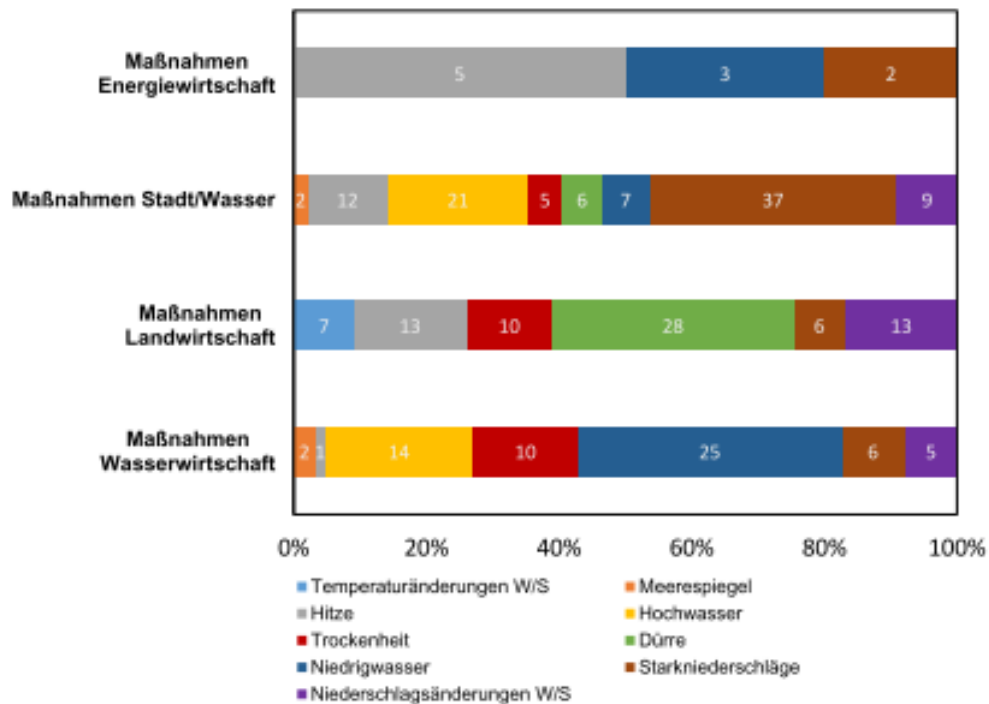


Abbildung 70: Relative (in %) und absolute (in Zahlen) Häufigkeit von Textverweisen auf Ereignisse, die in der Literatur beschrieben wurden und mit geplanten oder bereits umgesetzten Maßnahmen verknüpft sind (IWW, 2019).

Es ist erkennbar, dass die Anpassungsmaßnahmen meist auf Extremereignisse wie Starkniederschläge bezogen sind und seltener auf Effekte, die durch ein sich langsam und stetig wandelndes Klima ergeben, wie bspw. Trockenheit. Maßnahmen für die Wasserwirtschaft sind zum einen das Setzen eines Wasserversorgungskonzeptes als übergeordnete Planungsgrundlage, aber auch das Aufstellen von Notfallvorsorgeplänen. Weitere Optionen sind Nutzungseinschränkungen von Wasser und das Einführen von Tarifmodellen.

Dabei ist die letzte Maßnahme mit einem geringen Konfliktpotential verbunden. Eine Ausweitung von bestehenden Schutzzonen und/ oder von Wasserrechten können zu Konflikten mit der Landwirtschaft, der Ökologie und mit der Stadtplanung führen. Sinkende Pegelstände zeigen ein erhöhtes Konfliktpotential mit der Energiewirtschaft durch Laufwasser-KW und Transport von Rohstoffen. In der Wechselbeziehung von Energie- und Wasserwirtschaft ist die Hauptanpassungsmaßnahme an die steigenden Temperaturen eine steigende Entnahme von Wasser aus Oberflächengewässern zu Kühlzwecken, wenn keine Alternativen zur Kühlung möglich sind. Bei Niedrigwassersituation ergibt sich erneut Spannungspotential mit der von dem Fließgewässer abhängigen Wassergewinnung. Dazu zählt

die Drosselung von thermischen KW, wenn die Kühlung nicht bereitgestellt werden kann. Im Gegenzug ist die Errichtung solcher Seen ausschlaggebend für eine Veränderung des Abflussgeschehens in ein Fließgewässer. Dementsprechend muss ein Niedrigwassermanagement integriert werden. Bei der Innovation von Kühltechnologien, die nicht oder in verringertem Maße Wasser gebrauchen, müssen die Notwasseranschlüsse für KW bei Trockenperioden mit bedacht werden. Eine weitere Option ist die Entnahme von Wasser aus dem Leitungsnetz, besonders für produzierendes Gewerbe, wodurch es zu Problemen bei kritischer Wasserversorgung kommen kann (IWW, 2019).

Bei der Umgestaltung des Energiesystems aufgrund der Klimakrise sind die Wasservorkommen an den Standorten zu untersuchen und zu analysieren, ob die Verfügbarkeit von Wasser zu einem limitierenden Faktor wird. Des Weiteren ist die benötigte Wasserqualität, einschließlich des dafür notwendigen Aufwands zur Rohwasser- und Abwasseraufbereitung, nicht zu vernachlässigen (Bormann et al., 2019).

Für wasserwirtschaftliche Planungen im Einklang mit der Energiewirtschaft ist ein integraler Ansatz zu wählen, der sich nicht nur auf Fachplanungen bezieht, sondern auch die Notwendigkeit und den hohen Nutzen der aktiven Einbindung der Bevölkerung berücksichtigt. Dementsprechend sind notwendige Aufbereitungen von Daten und eine klare und verständliche Kommunikation, basierend auf fundierten wissenschaftlichen Grundlagen und unter Nutzung modernster Technologien, von Nöten. Die Basis für die Entscheidungen ist eine hohe Güte der Datengrundlage (Neuhold, 2022).

12. Fazit der Forschungsarbeit

Im Fazit der Forschungsarbeit werden die generierten Ergebnisse in Bezug auf die Forschungsfragen und das Leitthema zusammengefasst. Außerdem wird eine kritische Würdigung von Forschungsergebnissen und Rahmenbedingungen vorgenommen sowie ein Ausblick für weitere Forschungsthematiken gegeben.

12.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Mit der Leitfrage der Masterarbeit wird untersucht, ob die angestrebten Ausbauziele für die Energiewirtschaft vereinbar mit der Wasserverfügbarkeit in Deutschland sind und welche Folgen sich aus der Energiewende unter Einbezug der Klimafolgen ergeben.

Zuerst wird der aktuelle Stand der Energieversorgung in Deutschland abgebildet, um einen Vergleichswert zu haben. Die nutzbare Endenergie entspricht nicht der dafür notwendigen bereitzustellenden Energiemenge und ausgehend von den Primärenergieträgern erfolgen diverse Umwandlungsschritte bis hin zur Anwendung in verschiedenen Sektoren. In absoluten Zahlen erhöht sich der Primärenergieverbrauch von Deutschland im Jahr 2021 um 2,6 %, verglichen mit dem Vorjahr. EE sind mit einem Anteil von 16 % vertreten, während der größte Teil der Primärenergie aus fossilen Brennstoffen wie Erdgas und Erdöl bezogen wird. Ähnliche Verhältnisse zeigen sich auch bei der Untersuchung des Wärmesektors und des Stromsektors. Es existieren diverse Prognosen, welche die Ausbaupfade hin zur angestrebten Klimaneutralität im Jahr 2045 der Bundesrepublik aufzeigen, wobei dies über die Begrenzung der zu emittierenden THGs erfolgt. Generell ist für die Umsetzung der Energiewende die Verwendung von Technologien notwendig, die weniger CO₂ in ihrer Produktion emittieren, was auf EE zutrifft. Sie weisen sogar eine positive Wirkung gegenüber dem Treibhauseffekt auf, wohingegen fossile Energieressourcen eine maßgebliche Umweltbelastung aufgrund ihrer Emissionen darstellen.

Für eine Abschätzung der Klimafolgen sind die klimatischen Rahmenbedingungen zu betrachten. Es zeigen sich Entwicklungen in Form von Verschiebungen von Temperatur- und Niederschlagswerten, dessen Auswirkungen sich den kommenden Jahrzehnten noch verstärken. Besonders kritisch für die Energieerzeugung sind die Verfügbarkeit und Temperatur von Wasser, bspw. zur Kühlung der KW. Die Ressource Wasser ist für fossile und erneuerbare Energiebereitstellungstechnologien relevant und der Klimawandel verändert grundlegend die Verfügbarkeit der Wasserressourcen weltweit. Die Verringerung des nutzbaren Wasserdargebots aufgrund von Klimafolgen wird auf 30 bis 60 % geschätzt.

Als Wasserverfügbarkeit in Deutschland werden ungefähr 188 Mrd. km³ an Süßwasser pro Jahr angegeben und damit gilt es als wasserreiches Land. Die Verteilung ist jedoch regional sehr

unterschiedlich, besonders in Zentraldeutschland sind wenig ergiebige Quellen vorzufinden. Neben der Wassermenge ist ebenso die Qualität für die weitere Verwendung entscheidend. Betrachtet man den chemischen Zustand ist ein deutliches Defizit in einigen Regionen, verteilt über ganz Deutschland, sichtbar, wobei besonders der Nordwesten betroffen ist.

Die Wassergewinnung in Deutschland variiert nach den Wasserarten Grund- und Quellwasser, Uferfiltrat und Oberflächenwasser, wobei in absoluten Zahlen Grundwasser mit 62,4 % die wichtigste Wasserquelle darstellt. Der Wassernutzungsindex wird gebildet aus dem Verhältnis der gesamten Wasserentnahme des betrachteten Jahres zum langjährigen Wasserdargebot in Deutschland. Seit dem Jahr 2002 ist die Schwelle des Wasserstress unterschritten. Wasserknappheiten ergeben sich aus dem Zusammenspiel des natürlichen Wasserangebots und der gesellschaftlichen und industriellen Wassernachfrage.

Energie- und Wasserwirtschaft können nicht einzeln betrachtet werden, da sie in vielerlei Hinsicht miteinander verknüpft sind und in Wechselwirkungen zueinanderstehen. Die Entwicklung von Wasserangebot und -nachfrage ist entscheidend, da der Rohstoff Wasser zum begrenzenden Faktor für alle Sektoren, auch der Energiewirtschaft, werden kann. Der Energie-Wasser-Nexus gibt Antworten auf die erste Forschungsfrage, wie sich der Wasserbedarf auf Basis der aktuellen Energieerzeugung gestaltet. Die These ist, dass der Wasserbedarf für die Erzeugung von Energie einen Großteil des verfügbaren deutschen Wasservolumen beansprucht. Im Jahr 2019 wurden 42 % (20 Mrd. m³) der Wasserentnahme für die Energieversorgung benötigt, wodurch dieser Sektor der größte Wassernutzer ist. Größtenteils wird das Wasser für Kühlsysteme verwendet und überwiegend aus Flüssen, aber auch aus Seen und Talsperren sowie aus Uferfiltrat und Grundwasser entnommen. Neben den Kühlprozessen gibt es weitere Schnittstellen zwischen der Wasser- und Energiewirtschaft. Es wird bspw. Prozesswasser für die Industrie genutzt, aber auch Strom für die Wasserverteilung benötigt.

Der Wasserbedarf hängt von drei wesentlichen Faktoren ab, der Energiequelle und der Energiebereitstellungstechnologie, dem Kühlsystem für das KW und der Wassernutzungsintensität. Über den gesamten Energieprozess vom Energieträger bis hin zu Endkonsument*innen sind die einzelnen relevant für den gesamten Wasserbedarf einer Energiebereitstellungstechnologie. In der Literatur existieren diverse Angaben für den Wasserbedarf von Energiebereitstellungstechnologien. Man unterscheidet beim Wasserbedarf zwischen der Nutzung und dem Verbrauch mit dem Unterschied, das genutzte Wasser wieder zurück in den Wasserkreislauf geleitet wird und verbrauchtes Wasser hingegen nicht.

Die formulierte These, dass der Wasserbedarf für die Erzeugung von Energie einen Großteil des verfügbaren deutschen Wasservolumen beansprucht, ist somit verifiziert, da die Energieproduktion den größten Anteil, wenn auch unter 50 %, ausmacht.

Die zweite Forschungsfrage zielt auf die Wasserbedarfsmengen ab und welche davon der regenerativen und fossilen Energiewirtschaft zuzuordnen sind. Die aufgestellte Hypothese: Erneuerbare Energiebereitstellungstechnologien benötigen weniger Wasser als vergleichbare fossile. Für die Untersuchung wurde sich auf die gewählte Beispielregion Bremen, bezogen auf aquatische Kennzahlen für die Energieträger Steinkohle, Biomasse/ Abfall und Wasserkraft, generiert auf Basis der Verbrauchsdaten der KW. Den größten Wasserbedarf unter den fossilen Energiequellen haben Steinkohle-KW, dicht gefolgt von Erdgas. Im Bereich der EE zeigt die Biomasse ein sehr diverses Spektrum an Wasserbedarf auf und das Wasserlauf-KW verbraucht kein Wasser, nutzt jedoch große Mengen. Sowohl genutztes als auch verbrauchtes Wasser sind im Jahr 2019 in Bremen zu über 95 % auf fossile Energieträger zurückzuführen.

Aufgrund der kleinen Datengrundlage wurde zusätzlich eine Literaturanalyse durchgeführt mit dem Ergebnis, dass im KW-Betrieb die Energieproduktion auf Basis von Kernkraft und Kohle am meisten Wasser verbraucht. Aber auch Geothermie, Biomasse, Erdgas und PtX sind leicht dahinter einzuordnen. Die Wasserkraft benötigt im KW-Betrieb laut der verfügbaren Quellen kein oder nur wenig Wasser. Eine Schlüsselrolle wird dem Wasserstoff zugeschrieben, für dessen Bereitstellung Wasser als Edukt notwendig ist. Im Idealzustand ist eine Menge von 8,94 kg Wasser für 1 kg Wasserstoff notwendig. In der Praxis, je nach Art des Elektrolyseurs, variiert diese Zahl von 9,4 bis 14,4 kg. Bereits die aufgezeigte Tendenz zeichnet eine große Wasserverbrauchsmenge ab. Im Bereich der Wassernutzung ist erneut die Kernkraft führend, dicht gefolgt von der Kohle, Erdöl und -gas sowie Biomasse und Geothermie. Für Wind, PV, PtX und Wasserkraft sind nur marginale Werte aufgezeigt. Deutschlandweit betrachtet ist der Wasserbedarf des Energiesektors nahezu vollständig durch fossile Energiebereitstellungstechnologien verursacht. Ebenso die aquatischen Kennzahlen sind im Durchschnitt höher als für erneuerbare Energiebereitstellungstechnologien. Die formulierte Hypothese ist verifiziert.

Die dritte Forschungsfrage lautet: Welche Entwicklungen bezogen auf den Wasserbedarf sind durch die Ausbaustrategien zu erwarten? Es wurde die These aufgestellt, dass der Wasserbedarf in Folge der Ausbaustrategien ansteigen wird. Für die angestrebte Klimaneutralität im Jahr 2045 soll die Energieproduktion nahezu vollständig auf EE basieren und nur geringe Mengen an Erdgas und Mineralöl verwendet werden. Die Prognose zeigt, dass vorrangig Wind- und Solarkraft eingesetzt werden, die laut Kenndaten aus der Literatur nahezu kein Wasser im Betrieb nutzen oder verbrauchen. Insgesamt sinkt die benötigte Gesamtwassermenge bezogen auf die Nutzung um rund 88 %, verglichen mit dem Jahr 2021 (ohne Einbezug der Wasserkraft), der Wasserverbrauch verringert sich um gute 90 %. Der Wasserbedarf des Energiesektors nimmt stetig ab. Von den Wasserentnahmen im Jahr 2015 hat der Energiesektor einen Anteil 52 % gezeigt, der sich auf 42 % im Jahr 2021 verringert hat. Auch insgesamt werden die Wasserentnahmen in Deutschland abnehmen. Insgesamt rückt der

Wasserbedarf der Energieversorgung hinter die Bedarfe der Wirtschaftssektoren der öffentlichen Wasserversorgung und des verarbeitenden Gewerbes.

Auf Basis der Forschungsergebnisse ist die These, dass der Wasserbedarf in Folge der Ausbaustrategien ansteigen wird, falsifiziert worden, da das Gesamtvolumen laut aktuellen Prognosen sinken wird.

Die vierte Forschungsfrage beschäftigt sich mit den Konfliktsituationen um die Ressource Wasser und fragt nach der Entstehung regionaler Konkurrenzsituationen in der Beispielregion Bremen zwischen Energiebereitstellungstechnologien und wie diese zu bewerten sind. Es wurde angenommen, dass Konkurrenzsituationen bezüglich des Wasserbedarfes in Bremen zwischen den Technologien entstehen, welche regional differenziert zu bewerten sind.

Als Konfliktursachen weltweit sind zum einen die Konkurrenz um Wassermengen, außerdem Konflikte aufgrund der Wasserqualität und Flächennutzungskonkurrenzen zu unterscheiden. In den vergangenen zehn Jahren haben die gerichtlichen Konflikte um Wasser in den meisten Bundesländern Deutschlands zugenommen, teilweise sogar verdoppelt. Prognosen zeigen, dass der Nordosten Deutschlands mehr von Konflikten zwischen Wasserwirtschaft und der Landwirtschaft durch Trockenheit betroffen sein wird. Der Nordwesten, und somit auch Bremen, hingegen wird eine zunehmende Versalzung des Grundwassers durch einen steigenden Meeresspiegel und gleichzeitig steigende Wasserentnahmen erfahren, was sich auf die Wasserversorgung und -nutzung auswirkt. Zu bedenken ist, dass Wasser selten die alleinige Ursache oder der Ursprung von Konflikten ist und weitere Faktoren die Konflikte begünstigen. Lösungsstrategien können technisch, politisch sowie rechtlich-institutionell sein und müssen auf verschiedenen Ebenen entwickelt und umgesetzt werden, da es sich oft um Verteilungs- und Managementprobleme handelt. Dabei sollte systematisch die Nexus-Perspektive zwischen Wasser- und Energiewirtschaft bedacht werden. Durch limitierte Wasserressourcen ist die Kreislaufführung von industriell genutztem Wasser ein wichtiger Part für die effiziente Ressourcennutzung, aber auch für die Entsalzung von Wasser zentral, da Meerwasser die größte Wasserquelle auf der Erde darstellt. Es existieren zahlreiche Forschungsprojekte, die erneuerbare und alternative Technologien erfolgreich mit verschiedenen Abwasseraufbereitungs- und Entsalzungsmethoden kombinieren und Synergieeffekte schaffen.

In der vorliegenden Arbeit konnten keine spezifischen Konfliktsituationen für die Beispielregion Bremen abgegrenzt, aber aufgezeigt werden, dass deutschlandweit die Konkurrenzsituationen des Wasserbedarfes zwischen den Technologien und Industriesektoren entstehen und sich verstärken werden, welche regional differenziert zu untersuchen und zu bewerten sind. Dementsprechend ist die Hypothese auch für Bremen verifiziert, aber nicht im Detail im Rahmen dieser Masterthesis bearbeitet worden.

Die Leitfrage der Forschungsarbeit, ob die angestrebten Ausbauziele für die Energiewirtschaft vereinbar mit der Wasserverfügbarkeit in Deutschland sind und welche Folgen sich aus der Energiewende unter Einbezug der Klimafolgen ergeben, konnte auf Basis der vier Forschungsfragen teilweise beantwortet werden. Neben der rein quantitativen Bewertung wurden die Energiebereitstellungstechnologien qualitativ auf ihre Nachhaltigkeit untersucht. Es zeigt sich, dass EE weniger THG-Emissionen ausstoßen, im Durchschnitt weniger Wasser je Energieeinheit benötigen und einen kleineren Einfluss auf die Wasserqualität durch die Nutzung aufweisen. Ökonomisch betrachtet sind die Schwachstellen die Redundanz, jedoch zeigen erneuerbare Energiebereitstellungstechnologien den Vorteil der Energieunabhängigkeit durch eine geringere Importquote. Aus einem sozialen Betrachtungspunkt sind sie gesellschaftlich akzeptiert und weisen nur ein geringes Konfliktpotential auf, da sie nicht auf endlichen Energiequellen basieren. Somit ist das Ziel der Ausbaupfade, mehr EE zu integrieren, nachhaltiger als der aktuelle Energiemix. Die angestrebten Effizienzsteigerungen und die damit verbundene geringere Energieproduktion führen zusätzlich zu einem niedrigeren Wasserbedarf in absoluten Zahlen. Die Folgen der Klimakrise sind schwer einzugrenzen und hängen stark von den Entwicklungen im nächsten Jahrzehnt ab. Ebenso die Integration von Wasserstoff kann nicht eindeutig im Umfang abgeschätzt werden, wodurch keine Aussage in Bezug auf den Wasserbedarf getroffen werden kann. Für wasserwirtschaftliche Planungen im Einklang mit der Energiewirtschaft ist ein integraler Ansatz zu wählen, der sich sowohl auf Fachplanungen als auch die aktive Einbindung der Bevölkerung stützt. Dementsprechend sind Bedarfsdaten zusammenzutragen und aufzubereiten.

12.2 Diskussion und Ausblick

Die Rahmenbedingungen der vorliegenden Arbeit unterliegen gewissen Unsicherheiten und Abschätzungen, bspw. bezogen auf den Klimawandel und den daraus resultierenden natürlichen Gegebenheiten. Dazu gehört das Wasservorkommen, aber auch die Effizienz von Energiebereitstellungstechnologien bzw. deren Kühlaufwand. Über die Entwicklung des Klimawandels kann nur spekuliert werden, wie die verschiedenen Entwicklungspfade des sechsten Sachstandberichtes des IPCC zeigen.

Eine weitere Rahmenbedingung ist die Unsicherheit bezogen auf die zukünftige Ausrichtung politischer Entscheidungen. Dies zeigt sich zum einen bei Energieprognosen bis hin zur Zielstellung der Klimaneutralität in Deutschland, als auch auf politische Situationen, wie der Krieg Russlands in der Ukraine verdeutlicht. Die Szenarien und Prognosen beschreiben verschiedene, plausible Zukünfte, die durch unvorhersehbare Entwicklungen und Ereignisse geprägt sein können (Flörke et al., 2011).

Ebenso sind die Entwicklungen innovativer Ansätze, wie die vorgestellten Wasserstoffstrategien, deren Ausmaß nicht abzuschätzen ist, wie die verschiedenen Ausprägungen in diversen Klimaschutzenszenarien

zeigen (SCI4climate.NRW, 2022). Die Wasserstoffszenarien sind keine Vorhersage der Zukunft und bilden nur mögliche Entwicklungen und techno-ökonomische Pfade unter verschiedenen Annahmen und Unsicherheiten ab (Fraunhofer ISI et al.).

Für die Feststellung der Belastbarkeit der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit ist die Datengüte zu bestimmen. Es wird sowohl für den Wasserbedarf für Bremen als auch für Deutschland vorgenommen und dabei die jeweils beiden Berechnungsabschnitte der aquatischen Kennzahlen und des Primärenergiebedarfs betrachtet. In Tabelle 18 ist die Datengüte für die berechneten aquatischen Kennzahlen für die swb-KW in Bremen aufgeführt.

Tabelle 18: Datengüte der aquatischen Kennzahlen der swb Kraftwerke.

Daten	Quelle	Datengüte	Wertung Datengüte
Energieerzeugung	swb Umwelterklärung	A	1
Fernwärmeerzeugung	swb Umwelterklärung	A	1
Trinkwassernutzung	swb Umwelterklärung	A	1
Kühlwassernutzung	swb Umwelterklärung	A	1

Die Bewertung der aquatischen Kennzahlen kann als gut belastbar eingestuft werden, mit einer Datengüte von 100 %. Für die Bestimmung des Wasserbedarfes in Bremen sind außerdem die Primärenergiewerte notwendig. Es sind die Kennwerte des Referenzjahres 2019 mit entsprechender Datengüte in Tabelle 19 aufgezeigt.

Tabelle 19: Bewertung Datengüte Berechnung Primärenergieverbrauch Bremen 2019.

Daten	Quelle	Datengüte	Wertung Datengüte	Anteil Primärenergieverbrauch	Datengüte anteilig
Steinkohle	Statistisches Landesamt Bremen	B	0,5	48,15 %	0,24075
Braunkohle	Statistisches Landesamt Bremen	B	0,5	2,47 %	0,01235
Mineralöl	Statistisches Landesamt Bremen	B	0,5	17,64 %	0,0882
Erdgas	Statistisches Landesamt Bremen	B	0,5	24,94 %	0,1247
Sonstige	Statistisches Landesamt Bremen	B	0,5	3,71 %	0,01855
EE	Statistisches Landesamt Bremen	B	0,5	3,09 %	0,0195
Gesamt	-	-	-	100 %	0,5

Die Datengüte für den Primärenergieverbrauch in Bremen für das Jahr 2019 ist als bedingt belastbar berechnet, was sich durch den Bezug auf das gesamte Land Bremen anstatt der Stadt Bremen ergibt.

Für den gesamten Wasserbedarf sind sowohl die aquatischen Kennzahlen als auch der Primärenergieverbrauch relevant und werden zu gleichen Teilen mit in die Bewertung eingefügt, wodurch als Mittelwert eine Güte von 0,75 entsteht, die als belastbar einzuschätzen ist. Dies gilt jedoch nur für die durch eigene Kennwerte erhobenen aquatischen Kennzahlen (siehe Tabelle 14) und nicht für die auf Literaturbasis angenommenen Werte. Diesen wird eine Datengüte-Klasse von C (= 0,25) zugeordnet, da sie auf Basis einer Literaturrecherche und einer statistischen Auswertung erfolgen und die individuelle Dimensionierung, der Hersteller, das Alter und die eingesetzten Technologieart je KW nicht mitberücksichtigt werden. Dementsprechend sind die Wasserbedarfe für die Energiebereitstellungstechnologien Mineralöl, PV und Windkraft insgesamt einer Datengüte von 0,375 anzusehen und als bedingt belastbar zu bewerten.

In zukünftigen Ausarbeitungen sollten exakte Kennwerte für alle KW Bremens erhoben werden, wodurch eine höhere Datengüte erreicht wird. Ebenso sind Landesprognosen für den Energiemix und die Energieproduktion in Bezug auf die Klimaneutralität 2045 abzustecken und als Zielwerte zu definieren.

Nach identischer Vorgehensweise ist die Datengüte für Deutschland einzugrenzen. Da die eigens erhobenen Kennzahlen für Bremen bezogen auf Deutschland ebenfalls in die Bewertungsklasse C fallen, werden die gesamten aquatischen Kennzahlen mit einem Wert von 0,25 durch die Skalierung bewertet. In Tabelle 20 sind die Datengüte-Betrachtungen für den Primärenergieverbrauch Deutschlands aufgelistet.

Tabelle 20: Bewertung Datengüte Primärenergieverbrauch 2021 Deutschland.

Daten	Quelle	Datengüte	Wertung Datengüte	Anteil Primärenergieverbrauch	Datengüte anteilig
Stein-/ Braunkohle	AG Energiebilanzen, Prognos	D	0	17,89 %	0
Kernenergie	AG Energiebilanzen, Prognos	D	0	6,18 %	0
Erdgas	AG Energiebilanzen, Prognos	D	0	26,72 %	0
Mineralöl	AG Energiebilanzen, Prognos	D	0	31,79 %	0
EE	AG Energiebilanzen, Prognos	D	0	15,48 %	0
Sonstige	AG Energiebilanzen, Prognos	D	0	1,94 %	0
Gesamt	-	-	-	100 %	0

Die Datengüte des Primärenergieverbrauchs für Deutschland für das Jahr 2021 sind mit 0 nur als bedingt belastbar einzuschätzen. Aufgrund identischer Datenquellen über alle Energieträger gilt

gleiches für die Prognose 2045, wobei hier eine weitere Unsicherheit durch Abschätzungen dazugerechnet wird. In Kombination mit den genutzten aquatischen Kennzahlen ist mit gleicher Wertigkeit eine Gesamtgüte von 0,125 erreicht, deshalb ist der Wasserbedarf als bedingt belastbar einzuschätzen. Somit sind die erworbenen Erkenntnisse der vorliegenden Masterarbeit bezogen auf den Wasserbedarf von Energiebereitstellungstechnologien eher als richtungsweisend anzusehen.

In folgenden fortführenden wissenschaftlichen Ausarbeitungen zum Thema Wasserbedarf ist es anzustreben, die Datengüte dieser erhobenen Werte zu erhöhen und eine bessere Belastbarkeit damit zu generieren.

Es wurden anfangs die Systemgrenzen definiert, um den Rahmen der vorliegenden Arbeit einzuhalten. Dementsprechend wurden KW mit einer geringeren Leistungszahl als 10 MW vernachlässigt, da deren vorliegender Informationsgehalt nicht für die Weiterverwendung ausreichend ist. Außerdem wurde nur die Energiebereitstellung mit in die Betrachtungen einbezogen. Wichtig für eine umfassende Aussage über den Wasserbedarf je Energiebereitstellungstechnologie ist jedoch auch die Energieverteilung hin zu den Endkonsument*innen und Verbraucher*innen.

In Bremen wird ein Großteil der Wärmeversorgung über Fernwärmenetze ermöglicht, genauer betrachtet existieren drei große Netze, wie in Abbildung 71 erkennbar: Bremen-West, Bremen-Horn-Lehe und Bremen-Ost.



Abbildung 71: Wärmenetze Bremen (swb AG & wesernetz Bremen GmbH, 2020).

Für die Wärmeleitung per Fernwärmenetze wird Wasser als Medium verwendet. Für einen störungsfreien Betrieb ist der Einsatz von entgastem Wasser, das heißt, frei von Sauerstoff, Stickstoff und Kohlendioxid, notwendig. Je nach Führung des Wassers werden die wasserchemischen Richtwerte

festgelegt und haben somit für die salzarme Option eine Leitfähigkeit von unter 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und für die salzhaltige Option eine Leitfähigkeit von über 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (AGFW, 2022).

Die größte Wassermenge wird durch Leckagen bestimmt, da ansonsten die Wärmeerzeugung auf geschlossenen Kreislaufprozessen basiert. Eine Leckage kann durch Beschädigungen an den Fernwärmeleitungen verursacht werden. Ein Beispiel sind korrosionsbedingte Risse. Da der größte Anteil des Rohrleitungssystems vergraben sind, lassen sich Leckagen schwer lokalisieren (Universität Bremen, 2020).

Mit entsprechender Größe können sich Wasserverluste wirtschaftlich und betriebsgefährdend auf das gesamte System auswirken, wenn sie längere Zeit bestehen oder auch die mögliche Kapazität der Zusatzwasseraufbereitung übersteigen. Dabei ist die Jahresbilanz der Wasserverluste als ein Maß für die Nachhaltigkeit der Netze anzusehen. Es gibt verschiedene Wasserverlustarten in einem Fernwärmenetz. Der Prozesswasserverlust ist ein technisch bedingter Wasserverlust und der betriebliche definiert einen Wasserverlust in Folge einer geplanten betrieblichen Maßnahme. Bei der Wärmeleitung ist besonders das sogenannte Leckwasser relevant, welches Wasserverlust in Folge von schadhafte Bauteilen, unberechtigten Entnahmen und nicht quantifizierbaren Wasserverlusten darstellt. Danach ist eine Wassermenge (Ergänzungswasser) zum Ausgleich sämtlicher Verluste des Fernwärmesystems notwendig, welches als Zusatzwassermenge bezeichnet wird. Für das Bestimmen dieser Leckagenverluste ist eine Wasserbilanz mit allen Einflussfaktoren abzubilden. Dafür sind alle relevanten Volumenströme zu messen und zu berechnen, wobei das Leckwasser mit dem Netzvolumen ins Verhältnis gesetzt wird, und eine Kennzahl bestimmt werden kann. Eine Netzbewertung kann anschließend in einem dreistufigen Modell („grün - gelb - rot“) dargestellt werden (AGFW, 2017).

Im Fernwärmenetz West kommt es täglich zu einem Wasserverlust von ungefähr 20- 30 m^3 und im Fernwärmenetz Ost zu bis zu 100 m^3 Leckwasser, da es sich um ein älteres Netz handelt (Röben, 2022). Es sind genauere Untersuchungen zu dem Wasserverlust durch die Energieverteilung anzustellen, da über die Leckagen eine große Menge an hochqualitativem Wasser ungenutzt verloren geht. Diese Systemgrenzen-Erweiterung ist für die Bewertung des Wasserbedarfes der Energiebereitstellungstechnologien und der KW sinnvoll.

Des Weiteren sind innerhalb der betrachteten Systemgrenzen nur die Wasserbedarfe der Energiebereitstellungstechnologien im Betrieb betrachtet. Jedoch verzerrt diese Annahme die Wasserbedarfe über die gesamte Lieferkette, da bspw. für die EE, wie PV und Windenergieanlagen, der größte Wasserbedarf in der Herstellung liegt (Bormann et al., 2019). Diese Ausweitung der Systemgrenzen sollten in zukünftigen Betrachtungen mit untersucht werden. Für die Bewertung der Wasservorkommen in Menge und Güte sind des Weiteren Qualitätsanforderungen an die Ressource Wasser der Energietechnologien zu definieren.

In der vorliegenden Arbeit wurden die aquatischen Kennzahlen für die Beispielregion Bremen generiert und davon ausgehend eine Skalierung auf Deutschlandebene vorgenommen. Dadurch wird die Datengüte reduziert, wie in Abschnitt 4.5 erklärt. Für eine belastbare Aussage, bezogen auf die aquatischen Kennzahlen und damit auf den Wasserbedarf für Deutschland, sind detailliertere Untersuchungen auf der deutschlandweiten Ebene anzustellen und weitere Primärkennzahlen zu generieren.

Die Wasserproblematik ist kein nationales Problem. Der Klimawandel betrifft sowohl Europa in Form von bspw. höher frequentierten Dürreperioden (Markonis et al., 2021) als auch die gesamte Welt (Europäische Umweltagentur, 2022). Die Notwendigkeit, das Wasservorkommen und den Wasserbedarf der Energieproduktion weltweit zu untersuchen zeigt sich in zahlreich geförderten Projekten. Ein Beispiel ist WaterGAP, welches ein hydrologisches Modell ist, welches die menschliche Nutzung von Grundwasser und Oberflächengewässern aufzeigt und dabei Wasserreserven und -ressourcen mit einbezieht (Müller Schmied et al., 2021). Solche Datenmodelle sollten auch auf regionaler Ebene mit entsprechendem Detailgrad entwickelt werden und für die Öffentlichkeit zugänglich sein. Sinnvoll wäre eine interaktive Karte für Deutschland, die sowohl die Wasser-, als auch die Energieseite beinhaltet (Vorkommen und Energieproduktion) und durch GIS-basierte Softwarebasis eine einheitliche Kommunikations- und Darstellungsform bietet, um Logistikansätze und Lösungsstrategien für Nutzungspotenziale zu entwickeln.

Auf Metaebene wurde der Fokus auf die Wasser- und Energiewirtschaft gelegt. Diese stehen in engen Wechselbeziehungen und müssen zusammen gedacht werden. Daneben gibt es einen weiteren Sektor, der eng mit den Wasserressourcen verknüpft ist, den Nahrungsmittelsektor, der auf dem Wirtschaftssektor der Landwirtschaft basiert (German Water Partnership e.V., 2017). In der nachfolgenden Abbildung 72 ist der Nexus zwischen den drei Bereichen dargestellt, verknüpft mit weiteren Aktionsfeldern.

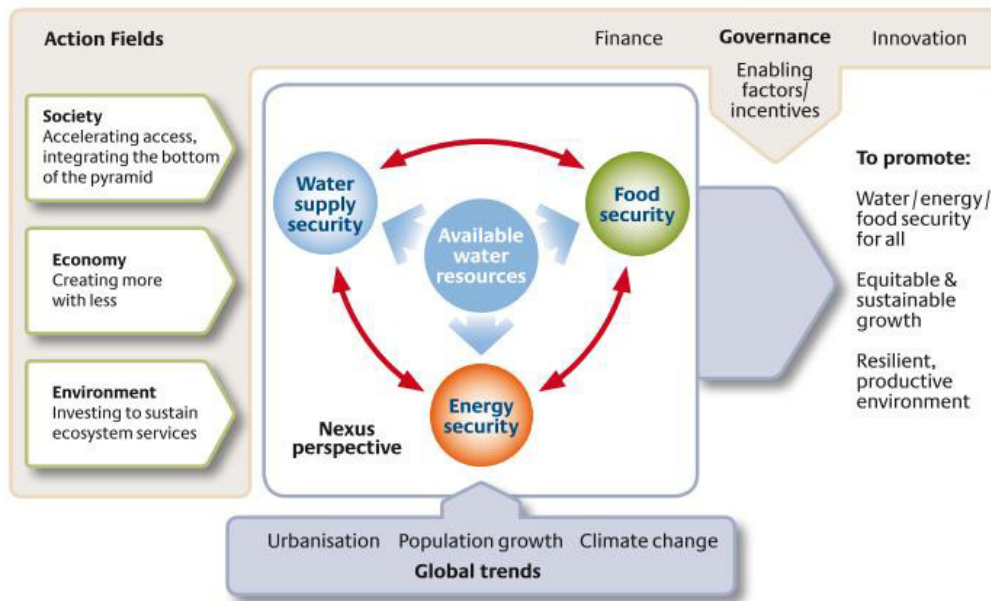


Abbildung 72: Wasser-, Energie- und Nahrungsmittel-Nexus (Hoff, 2011).

Die Aktionsfelder sind an die Nachhaltigkeit angelehnt, wodurch sich drei Säulen ergeben. Sozial betrachtet muss der Zugang sichergestellt sein und die Unterseite der Pyramide mit integriert werden. Aus ökonomischer Perspektive ist das Effizienzziel anzustreben, das heißt, mit weniger Ressourcen mehr Nutzungen abzudecken. Das Investieren in nachhaltige Ökosysteme für den Fortbestand ist der ökologische Treiber in dem Nexus. Herausgezoomt aus der bremschen bzw. aus der deutschlandweiten Perspektive steht die Welt vor den globalen Trends Urbanisierung, Bevölkerungswachstum und der Klimakrise, welche auf den Nexus einwirken. Daran angelehnt sind Innovationen zu entwickeln, welche die Wasser-, Energie- und Nahrungsmittelsicherheit gewährleisten, einem gerechten und nachhaltigen Wachstum zuarbeiten und eine resiliente und produktive Umwelt schaffen. Durch die Einwirkung der nachhaltigen Triebfelder auf das System ist ein nötiges Ökosystem-Management eine Frage des Lebens mit stetigem Wandel, während auf lange Sicht die Produktivität des Ökosystems gewährleistet sein muss (Falkenmark, 2003). Dementsprechend ist die Regierung oder auch die Politik dafür zuständig, dies zu ermöglichen, den Rahmen zu schaffen und Anreize für die Umsetzung und den Fortbestand der Entwicklung zu setzen.

Die Wasserversorgungssicherheit ist nicht nur auf die Energiewirtschaft zu beziehen, sondern neben Trinkwasserversorgung auch für sanitäre Einrichtungen notwendig. Laut dem SDG 6.2 ist es das Ziel, Zugang zu adäquater und fairer Hygiene und Wasserversorgung mit besonderem Fokus auf Mädchen und Frauen. Laut der Bill & Melinda Gates Foundation ist Deutschland mit einer Verbreitung von 99 % an sicheren sanitären Anlagen nahezu an dem 2030 Ziel. Zentraleuropa zeigt einen Wert von 80 % und global liegt der Prozentsatz bei 58 %. In diesem Bereich sind dementsprechend noch weitere Verbesserungen und Entwicklungen notwendig, die bei der Diskussion um die Wasserversorgung mitgedacht werden müssen (Bill & Melinda Gates Foundation, 2022).

Aktuell haben politische Beschlüsse zu Grundwasser oft den Fokus auf der Nutzung des Grundwassers nach der Entnahme, was aber wichtige Aspekte nicht mit beinhaltet. Eine nachhaltige Bewirtschaftung des Grundwasserleiters sollte die Flächennutzung, die Grundwasserneubildung, den Schutz und die Maßnahmen zum Erhalt der Leistungen und Funktionen des Grundwassersystems mit berücksichtigen (UNESCO World Water Assessment Programme, 2022).

Aus den dargestellten Aspekten ergeben, sich politisch, betrachtet Potenziale, um eine nachhaltigere und gerechtere Wassernutzung vor dem Hintergrund der Energieversorgung zu gewährleisten. Dazu zählt die sektorale Vernetzung von Wasser und die Steigerung der Wertschätzung der Ressource in Politik und Gesellschaft, aber auch die frühzeitige Erkennung und Lösung von Wassernutzungskonflikten. Außerdem sollte die Trinkwasserversorgung eine Vorrangstellung in Konkurrenz mit anderen Wassernutzungen rechtlich verankert zugeschrieben bekommen. Außerdem sollten auf planerischer Ebene die Organisationsstrukturen in der Wasserwirtschaft weiterentwickelt werden. Es sind die Chancen der Digitalisierung zu nutzen und eine Daten- und Wissensgrundlage zu schaffen (BMU & UBA, 2020).

Aktuell existiert für die Bewertung von Umweltwirkungen nur die Methode der Ökobilanzierung. Diese beinhaltet mit Wasser als Ressource nur eine der Wirkungskategorien in Form vom Wasserverbrauch. Diese geht jedoch nicht näher auf die Wasserqualität oder Nutzung ein. Somit hat die ökobilanzielle Betrachtung Grenzen bezogen auf Wasser, besonders im Hinblick auf die Unterscheidung zwischen Ge- und Verbrauch. Die Ökobilanzierung, wie sie heute angewandt wird, umfasst die Beurteilung der Umweltrelevanz, während wirtschaftliche, soziale und rechtliche Aspekte fehlen (BAFU, 2021).

Eine andere Umweltanalysemethode, die das knappe Gut Wasser detaillierter betrachtet, ist die UBP (Umweltbelastungspunkte)- Methode, auch Methode der ökologischen Knappheit genannt. Mittels der UBP können Umweltbelastungen in einem Kennwert zusammengezählt und verglichen werden. Dabei berücksichtigt die Methode ein breites Spektrum von Umweltbelastungen mit der zentralen Größe der Ökofaktoren, welche die Umweltbelastung einer Emission, einer Ressourcennutzung oder von verursachtem Abfall in UBP pro Mengeneinheit angeben (BAFU, 2021).

Für eine umfassende Bewertung des Wasserbedarfes von Energiebereitstellungstechnologien entlang der gesamten Prozesskette wäre eine Erweiterung der Ökobilanz um die in der UBP-Methode verwendeten Kriterien denkbar. Diese müsste für zukünftige Untersuchungen noch entwickelt und definiert werden. Denkbar ist eine Einbindung in eine nationale Circular-Economy-Strategie, das bedeutet eine Kreislaufwirtschaftsstrategie, die neben dem Schließen von Kohlenstoffkreisläufen auch den Wasserkreislauf mit betrachtet (Stiftung Klimaneutralität et al., 2021).

Ein Hindernis bei der vorliegenden Arbeit ist die schlechte Datenlage. Es existieren frei zugänglich meist veraltete Datensätze, die nicht spezifisch auf KW nachverfolgbar sind. Die fehlende Transparenz führt zu einer schlechteren Datengüte bei bundesweiten Statistiken. Des Weiteren sind auch im direkten

Kontakt mit relevanten Expert*innen und Verbänden teils keine weiteren Informationen zu bekommen. Beispielsweise in der Kommunikation mit der Wasserbehörde in Bremen, als auch den Wasserverbänden in Niedersachsen ist die Zuarbeit schwierig abseits der öffentlichen Daten.

Es ist erkennbar, dass sowohl die Datengrundlage für Wasserbedarfsuntersuchungen als auch das Bewusstsein vieler Firmen und Verbände noch fehlt in Bezug auf die Ressource Wasser. In der vorliegenden Arbeit mussten durch signifikante Datenlücken teilweise auf graue Literatur in Form von Telefonaten und Interviews zurückgegriffen werden. Selbst bei der Informationsvisualisierungs-Software von Stiftelsen Gapminder und in den Medien, wie der Fernsehshow ZDF Magazin Royale wurde auf teilweise veraltete Daten zurückgegriffen anstatt aktuelle wissenschaftliche Paper als Grundlage heranzuziehen. Auch in dem sechsten Sachstandbericht des IPCC fehlt die Wasserbetrachtung in Folge der Klimakrise als Teil der Entwicklungspfade. Ein regionales Beispiel sind die Wasserbezugswerte von Bremen (Destatis, 2022), die nicht mit den berechneten Wasserbedarfen übereinstimmen, aber aufgrund der dünnen Datensituation keine Fehleranalyse erfolgen kann.

Wasserverfügbarkeit ist aktuell nicht als signifikante globale Herausforderung sichtbar und bedarf internationaler Kooperationen für Lösungsstrategien. Abgeleitet bekommen die Übernutzung, Wasserknappheit und Dürren nicht ausreichend Aufmerksamkeit, der Fokus liegt eher auf Wasserqualitätsmerkmalen wie Überflutungen und Hydromorphologie (European Environment Agency, 2021).

Eine Ursache für die ungenügende Aufmerksamkeit gegenüber der Begrenztheit von Wasser sind fehlende Daten, das heißt, es gibt vielerorts keine zuverlässigen Informationen über das Wasservorkommen und bei Existenz sind sie selten mit Daten aus dem Energiesektor kompatibel. Noch größere Lücken existieren bezogen auf Lebenszyklusanalysen, welche die Grundlage für Ökobilanzen darstellen (van Vliet et al., 2016).

Das Management der Energie- und Wasserwirtschaft ist auf unterschiedlichen Ebenen angesiedelt. Energetische Fragestellungen werden häufig auf nationaler Ebene entschieden, wohingegen Wasser thematisch meist in den Verantwortungsbereich kommunaler Behörden rückt. Wichtig ist die Berücksichtigung des Wasserverbrauchs bei Entscheidungen im Energiesektor (van Vliet et al., 2016). Für ein zielführendes Wassermanagement und einen nachhaltigen Umgang mit der Ressource Wasser vor dem Hintergrund der Klimakrise, der Energie- und Wärmewende, aber auch den rechtlichen, planerischen und politischen Rahmenbedingungen sind öffentlich zugängliche Datenmengen notwendig.

Die Transparenz des Wasserbedarfes im Energiesektor muss erhöht und fehlende Daten zum tatsächlichen Wasserbedarf von Energieversorgern zusammengetragen werden. Dies gilt für Privatunternehmen als auch für den öffentlichen Sektor, welche jeweils die Wassernutzung und den

Wasserverbrauch überwachen und die Ergebnisse veröffentlichen sollten. Die Umsetzungsempfehlung für KW ist die Integration der aquatischen Kennzahlen in die Umweltberichte, welche öffentlich einsehbar aufzuzeigen sind. Dies würde mit allgemeinen Kriterien und Berechnungsvorgaben eine Vergleichbarkeit von Kenndaten ermöglichen und gleichzeitig der Gefahr von Greenwashing entgegenwirken. Orientiert am Earth-Overshoot-Day wäre eine Budgetierung der Wassermengen denkbar, die aber entgegen dem Weltverbrauchstag auch mit rechtlichen Konsequenzen unterstützt werden müsste. Entlang der Wasservorkommen und je nach Wassergüte sind die nutzbaren Wassermengen zu bestimmen, aber auch die Verwendungsoptionen vorzugeben. So wäre eine optimale Bedarfsplanung in Deutschland möglich und gleichzeitig würde ein logistischer Lösungsansatz geboten werden. Transporte vermindern oft den Wirkungsgrad von Energieträgern durch Umwandlungsverluste, die durch ein intersektorales und internationales Zusammenarbeiten vermieden werden könnten.

Daten haben Limitierungen, aber sie helfen, die Realität hinter Zahlen zu verstehen. Es sollten keine Rückschlüsse rein auf Zahlen abgeleitet werden. Wichtig dabei ist, dass mehrere Perspektiven in Betracht gezogen werden, um die Vorstellungskraft nicht einzugrenzen und die Realität möglichst getreu abzubilden. Das Wasserthema ist aktuell in vielen Medien vertreten. Die Situation wird als wichtig und kritisch benannt und somit als Problem ernst genommen, aber warum wird der Prozess nicht verfolgt und zahlenmäßig aufgezeichnet als Konsequenz? Die wichtigste Handlungsaufforderung ist die Notwendigkeit verbesserter Datenqualität. Es ist wesentlich, die Glaubwürdigkeit der Daten und derer, die sie erheben zu schützen. Daten müssen genutzt werden, um die Wahrheit zu erzählen, aber nicht, um einen Aktionsaufruf zu starten, egal welche Intention mit hineinspielt (Rosling et al., 2019).

Aus der vorliegenden Arbeit und den Untersuchungen ergeben sich viele potenzielle Forschungsfelder, die vor dem Hintergrund der Klimakrise und Ressourcenknappheit betrachtet werden sollten. Hauptidee ist, dass der Wasserbedarf von Energiebereitstellungstechnologien in Deutschland nicht konkret generiert und abgegrenzt werden kann und somit eine Bewertung in vollem Ausmaß nicht möglich ist. Die Masterarbeit zeigt mögliche Methodiken und die mit zu beachtenden Perspektiven und Kriterien auf. Die Ausarbeitung soll die Aufmerksamkeit auf das Wasserthema erhöhen und zu einer Sensibilisierung aller beteiligten Akteur*innen verhelfen.

Literaturverzeichnis

- AG Energiebilanzen e.V. (2022). Bruttostromerzeugung nach Energieträgern Deutschland 1990-2021. Zugriff am 7. April 2022, verfügbar unter https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2021/12/STRERZ_2021Febr2022_web.pdf
- AG Energiebilanzen e.V. (2021a, 1. September). Energieflussbild 2020 für die Bundesrepublik Deutschland, Institution: Energieflussbilder AG Energiebilanz e.V. https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2020/09/ageb_energieflussbild-kurz_de-2020-pj_20210923.pdf
- AG Energiebilanzen e.V. (2021b). Primärenergieverbrauch der Bundesrepublik Deutschland 2020/2021.
- AG Energiebilanzen e.V. & BMWi (2022). Erneuerbare Energien in Deutschland: Das Wichtigste im Jahr 2021 auf einen Blick. Zugriff am 25. April 2022, verfügbar unter https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-2020-tischvorlage.pdf;jsessionid=3DDA13E6ECE4C0771B0496BE04064536?__blob=publicationFile&v=29
- AGEE-Stat (2022). Aktuelle Schätzung der Entwicklung der erneuerbaren Energien im Jahr 2021. UBA. Mitarbeit von Engelhardt, R. Zugriff am 7. April 2022, verfügbar unter https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2021/10/EE-UBA-AGEE-Stat_Praesentation_2021-Q4_fuer_AGEB.pdf
- Agentur für erneuerbare Energien e.V. (2021, März). Endenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2020 nach Strom, Wärme und Verkehr. Berlin. Mitarbeit von AGEB, & AGEE Stat. Zugriff am 7. Juli 2022, verfügbar unter https://www.unendlich-viel-energie.de/media/image/59471.AEE_Endenergieverbrauch_Strom_Waerme_Verkehr_2020.jpg
- AGFW (Hrsg.). (2022). *Arbeitsblatt AGFW FW 510: Anforderungen an das Kreislaufwasser von Industrie- und Fernwärmeleitungen sowie Hinweise für deren Betrieb*. AGFW-Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung mbH, Institution: Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., Frankfurt am Main.
- AGFW (Hrsg.). (2017). *Merkblatt AGFW FW 115: Wasserverluste in Fernwärmesystemen*. AGFW-Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung mbH, Institution: Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., Frankfurt am Main.
- Agora Energiewende (Hrsg.). (2022a). *Agorameter: Zukunft: Stromerzeugung und Stromverbrauch*. Smart Energy for Europe Platform (SEFEP) gGmbH. Berlin. Mitarbeit von Hein, F. Zugriff am 11.

August 2022, verfügbar unter https://www.agora-energiewende.de/service/agorameter/chart/future_power_generation/11.08.2021/11.08.2022/future/2040/

Agora Energiewende (2022b). Die Energiewende in Deutschland: Stand der Dinge 2021: Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2022. Mitarbeit von Hein, F., Müller, S., & Lenck, T. Zugriff am 5. Juli 2022, verfügbar unter https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_11_DE-JAW2021/A-EW_247_Energiewende-Deutschland-Stand-2021_WEB.pdf

Arbeitskreis KLIWA (Hrsg.). (2022). *Mittlerer Abfluss* | KLIWA. Mitarbeit von Bremicker, M., Joneck, M., & Iber, C. Zugriff am 13. Juli 2022, verfügbar unter <https://www.kliwa.de/hydrologie-abfluss.htm>

ArcelorMittal (Hrsg.). (2022). *Nachhaltigkeit: Water Stewardship*. Bremen. Zugriff am 8. August 2022, verfügbar unter <https://bremen.arcelormittal.com/Nachhaltigkeit/Umweltschutz/Water-Stewardship/>

Ausfelder, F., Drake, F.-D., Erlach, B., Fishedick, M., Henning, H.-M., Kost, C., Münch, W., Pittel, K., Rehtanz, C., Sauer, J., Schätzler, K., Stephanos, C., Themann, M., Umbach, E., Wagemann, K., Wagner, H.-J. & Wagner, U. (2017). *"Sektorkopplung" - Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems: [Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft]. Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft*. acetech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V; Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V. - Nationale Akademie der Wissenschaften; Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften e.V, Institution: acetech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.; Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.; Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e.V., München, Halle (Saale), Mainz. Zugriff am 11. Juli 2022, verfügbar unter https://energiesysteme-zukunft.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/PDFs/ESYS_Analyse_Sektorkopplung.pdf

BAFA (Hrsg.). (2021). *Informationsblatt CO₂-Faktoren: Bundesregierung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft- Zuschuss* (1. Aufl.). Bundesanstalt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, Institution: KfW, Eschborn. Zugriff am 22. August 2022, verfügbar unter https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew_infoblatt_co2_faktoren_2021.pdf?__blob=publicationFile&v=4

BAFU (Hrsg.). (2021). *Bern. Umwelt-Wissen: Bd. 2121. Ökofaktoren Schweiz 2021 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit: Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz*. Bundesamt für Umwelt. Zugriff am 21. Juli 2021, verfügbar unter www.bafu.admin.ch/uw-2121-d

- Bauer, J., Blickle, P., Ehmann, A., Endt, C., Erdmann, E., Greife-huge, C., Peter, V., Stahnke, J. & Tröger, J. (14. April 2022). Energiemonitor: Die wichtigsten Daten zur Energieversorgung – täglich aktualisiert. *Die Zeit*, 2022. Zugriff am 13. Juli 2022, verfügbar unter <https://www.zeit.de/wirtschaft/energiemonitor-deutschland-gaspreis-spritpreis-energieversorgung>
- Baur, A., Fritsch, P., Hoch, W., Merkl, G., Rautenberg, J., Weiß, M. & Wricke, B. (2019). *Mutschmann/Stimmelmayr Taschenbuch der Wasserversorgung* (17. Aufl.). Springer eBook Collection. Vieweg, Wiesbaden. Zugriff am 14. April 2022, verfügbar unter <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-658-23222-1.pdf>
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-23222-1>
- BCG & BDI e.V. (2021). *Klimapfade 2.0: Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft* (1. Aufl.). Zugriff am 31. August 2022, verfügbar unter <https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-2-0-ein-wirtschaftsprogramm-fuer-klima-und-zukunft/>
- BCG & BDI e.V. (2018, Januar). Klimapfade für Deutschland. Mitarbeit von Phillip, G., Herhold, P., Burchardt, J., Schönberger, S., Rechenmann, F., Kirchner, A., . . . Zugriff am 31. August 2022, verfügbar unter <https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-fuer-deutschland/>
- BDEW (2021). Entwicklungen in der deutschen Stromwirtschaft- das Jahr 2021: Webkonferenz der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen am 16. Dezember 2021. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. Mitarbeit von Nickel, M. Zugriff am 7. April 2022, verfügbar unter <https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2021/10/AGEB-Tagung-Dez2021-Strom.pdf>
- BDEW (Hrsg.). (2020). *Grüner Treibstoff aus dem Klärwerk: Das Berliner Unternehmen Graforce gewinnt grünen Wasserstoff aus Abwasser. Das ist effizienter als bisherige Verfahren – und macht ganz nebenbei das Wasser sauberer. Ein Werkstattbericht*. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Berlin. Mitarbeit von Scherer, R. Zugriff am 19. August 2022, verfügbar unter <https://www.bdew.de/verband/magazin-2050/wasserstoff-gruener-treibstoff-aus-dem-klaerwerk/>
- BDI e.V. (2021). *BDI-Stellungnahme: EU-Aktionsplan "Null-Schadstoff-Ziel für Luft, Wasser und Boden"*. Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. Berlin. Mitarbeit von Weimer, S.
- Becker, D., Jungfer, C. & Track, T. (2019). Integrated Industrial Water Management – Challenges, Solutions, and Future Priorities. *Chemie Ingenieur Technik*, 91 (10), 1367–1374. DECHEMA e.V. <https://doi.org/10.1002/cite.201900086> Zugriff am 3. Mai 2022, verfügbar unter https://www.aspire2050.eu/sites/default/files/users/user500/becker_et_al._2019.pdf
- BEE. (2021). *Kurzversion der Studie Neues Strommarktdesign: Neues Strommarktdesign für die Integration fluktuierender Erneuerbarer Energien*. Bundesverband Erneuerbare Energie e.V.

- Berlin. Mitarbeit von Stark, M., Gerhardt, N., & Harms, Y. Zugriff am 28. Juni 2022, verfügbar unter http://klimaneutrales-stromsystem.de/pdf/20211213_BEE_Kurzversion_der_Studie_Neues_Strommarktdesign.pdf
- Bender, S., Groth, M. & Viktor, E. (2021). Auswirkungen des Klimawandels auf die zukünftige Grundwassernutzung – Betroffenheiten, Handlungsbedarfe und Lösungsansätze. *Grundwasser*, 26 (1), 61–72. <https://doi.org/10.1007/s00767-020-00465-9>
<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00767-020-00465-9.pdf>
- Bensberg, F., Auth, G. & Czarnecki, C. (2018). Einsatz von Text Analytics zur Unterstützung literaturintensiver Forschungsprozesse - Konzeption, Realisierung und Lessons Learned, 1–6.
- Berichtsportal WasserBLiCK & BfG (UBA, Hg.). (2022, 24. März). *Mengenmäßiger Zustand des Grundwassers: Guter mengenmäßiger Zustand bedeutet, dass zumindest ein Gleichgewicht zwischen der Grundwasserentnahme und der Grundwasserneubildung besteht*. Zugriff am 2. Juni 2022, verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2875/bilder/dateien/mengen_maessiger_zustand__0.pdf
- Bett, A. W., Erlach, B., Glotzbach, Ulrich/ Haucap, Justus, Henning, H.-M. & Kühling, Jürgen/ Lapac, Anja/ Matthies, Ellen/ Pittel, Karen/ Ragwitz, Mario/ Renn, Jürgen/ Sauer, Dirk Uwe/ Schmidt, Christoph M./ Spiecker genannt Döhmann, Indra/ Staiß, Frithjof/ Seiler, Annika / Stephanos, Cyril/ Umbach, Eberhard/ Weidlich, Anke: (2021). Wenn nicht jetzt, wann dann- wie die Energiewende gelingt: Impuls. *Akademieprojekt "Energiesysteme der Zukunft"*. ESYS. Zugriff am 2. Mai 2022, verfügbar unter https://www.leopoldina.org/fileadmin/redaktion/Publikationen/Nationale_Empfehlungen/2021_ESYS_Impulspapier_Energiewende.pdf
- BGR (Bundesrepublik Deutschland, Hg.). (2021). *Grundwasser - Die Grundwasservorkommen von Deutschland*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover. Mitarbeit von Prof. Dr. Thomas Himmelsbach, & Dr. Jörg Reichling. Zugriff am 2. Juni 2022, verfügbar unter https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Wasser/grundwasser_deutschland.html?nn=1542268
- BGR (2018). Ergiebigkeit der Grundwasservorkommen von Deutschland und Lage großer Wasserwerke der öffentlichen Wasserversorgung. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Zugriff am 24. März 2022, verfügbar unter https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Wasser/Produkte/Downloads/abb_gw-ergiebigkeit_ww_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- BGR. (o.D.a). *Grundwasservorkommen von Deutschland nach Art der Grundwasserleiter, Ausdehnung und Ergiebigkeit* [GeoViewer]. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover. Zugriff am 24. März 2022, verfügbar unter

- https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Wasser/Produkte/Downloads/abb_gw-vorkommen_slhym_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- BGR. (o.D.b). *Hydrogeologie von Deutschland (HY1000): Grundwasservorkommen nach Ausdehnung und Produktivität* [Geoviewer]. con terra GmbH. Hannover. Zugriff am 23. August 2022, verfügbar unter <https://geoviewer.bgr.de/mapapps4/resources/apps/geoviewer/index.html?lang=de>
- Bill & Melinda Gates Foundation (Hrsg.). (2022). *Goalkeepers Report: Sanitation*. Zugriff am 22. September 2022, verfügbar unter <https://www.gatesfoundation.org/goalkeepers/report/2022-report/progress-indicators/sanitation/>
- Birth, Torsten, Jentsch, S., Scheffler, M. & Hayen, S. (2021). Wasser als kritische Ressource für die Wasserstofferzeugung: Fachbericht. *gwf Wasser | Abwasser*, 162 (9), 73–88.
- BKG, LAWA & UBA. (2019, 15. März). *Chemischer Zustand des Grundwassers*. Umweltbundesamt. Zugriff am 2. Juni 2022, verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/grundwasser/zustand-des-grundwassers/chemischer-zustand-des-grundwassers#undefined>
- BMBF (Hrsg.). (2018). *Energieeffiziente und Ressourcenschonende Wasserwirtschaft (ERWAS): Perspektivpapier* (1. Aufl.). Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef. Zugriff am 19. August 2022, verfügbar unter https://bmbf.nawam-erwas.de/sites/default/files/erwas_perspektivpapier_2018_ansicht.pdf
- BMU. (2021). *Nationale Wasserstrategie: Entwurf des Bundesumweltministeriums* (1. Aufl.). BMU. Bonn. Mitarbeit von Emde, F., & Stratenwerth, T. Zugriff am 16. März 2022, verfügbar unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewasser/langfassung_wasserstrategie_bf.pdf
- BMU (Hrsg.). (2019). *Diskussionspapier zum Thema Nutzungskonflikte: Nationaler Wasserdiallog*, Bonn. Mitarbeit von Arbeitsgruppe WR I 1, & UBA. Zugriff am 9. August 2022, verfügbar unter https://www.fresh-thoughts.eu/userfiles/file/Diskussionspapier_Nutzungskonflikte.pdf
- BMU & UBA (Hrsg.). (2020). *Kernbotschaften, Ergebnisse und Dokumentation des Nationalen Wasserdialogs*, Berlin. Mitarbeit von 3f design, UFZ, Fresh Thoughts Consulting, & team ewen GbR. Zugriff am 14. März 2022, verfügbar unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewasser/nationaler_wasserdialog_abschlussdokument_bf.pdf
- BMU & UBA (Hrsg.). (2017). *Wasserwirtschaft in Deutschland: Grundlagen, Belastungen, Maßnahmen* (1. Aufl.). Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. Mitarbeit von Abteilung || 2 Wasser und Boden. Zugriff am 14. März 2022, verfügbar unter

- https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/uba_was-serwirtschaft_in_deutschland_2017_web_aktualisiert.pdf
- BMWi. (2022a). *Zahlen und Fakten: Energiedaten* [Excel Tabelle]. Berlin. <http://www.bmwi.de/Navigation/DE/Themen/energiedaten.html>
- BMWi (2022b). Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2021: Grafiken und Diagramme unter Verwendung aktueller Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik. Zugriff am 25. April 2022, verfügbar unter https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-2020.pdf;jsessionid=3DDA13E6ECE4C0771B0496BE04064536?__blob=publicationFile&v=36
- BMWi. (2020). *Die Nationale Wasserstoffstrategie: Nationales Reformprogramm 2020*. Berlin. Zugriff am 14. März 2022, verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=20
- BMWK. (2022, 28. Januar). *Im Fokus: Grüne Wärme: Neues Förderprogramm für nachhaltige Fernwärme*. BMWK; Statistisches Bundesamt; Bunderverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. Mitarbeit von Lepsius, N. Zugriff am 7. Juli 2022, verfügbar unter <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Schlaglichter-der-Wirtschaftspolitik/2022/02/04-im-fokus-gruene-waerme.html>
- BMWK & UBA. (2022, 15. März). *Treibhausgasemissionen stiegen 2021 um 4,5 Prozent: Bundesklimaschutzministerium kündigt umfangreiches Sofortprogramm an* [Press release]. Zugriff am 14. April 2022, verfügbar unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/03/20220315-treibhausgasemissionen-stiegen-2021-um-45-prozent.html>
- BMZ (Hrsg.). (2022). *Wasser und Energie: Zwischen dem Wasser- und dem Energie-sektor bestehen enge Verbindungen*. Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ). Berlin. Zugriff am 10. August 2022, verfügbar unter <https://www.bmz.de/de/themen/wasser/wasser-und-energie-20676>
- BMZ (o.D.). Integriertes Wasserressourcen-Management (IWRM). Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung. Berlin. Zugriff am 31. August 2022, verfügbar unter <https://www.bmz.de/de/service/lexikon/integriertes-wasserressourcen-management-iwrm-14530>
- Bormann, H., Gramlich, E., Müller, F., Schröder, M., Vodegel, S. & Sievers, M. (2019). *Keine Energie ohne Wasser: Zukunftsszenarien und Empfehlungen für die Weltentwicklung der Wasserwirtschaft unter gravierend veränderten energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen*.

- Abschlussbericht. Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Institution: Forschungszentrum der Technischen Universität Clausthal; *Tuttahs & Meyer Ingenieurgesellschaft für Wasser-, Abwasser- und Energiewirtschaft mbH. Clausthal-Zellerfeld.
- bpb. (2019). *Energieabhängigkeit: Energieabhängigkeitsquote in Prozent, ausgewählte europäische Staaten, 2016*. Bundeszentrale für politische Bildung. Bonn. Zugriff am 25. August 2022, verfügbar unter <https://www.bpb.de/kurz-knapp/zahlen-und-fakten/europa/135829/energieabhaengigkeit/>
- BUND Bremen. (2022). *Wasserspartipps: Wasser sparen ist sinnvoll*. BUND - BUND für Naturschutz und Umwelt in Deutschland. Bremen. Mitarbeit von Katharina Müller. Zugriff am 1. Juni 2022, verfügbar unter <https://www.bund-bremen.net/trinkwasser/wassersparen/>
- Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.). (2022). *Wasserstand des Flusses Weser in cm: Intschede, Rohdaten bis 13.07.2022 9:45 Uhr*. Koblenz. Zugriff am 13. Juli 2022, verfügbar unter <http://www.bafg.de/php/weser.htm>
- Bundesnetzagentur (2022a, Mai). Kraftwerksliste Bundesnetzagentur zum erwarteten Zu- und Rückbau 2022-2025. Bonn. Zugriff am 6. Juli 2022, verfügbar unter <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/start.html>
- Bundesnetzagentur (2022b). Kraftwerksliste Bundesnetzagentur (bundesweit; alle Netz- und Umspannebenen): Stand: 31.05.2022. Bonn. Zugriff am 6. Juli 2022, verfügbar unter <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/start.html>
- Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen. (2022). *Bestätigung Netzentwicklungsplan 2021-2035: Bedarfsermittlung 2021-2035*. Bonn. Zugriff am 26. April 2022, verfügbar unter https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/NEP2035_Bestaetigung.pdf
- Bundschuh, J., Kaczmarczyk, M., Ghaffour, N. & Tomaszewska, B. (2021). State-of-the-art of renewable energy sources used in water desalination: Present and future prospects: Present and future prospects. *Desalination*, 508, 115035. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115035> Zugriff am 24. August 2022, verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916421001065>
- Christmann, B. (8. August 2022). Interview durch H. Olbermann. „Ressource nicht unendlich“. Bremen. Zugriff am 10. August 2022, verfügbar unter <https://weserreport.de/2022/08/bremen-bremen/panorama/ressource-nicht-unendlich/>

- Ciroth, A. (2001). *Fehlerrechnung in Ökobilanzen*. Berlin. Technische Universität Berlin (Hrsg.). Zugriff am 21. Juli 2001, verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/307960388_Fehlerrechnung_in_Okobilanzen
- CR3-Kaffeeveredelung M. Hermsen GmbH. (o.D.). *Verantwortung: Belastungen minimieren, Ressourcen schonen*. Bremen. Zugriff am 1. September 2022, verfügbar unter <https://www.cr3-kaffeeveredelung.com/de/verantwortung>
- Danielzyk, R. & Münter, A. (2018). *Raumplanung. Handwörterbuch der Stadt- und Raumentwicklung, 1931–1942*. ARL- Akademie für Raumforschung und Landesplanung. Hannover. Zugriff am 10. August 2022, verfügbar unter <https://shop.arl-net.de/handwoerterbuch-stadt-raumentwicklung.html#V>
- DECHEMA e.V. (Hrsg.). (2022). *WavE- Themenfeld: Aufbereitung von salzhaltigen Grund- und Oberflächenwässern: Ergebnisse Kompakt*, Institution: BMBF; KIT, Frankfurt am Main. Zugriff am 20. April 2022, verfügbar unter https://bmbf-wave.de/Publikationen/WavE+Publikationen/_/WavE_Themenheft_SalzWasser_ezl_Links.pdf
- DECHEMA e.V. (2022). *WavE- Themenfeld: Kreislaufführung von industriell genutztem Wasser: Ergebnisse Kompakt*, Institution: BMBF; KIT. Frankfurt am Main. Zugriff am 20. April 2022, verfügbar unter https://bmbf-wave.de/Publikationen/WavE+Publikationen/_/WavE_Themenheft_Industrie_ezl_Links.pdf
- dena (Hrsg.). (2021). *Abschlussbericht dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität: Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe*. Deutsche Energie-Agentur GmbH, Berlin.
- Destatis (Destatis, Hg.). (2022). *Wasseraufkommen, Betriebe mit Wasseraufkommen: Bundesländer, Jahre, Wassergewinnung und -bezug: Bremen*. Zugriff am 27. Mai 2022, verfügbar unter <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=ergebnistabelleQualitaetSeparatAUS&levelindex=2&levelid=1653637022778&downloadname=32221-0001#abreadcrumb>
- Destatis (Destatis, Hg.). (2021). *Eigengewinnung und Fremdbezug von Wasser sowie Einleitung von Abwasser und ungenutztem Wasser in Deutschland*. Zugriff am 27. Mai 2022, verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Tabellen/ww-03-eigengewinnung-fremdbezug-einleitung-abwasser-2019.html;jsessionid=AEAF8260A362FBC8D048516AEC5C9D0.live742>
- Destatis (BGR, Hg.). (2018/2019). *Gesamte Wasserversorgung 2016 nach Wasserarten und Wirtschaftszweigen*. Zugriff am 2. Juni 2022, verfügbar unter https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Wasser/Bilder/Was_startseite_wversorg_g.html?nn=1542268

- Deutsche IPCC Koordinierungsstelle & ProClim. (2021). *Sechster IPCC-Sachstandsbericht (AR6): Beitrag von Arbeitsgruppe I: Naturwissenschaftliche Grundlagen*. Hauptaussagen. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. Bonn. Mitarbeit von Griesbeck_K. Zugriff am 9. Juni 2022, verfügbar unter https://www.umweltpakt.bayern.de/download/pdf/IPCC_Sachstandsbericht_2021_Teil1.pdf
- Deutsche Welthungerhilfe e.V. (Hrsg.). (2022). *Wasser – Ursache von Konflikten oder Quelle von Kooperation? Klima & Ressourcen*. Deutsche Welthungerhilfe e. V., Institution: IHE Delft Institute for Water Education, Bonn. Mitarbeit von Schmeier, S. Zugriff am 10. August 2022, verfügbar unter <https://www.welthungerhilfe.de/welternaehrung/rubriken/klima-ressourcen/so-sind-konflikte-um-wasser-loesbar>
- Deutscher Bundestag. (2022, 22. September). *Fraktionen streiten über AKW-Laufzeitverlängerung*. Berlin. Zugriff am 28. September 2022, verfügbar unter <https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2022/kw38-de-atomgesetz-19-aend-910838>
- Dietrich, G. (2017). *Handbuch Abwasser- und Recyclingtechnik* (3., vollständig überarbeitete Auflage). Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. München. Zugriff am 19. August 2022, verfügbar unter http://ebooks.ciando.com/book/index.cfm/bok_id/2366129
- Difu (Hrsg.). (2018). *Service & Kompetenzzentrum Kommunaler Klimaschutz, SK. Klimaschutz in Kommunen: Praxisleitfaden* (3. Aufl.). Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH, Institution: Deutsches Institut für Urbanistik; Institut für Energie- und Umweltforschung; Klima-Bündnis Europäischer Städte mit den Indigenen Völkern der Regenwälder zum Erhalt der Erdatmosphäre, Berlin. Mitarbeit von Diekelmann, P. <http://leitfaden.kommunaler-klimaschutz.de/>
- Ding, T. & Ho, G. W. (2021). Using the sun to co-generate electricity and freshwater. *Joule*, 5 (7), 1639–1641. Cell Press. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.06.021>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435121003093>
- Ditfurth, H. von (2020). Towards Smart Water – Die Zukunft der deutschen Wasserwirtschaft in einer vernetzten Welt. *Smart City–Made in Germany*, 351–361. Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-658-27232-6_39 Zugriff am 5. Juli 2022, verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-27232-6_39
- Du Tran, D. (2022, 2. Mai). *Power-to-X-Potenzialanalysen*. DECHEMA e.V. Mitarbeit von EUMB Pöschk GmbH & Co. KG. Berliner Energietage 2022, Berlin. Zugriff am 13. Mai 2022, verfügbar unter https://www.energietage.de/fileadmin/user_upload/2022/Vortraege/BET2022_5.01_Tran_Power-to-X-Potenziale.pdf

- DVGW (2021). Der Vorrang der öffentlichen Wasserversorgung muss gesetzlich verankert werden- denn Daseinsvorsorge braucht langfristige Sicherheit und Perspektive: DVGW Wasserimpuls. DVGW. Zugriff am 28. Juni 2022, verfügbar unter <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/dvgw-wasser-impuls-factsheet-vorrang-wasserversorgung.pdf>
- DVGW. (2020). *Zukunftsbilder 2030 bis 2100- Wandel erfordert bereits heute die Entwicklung langfristiger regionaler und lokaler Konzept: DVGW Wasser-Impuls*. DVGW. Bonn. Zugriff am 28. Juni 2022, verfügbar unter <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/dvgw-wasser-impuls-zukunftsbilder-factsheet.pdf>
- DWA (2022). *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft: Wasser.Boden.Natur. KW Korrespondenz Wasserwirtschaft, 15* (6). Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.; Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH. Zugriff am 28. Juni 2022, verfügbar unter https://de.dwa.de/files/_media/content/05_PUBLIKATIONEN/Zeitschriften/KW%20Korrespondenz%20Wasserwirtschaft/Vorschau%20KW/KW-2022-06-Leseprobe.pdf
- DWD. (2022a). *Bodenfeuchte*. Deutscher Wetterdienst. Offenbach. Zugriff am 13. Juli 2022, verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/leistungen/deutscherklimaatlas/erlaeuterungen/elemente/_functions/faqkarussell/bodenfeuchte.html
- DWD. (2022b). *Bodenfeuchteviewer Deutschland: Bodenfeuchteprofil unter Gras- Bremen*. Deutscher Wetterdienst. Offenbach. Zugriff am 13. Juli 2022, verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/landwirtschaft/appl/bf_view/_node.html
- DWD. (2022c). *Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Deutscher Klimaatlas*. Deutscher Wetterdienst. Offenbach. Zugriff am 3. Juni 2021, verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas_node.html
- EEA/Evrin Dogan Ozturk. (2019). *Adaptation challenges and opportunities for the European energy system: Building a climate-resilient low-carbon energy system. EEA report: no 2019,01*. Publications Office of the European Union, Institution: European Environment Agency, Luxembourg. <https://doi.org/10.2800/227321>
- Elbracht, J., Meyer, R. & Reutter, E. (2017). *Hydrogeologische Räume und Teilräume in Niedersachsen* (3. Aufl.). *GeoBerichte 3*. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Institution: LBEG Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover. Zugriff am 2. Juni 2022, verfügbar unter

- https://www.lbeg.niedersachsen.de/karten_daten_publicationen/publikationen/geoberichte/geoberichte-3-815.html https://doi.org/10.48476/GEOBER_3_2016
- Enquetekommission (2021, Dezember). Abschlussbericht der Enquetekommission: "Klimaschutzstrategien für das Land Bremen". Bremen. Mitarbeit von Michalik, M. Zugriff am 26. April 2022, verfügbar unter https://www.bremische-buergerschaft.de/presse/Abschlussbericht_Enquetekommission_Klima_Bremen_v1.pdf
- Ertl, T. & Perfler, R. (2019). Einsatz der Grundwassermodellierung in der Wasserversorgung. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 71 (9-10), 414. Springer Vienna. <https://doi.org/10.1007/s00506-019-00615-1> Zugriff am 10. August 2022, verfügbar unter <https://link.springer.com/article/10.1007/s00506-019-00615-1>
- Europäische Umweltagentur. (2022, 19. Januar). *Der Zustand des Wassers in Europa*. Europäisches Umweltinformations- und Umweltbeobachtungsnetz (Eionet). Kopenhagen. Zugriff am 13. April 2022, verfügbar unter <https://www.eea.europa.eu/de/signale/signale-2020/infografiken/der-zustand-des-wassers-in-europa/view>
- European Environment Agency. (2021). *Water resources across Europe- confronting water stress: an updated assessment*. Kopenhagen. Zugriff am 24. August 2022, verfügbar unter <https://www.eea.europa.eu/publications/water-resources-across-europe-confronting> <https://doi.org/10.2800/320975>
- Falkenmark, M. (2003). Freshwater as shared between society and ecosystems: from divided approaches to integrated challenges. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 358 (1440), 2037–2049. The Royal Society. <https://doi.org/10.1098/RSTB.2003.1386>
- Faltermann, P. (29. Januar 2021). So wird Bremen mit Trinkwasser versorgt. *WESER-KURIER*. Zugriff am 25. Mai 2022, verfügbar unter <https://www.weser-kurier.de/bremen/so-wird-bremen-mit-trinkwasser-versorgt-doc7e4jui3filuqdg82fga>
- FGG Weser, HMUKLV, STMUV, SKUMS, Nds. Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz, MUNV NRW, MWU Sachsen-Anhalt & TMUEN. (2021). *Bewirtschaftungsplan 2021 bis 2027 für die Flussgebietseinheit Weser gemäß § 83 WHG*. FGG Weser. Hildesheim. Zugriff am 29. Juni 2022, verfügbar unter <https://www.fgg-weser.de/component/jdownloads/?task=download.send&id=401&catid=8&m=0&Itemid=11>
- 1
- FGG Weser, HMUKLV, STMUV, SKUMS, Nds. Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz, MUNV NRW, MWU Sachsen-Anhalt & TMUEN. (2020). *Statusbericht zum aktuellen Umsetzungsstand des Maßnahmenprogramms 2015 bis 2021 und zur aktuellen Gewässergüte bzgl. der Salzbelastung von Werra und Weser*. FGG Weser. Hildesheim. Zugriff am 29. Juni

- 2022, verfügbar unter <https://www.fgg-weser.de/component/jdownloads/?task=download.send&id=396&catid=4&m=0&Itemid=111>
- Flörke, M., Onigkeit, J. & Oppel, H. (Hrsg.). (2021). *Water Resources as important factors in the Energy Transition at local and global scale: Final Report of the joint project WANDEL*. Ruhr-Universität Bochum, Bochum. http://www.hydrology.ruhr-uni-bochum.de/hydrology/mam/download/20210921_wandel_final_report_imperiakw.pdf
- Flörke, M., Bärlund, I. & Alcamo, J. (2011). Zukünftige Wassernutzung in Europa: Ergebnisse einer Ensemble-Analyse. *WARNSIGNAL KLIMA: Genug Wasser für alle?, 3. Auflage*, 338–344. Zugriff am 25. August 2022, verfügbar unter https://www.hereon.de/imperia/md/content/csc/warnsignalklima/Warnsignal_Klima_Kap3.1_3.1.11_Flo_rke.pdf
- Föederal Erneuerbarer (Agentur für erneuerbare Energien e.V., Hg.). (2019). *Bremen (HB)- Daten und Fakten zur Entwicklung Erneuerbarer Energien in einzelnen Bundesländern - Föederal Erneuerbar: Bundesländer mit neuer Energie*. Berlin. Zugriff am 8. August 2022, verfügbar unter https://www.ee-bundeslaender.de/landesinfo/bundesland/HB/kategorie/wasser/auswahl/177-wasserkraft_stromerz/#goto_177
- Fraunhofer IFF (Hrsg.). (2021). *Water as the Resource Critical to Hydrogen Production*. Forum der technisch-wissenschaftlichen Vereine und Verbände Sachsen-Anhalts, Magdeburg. Mitarbeit von Jentsch, S., Scheffler, M., & Birth, T. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16756.07040>
- Fraunhofer ISE (Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., Hg.). (2022, 3. Januar). *Nettostromerzeugung in Deutschland 2021: Erneuerbare Energien witterungsbedingt schwächer*. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme. Freiburg. Zugriff am 13. April 2022, verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/news/2022/nettostromerzeugung-in-deutschland-2021-erneuerbare-energien-witterungsbedingt-schwaecher.html?msckid=9400edd5bb2111ec9f27e373dc666595>
- Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISE & Fraunhofer IEG (Hrsg.). : Bd. 2021. *Metastudie Wasserstoff – Auswertung von Energiesystemstudien.: Studie im Auftrag des Nationalen Wasserstoffrats. Mitarbeit von Wietschel, M., Zheng, L., Arens, M., Hebling, C., Ranzmeyer, O., Schaadt, A., . . .* Zugriff am 23. August 2022, verfügbar unter https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2021/Metastudie_Wasserstoff_Abschlussbericht.pdf
- Fuhlrländer, D. (24. Mai 2022). Interview durch P. Niebel. Projekt „Resiliente Energiesysteme“ und Elektrolyse am Stahlstandort Bremen [Zoom Konferenz], 30 Minuten. Bremen.

- Gapp-Schmeling, K. (2022, 3. März). *Multikriterielle Nachhaltigkeitsbewertung kommunaler Wärmeversorgungsoptionen*. Mitarbeit von IZES, GDfB (Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hg.). (2022a). *Geologie Bremens*. Geologischer Dienst für Bremen. Bremen. Mitarbeit von Litt, T., Behre, K.H., Meyer, K.D., Stefan, H.J. & Wansa, S. Zugriff am 9. Juni 2022, verfügbar unter <https://www.gdfb.de/geologie/geologie-bremen/>
- GDfB. (2022b). *Grundwasserversalzung*. Geologischer Dienst für Bremen. Bremen. Zugriff am 9. Juni 2022, verfügbar unter <https://www.gdfb.de/hydrogeologie/grundwasserversalzung/>
- GDfB. (2020). *Mapbender3 - Geoplankarten_Hydrogeologie*. Geologischer Dienst für Bremen. Bremen. Zugriff am 13. Juli 2022, verfügbar unter <https://gdfbmapserver.marum.de/mapbender3/application/Hydrogeologie>
- Gerbens-Leenes, W., Hoekstra, A. & van der Meer, T. (2008). Water footprint of energy consumption: an Assessment of Water Requirements of Primary Energy Carriers. *ISESCO Science and Technology Vision*, 4 (5), 38–42. Zugriff am 14. März 2022, verfügbar unter <https://ris.utwente.nl/ws/portalfiles/portal/6695588/Gerbens08water3.pdf>
- GERICS (Hrsg.). (2020). *Klimaausblick Bremen*. Climate Service Center Germany. Mitarbeit von Pfeifer, S., Rechid, D., & Bathiany, S. Zugriff am 27. Mai 2022, verfügbar unter https://www.gerics.de/imperia/md/content/csc/projekte/klimasignalkarten/gerics_klimaausblick_bremen_version1.2_deutsch.pdf
- German Water Partnership e.V. (2017). *Aktionsplan Wasser: Fluchtursachen bekämpfen- Deutsche Wasserwirtschaft vor Ort*. GWP. Berlin. Zugriff am 28. Juni 2022, verfügbar unter https://germanwaterpartnership.de/wp-content/uploads/2019/05/GWP_Aktionsplan-Wasser_Langfassung_Sept2017.pdf
- Gernaat, D., Boer, H. S. de, Daioglou, V., Yalaw, S. G., Müller, C. & van Vuuren, D. P. (2021). Climate change impacts on renewable energy supply. *Nature Climate Change*, 11 (2), 119–125. Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00949-9>
https://idp.nature.com/authorize/casa?redirect_uri=https://www.nature.com/articles/s41558-020-00949-9&casa_token=nkv5t3lw73eaaaaa:xfgosoio77gctmfmf3usamft8cq3sgd83zfwjtex95gavhciyfn kibvy_6gnw8cpz64em0athtidya_
- Gerten, D. (2021). Wassermangel, Dürren und Welternährung. *Warnsignal Klima: Boden & Landnutzung*, 285–290. Hamburg. <https://doi.org/25592> Zugriff am 24. August 2022, verfügbar unter https://publications.pik-potsdam.de/rest/items/item_25888_3/component/file_26902/content (in Zusammenarbeit mit GEO).

- Gesundheitsamt Bremen. (2022, 1. Juni). *Trinkwasserüberwachung: Herkunft und Aufbereitung des Bremer Trinkwassers*. Gesundheitsamt Bremen. Bremen. Zugriff am 1. Juni 2022, verfügbar unter <https://www.gesundheitsamt.bremen.de/trinkwasser-2027>
- GKB. (2022). *GKB - Gemeinschaftskraftwerk Bremen | Projekt*. Gemeinschaftskraftwerk Bremen GmbH & Co. KG. Bremen. Zugriff am 11. Juli 2022, verfügbar unter <https://www.gk-bremen.de/projekt>
- Gleick & Peter H. (1994). Water and Energy. *Annu. Rev. Energy Environ.* (19), 267–299. Zugriff am 16. März 2022, verfügbar unter <https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev.eg.19.110194.001411>
- Göke, L., Kemfert, C., Kendzioriski, M. & Hirschhausen, C. von (2021). 100 Prozent erneuerbare Energien für Deutschland: Koordinierte Ausbauplanung notwendig. *DIW Wochenbericht*, 88 (29/30), 507–513. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW).Berlin. https://doi.org/10.18723/diw_wb:2021-29-1 Zugriff am 5. Juli 2022, verfügbar unter <https://www.econstor.eu/handle/10419/242058>
- Greenpeace e.V. (2016, März). Wasser - zu kostbar für Kohle: Greenpeace-Report zeigt den enormen Wasserverbrauch der Kohleindustrie.Hamburg. Zugriff am 24. August 2022, verfügbar unter <https://www.greenpeace.de/klimaschutz/energiewende/erneuerbare-energien/wasser-kostbar-kohle>
- Hamann, S. (29. Juni 2022). Interview durch P. Niebel. Trinkwasserliefermengen des TV Verden nach Bremen [Telefonat], 15 min. Bremen.
- Hamburger Bildungsserver (Hrsg.). (2022). *RCP-Szenarien*. Hamburg. Mitarbeit von Dieter Kasang. Zugriff am 9. Juni 2022, verfügbar unter <https://bildungsserver.hamburg.de/unsicherheiten-und-szenarien/4105604/rcp-szenarien/>
- Hans von Storch, Insa Meinke & Martin Claußen. (2018). *Hamburger Klimabericht- Wissen über Klima, Klimawandel und Auswirkungen in Hamburg und Norddeutschland*. Springer Spektrum. Berlin. Zugriff am 3. Juni 2022, verfügbar unter <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-662-55379-4.pdf>
- Hein, F., Litz, P. & Graichen, P. (2021). *Abschätzung der Klimabilanz Deutschlands für das Jahr 2021: Analyse* (2. Aufl.). Agora Energiewende, Institution: Agora Energiewende. Berlin. Zugriff am 14. April 2022, verfügbar unter https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_227_Abschaetzung-Klimabilanz-DE-2021_WEB.pdf
- Hirschfeld, J., Nilson, E. & Keil, F. (2016). *Alles im Fluss: Eine deutsche Wasserbilanz* (2. Aufl.). *Wasserflüsse in Deutschland*. DWA, Institution: BMBF; NaWaM; Institut für ökologische Wirtschaftsforschung; Bundesanstalt für Gewässerkunde; keep it balanced, Berlin. Mitarbeit

- von Fritz, S., & Dietsche, C. Zugriff am 6. Juli 2022, verfügbar unter <http://www.bmbf-alles-im-fluss.de/>
- Hoff, H. (2011). *Understanding the Nexus: Background paper for the Bonn2011 Nexus Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus*. Stockholm Environment Institute (SEI). Stockholm. Zugriff am 19. April 2022, verfügbar unter <https://mediamanager.sei.org/documents/Publications/SEI-Paper-Hoff-UnderstandingTheNexus-2011.pdf>
- Hoffman, A., Bergmann, A., Oelmann, M. & Gendries, S. (Juni 2022). Nutzungskonflikte ums Wasser nehmen zu: 3. Mühlheimer Tagung. *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 15 (6), S. 338–339.
- Huth, K., Joeres, A., Steeger, G., Donheiser, M. & Jacobsen, M. (14. Juni 2022). Knappes Wasser in Deutschland: Immer mehr Konflikte vor Gericht. *correctiv.org*. Zugriff am 28. Juni 2022, verfügbar unter <https://correctiv.org/aktuelles/klimawandel/2022/06/14/klimawandel-konflikt-um-wasser-in-deutschland/>
- ideas into energy gGmbH & German Water Partnership e.V. (2021). *Markt- und Branchenstudie zur Landwirtschaftlichen Bewässerung in Deutschland*. ideas into energy gGmbH. Berlin. Mitarbeit von Schimming, L., & Sand, H. Zugriff am 28. Juni 2022, verfügbar unter <https://germanwaterpartnership.de/wp-content/uploads/2022/01/Branchenstudie-LanBew-Deutschland.pdf>
- ifeu (Hrsg.). (2019a). *Bilanzierungs-Systematik Kommunal (BISKO): Empfehlungen zur Methodik der kommunalen Treibhausgasbilanzierung für den Energie- und Verkehrssektor in Deutschland*. Kurzfassung. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu), Heidelberg. Mitarbeit von Hertle, H., Dünnebeil, F., Gugel, B., Rechsteiner, E., & Reinhard, C. Zugriff am 5. August 2022, verfügbar unter https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/BISKO_Methodenpapier_kurz_ifeu_Nov19.pdf
- ifeu (Hrsg.). (2019b). *Der Kohleausstieg und die Auswirkungen auf die betroffenen Wärmenetze: Kurzstudie*. BMUV, Institution: ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg. Mitarbeit von Fritz, S., & Pehnt, M. Zugriff am 24. August 2022, verfügbar unter https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/190820_Kohleausstieg_und_Fernwaerme_Bericht_v_06.pdf
- Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (2021, Mai). *Ergänzende Untersuchung Energie- und Klimaschutzszenarien 2030 für das Land Bremen: Berechnungen und Ziele (Endbericht)*. Heidelberg. Mitarbeit von Gugel, B., Dünnebeil, F., Lempik, J., & Räder, D.,
- IPCC (2021). *Technical Summary: The physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: The physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the*

- Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change*, 33–144. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.002>. Zugriff am 9. Juni 2022, verfügbar unter https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_TS.pdf
- IPCC (2013). The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change*, 1535 pp. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom; New York, NY. Mitarbeit von Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (Hrsg.). Zugriff am 9. Juni 2022, verfügbar unter https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf
- IWW (2019). Umgang mit Zielkonflikten bei der Anpassung der Wasserwirtschaft an den Klimawandel: Abschlussbericht. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA). Zugriff am 9. August 2022, verfügbar unter http://www.laenderfinanzierungsprogramm.de/static/LFP/Dateien/LAWA/Sonstige/K%201.19%20IWW_Zielkonflikte_Endbericht.pdf
- Jacob, D. (Hrsg.). (2018). *Baubetriebswirtschaftslehre und Infrastrukturmanagement. Wirtschaftlichkeit schwimmender Offshore Windenergieanlagen: Wirtschaftlich-technische Untersuchungen und Kostensenkungspotenziale*. Springer Gabler, Wiesbaden. Mitarbeit von Kausche, M. Zugriff am 22. August 2022, verfügbar unter <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-658-19581-6.pdf>
- Julia Weiler (11. Oktober 2021). Warum das Wasser bei der Energiewende nicht vergessen werden darf. *Rubin*, 2021 (2). Zugriff am 14. März 2022, verfügbar unter <https://news.rub.de/wissenschaft/2021-10-11-hydrologie-warum-das-wasser-bei-der-energiewende-nicht-vergessen-werden-darf>
- Kalkau, T. (31. Mai 2022). Interview durch P. Niebel. Wasserverbrauch am Standort Mittelsbüren aufgrund der geplanten Elektrolyseanlage am Stahlwerk [Zoom Meeting], 30 min. Bremen.
- Kendzioriski, M., Göke, L., Kiefert, C., Hirschhausen, C. R. von & Zozmann, E. (2021). 100% erneuerbare Energie für Deutschland unter besonderer Berücksichtigung von Dezentralität und räumlicher Verbrauchsnähe: Potenziale, Szenarien und Auswirkungen auf Netzinfrastrukturen. *DIW Berlin: Politikberatung kompakt* (167). Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW). Berlin. Zugriff am 5. September 2022, verfügbar unter <https://www.econstor.eu/handle/10419/236742>
- Klimakompetenznetzwerk Niedersachsen. (2019). *Klimawirkungsstudie Niedersachsen: Wissenschaftlicher Hintergrundbericht* (1. Aufl.). Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie Bauen und Klimaschutz, Institution: Niedersächsisches Ministerium für Umwelt,

- Energie Bauen und Klimaschutz; Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie; Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz. Hannover.
- Kluth, W. & Smeddinck, U. (Hrsg.). (2020). *Lehrbuch. UMWELTRECHT: Ein Lehrbuch* (2. Aufl.). Springer, Halle (Saale). Zugriff am 14. April 2022, verfügbar unter <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-662-59683-8.pdf>
- Krippenstapel, I., Amlang, S.-H., Schmidt, B. & Kuhn, U. (Juni 2022). Nachhaltiges Flussmanagement in der Flussgebietseinheit Weser: Gewässerbewirtschaftung und Hochwasserrisikomanagement aus überregionaler Sicht. *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 15 (6), S. 368–375.
- Lagner, A. (2020). *Steel4Future: Nachhaltigkeit im Überblick 2020*. ArcelorMittal Germany Holding GmbH. Hamburg.
- Langer, S. & Koch, M. (2018). *Bericht der Verwaltung für die Sitzung der Deputation für Umwelt, Bau, Verkehr, Stadtentwicklung und Energie (S) am 20.09.2018: Trinkwasserversorgung in Bremen-aktueller Stand und Entwicklung* [Protokoll]. Der Senator für Umwelt, Bau und Verkehr. Zugriff am 31. Mai 2022.
- Larsen, M. A. D. & Drews, M. (2019). Water use in electricity generation for water-energy nexus analyses: The European case. *The Science of the total environment*, 651 (Pt 2), 2044–2058. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.045>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718339184>
- LAWA & STMUV (Hrsg.). (2020). *Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft: Bestandsaufnahme, Handlungsoptionen und strategische Handlungsfelder 2020: LAWA Klimawandel-Bericht 2020*, Institution: Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, München. Zugriff am 14. März 2022, verfügbar unter https://www.lawa.de/documents/lawa-klimawandel-bericht_2020_1618816705.pdf
- LBEG (2017). *klimatische Wasserbilanz im Sommerhalbjahr (April bis September) für Niedersachsen und Bremen im Zeitraum 1981-2010*. Hannover. Zugriff am 8. August 2022, verfügbar unter <https://www.lbeg.niedersachsen.de/download/126872>
- LBEG. (2015). *Entnahmebedingungen in den grundwasserführenden Gesteinen: Maßstab 1 : 500 000*. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie. Zugriff am 2. Juni 2022, verfügbar unter <https://www.lbeg.niedersachsen.de/HUEK500Entnahmebedingungen/entnahmebedingungen-in-den-grundwasserfuehrenden-gesteinen-1500-000-528.html>
- LBEG. (o.D.). *Versalzung des Grundwassers: Hydrogeologie* [Bodeninformationssystem NIBIS®]. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie. Hannover. Zugriff am 11. August 2022, verfügbar unter <https://nibis.lbeg.de/cardomap3/?permalink=lr5RIXF#>
- LLUR & DWD. (2017). *Klimareport Schleswig-Holstein: Fakten bis zur Gegenwart- Erwartungen für die Zukunft*. Flintbek. Zugriff am 9. Juni 2022, verfügbar unter

- https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimareport_sh/download_report_2017.pdf?__blob=publicationFile&v=5
- Lohrmann, A., Child, M. & Breyer, C. (2021). Assessment of the water footprint for the European power sector during the transition towards a 100% renewable energy system. *Energy*, 233, 121098. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121098>
- Lübcke, A. (2022, 4. Mai). *Mit Wasserstoff zum klimaneutralen Industriestandort Deutschland: Wunsch und Wirklichkeit*. Wasserstoffkompass; acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V. Mitarbeit von EUMB Pöschk GmbH & Co. KG. Berliner Energietage 2022, Berlin. Zugriff am 13. Mai 2022, verfügbar unter https://www.energetage.de/fileadmin/user_upload/2022/Vortraege/BET2022_5.01_Luebcke_Wasserstoffstandort_Deutschland.pdf
- Markonis, Y., Kumar, R., Hanel, M., Rakovec, O., Máca, P. & AghaKouchak, A. (2021, Februar). The rise of compound warm-season droughts in Europe. *Science Advances*, 7 (6). American Association for the Advancement of Science (AAAS). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abb9668>
- Meldrum, J., Nettles-Anderson, S., Heath, G. & Macknick, J. (2013). Life cycle water use for electricity generation: a review and harmonization of literature estimates. *Environmental Research Letters*, 8 (1), 15031. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015031> Zugriff am 21. März 2022, verfügbar unter <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/1/015031/pdf>
- Metropolregion Bremen-Oldenburg im Nordwesten e.V. (Hrsg.). (2021). *Wasserstoffstrategie: Metropolregion Nordwest*, Delmenhorst.
- Müller Schmied, H., Cáceres, D., Eisner, S., Flörke, M., Herbert, C., Niemann, C., Peiris, T. A., Popat, E., Portmann, F. T., Reinecke, R., Schumacher, M., Shadkam, S., Telteu, C.-E., Trautmann, T. & Döll, P. (2021). The global water resources and use model WaterGAP v2.2d: model description and evaluation. *Geoscientific Model Development*, 14 (2), 1037–1079. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-1037-2021>
- Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina (Hrsg.). (2022). *Wie sich russisches Erdgas in der deutschen und europäischen Energieversorgung ersetzen lässt: Ad-hoc Stellungnahme*. Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Halle (Saale). Mitarbeit von Schlögl, R., Schüth, F., Boetius, A., Edenhofer, O., Grimm, V., Günter, S., . . . Zugriff am 2. Mai 2022, verfügbar unter https://www.leopoldina.org/fileadmin/redaktion/Publikationen/Nationale_Empfehlungen/2022_Stellungnahme_Energiesicherheit_V1.1.pdf
- Nds. Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz (Hrsg.). (2022). *Kernaussagen des Wasserversorgungskonzeptes Niedersachsen*, Hannover. Zugriff am 10. August 2022, verfügbar unter

<https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/wasser/wasserversorgungskonzept-niedersachsen-210626.html>

Nds. Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz. (2016a). *Grundwasserkörper*. Nds. Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz. Hannover. Zugriff am 2. Juni 2022, verfügbar unter

https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/wasser/grundwasser/grundwasserbericht_niedersachsen/nutzung_schutz_und_uberwachung/hydrogeologischer_uberblick/grundwasserkorper/grundwasserkoerper-105236.html

Nds. Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz. (2016b). *Grundwasserneubildung*. Nds. Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz. Hannover. Zugriff am 2. Juni 2022, verfügbar unter

https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/wasser/grundwasser/grundwasserbericht_niedersachsen/nutzung_schutz_und_uberwachung/hydrogeologischer_uberblick/grundwasserneubildung/grundwasserneubildung-105161.html

Nds. Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz. (2016c). *Grundwasserneubildung* /. Nds. Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz. Hannover. Zugriff am 2. Juni 2022, verfügbar unter

https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/wasser/grundwasser/grundwasserbericht_niedersachsen/nutzung_schutz_und_uberwachung/hydrogeologischer_uberblick/grundwasserneubildung/grundwasserneubildung-105161.html

Nds. Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz. (2015a). *Grundwasserbeschaffenheit* /. Nds. Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz. Hannover. Zugriff am 2. Juni 2022, verfügbar unter

https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/wasser/grundwasser/grundwasserbericht_niedersachsen/nutzung_schutz_und_uberwachung/hydrogeologischer_uberblick/grundwasserbeschaffenheit/grundwasserbeschaffenheit-105234.html

Nds. Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz. (2015b). *Hydrogeologische Räume in Niedersachsen*. Nds. Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz. Hannover. Zugriff am 2. Juni 2022, verfügbar unter

https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/wasser/grundwasser/grundwasserbericht_niedersachsen/nutzung_schutz_und_uberwachung/hydrogeologischer_uberblick/hydrogeologische_raume_in_niedersachsen/hydrogeologische-raeume-in-niedersachsen-105219.html

Nellessen, C., Klein, T., Rapp, H.-J. & Rögner, F. (2021). Klimaschonung durch Membrananwendung – Membrandestillation zur Erzeugung von pharmazeutischem Reinstwasser. *Chemie Ingenieur*

- Technik*, 93 (9), 1345–1351. Wiley. <https://doi.org/10.1002/cite.202100030> Zugriff am 19. August 2022.
- Neuhold, C. (2022). Integrale Planungen der Wasserwirtschaft. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 74 (3-4), 95–96. Springer Vienna. <https://doi.org/10.1007/s00506-022-00862-9> Zugriff am 10. August 2022, verfügbar unter <https://link.springer.com/article/10.1007/s00506-022-00862-9>
- Niet, T., Arianpoo, N., Kuling, K. & Wright, A. S. (2021). Embedding the United Nations sustainable development goals into energy systems analysis: expanding the food–energy–water nexus. *Energy, Sustainability and Society*, 11 (1). <https://doi.org/10.1186/s13705-020-00275-0> Zugriff am 19. April 2022, verfügbar unter <https://link.springer.com/content/pdf/10.1186/s13705-020-00275-0.pdf>
- Norddeutscher Rundfunk (Hrsg.). (2022a). *Wasserknappheit in Deutschland: "Eine zunehmende Bedrohung"*. Norddeutscher Rundfunk, Institution: tagesschau, Hamburg. Mitarbeit von Hagmann, U., & Rademacher, O. Zugriff am 31. August 2022, verfügbar unter <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/verbraucher/wassermangel-deutschland-101.html>
- Norddeutscher Rundfunk (Hrsg.). (2022b). *Folgen des Klimawandels: Deutschland trocknet langsam aus*. Norddeutscher Rundfunk, Institution: tagesschau, Hamburg. Zugriff am 22. September 2022, verfügbar unter <https://www.tagesschau.de/inland/gesellschaft/wasserknappheit-deutschland-101.html>
- Onyx Germany GmbH. (2020). *Kraftwerk Farge in Deutschland*. Berlin. Zugriff am 11. Juli 2022, verfügbar unter <https://www.onyx-power.com/de/standorte/kraftwerk-farge/>
- ONYX Power. (2021, 14. Juli). *Kraftwerk Bremen-Farge erhält Zuschlag für Beendigung der Kohleverstromung* [Press release]. Bremen. Zugriff am 1. Juni 2022, verfügbar unter https://www.onyx-power.com/wp-content/uploads/aktuelles/210714_PRESSEMITTEILUNG_Onyx-Power_Zuschlag-Kraftwerk-Farge-1.pdf
- ONYX Power. (2020). *Vom Kohleausstieg zu einer CO₂-freundlichen Stromproduktion*. Bremen. Zugriff am 8. August 2022, verfügbar unter <https://www.onyx-power.com/de/fossile-energie/>
- Panagopoulos, A. (2021). Water-energy nexus: desalination technologies and renewable energy sources. *Environmental Science and Pollution Research*, 28 (17), 21009–21022. Springer; Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13332-8> Zugriff am 19. August 2022, verfügbar unter <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-13332-8>
- Pittock, J. (2011). National Climate Change Policies and Sustainable Water Management: Conflicts and Synergies. *Ecology and Society*, 16 (2). Resilience Alliance, Inc. <https://doi.org/10.5751/ES-04037-160225>

- Pressestelle OOWV (29. Juni 2022). Trinkwassermengen geliefert vom OOWV an Bremen im Jahr 2021 (E-Mail).
- Prognos AG, Öko-Institut e.V. & Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH. (2021). *Klimaneutrales Deutschland 2045: Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann.: Zusammenfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende*. Berlin. Zugriff am 3. Juni 2022, verfügbar unter https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_209_KNDE2045_Zusammenfassung_DE_WEB.pdf
- Quaschnig, V. (November 2021). *Spezifische Kohlendioxidemissionen verschiedener Brennstoffe*. Berlin. Zugriff am 22. August 2022, verfügbar unter <https://www.volker-quaschnig.de/datserv/CO2-spez/index.php>
- Rauner, S. & Budzinski, M. (2017, Dezember). Holistic energy system modeling combining multi-objective optimization and life cycle assessment. *Environmental Research Letters*, 12 (12), 1–13. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK); Helmholtz Centre for Environmental Research (UFZ). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa914d> Zugriff am 21. Juli 2022, verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/320238770_Holistic_energy_system_modeling_combining_multi-objective_optimization_and_life_cycle_assessment
- Riedel, T., Nolte, C., Beek, T. aus der, Liedtke, J., Sures, B. & Grabner, D. (2021). *Niedrigwasser, Dürre und Grundwasserneubildung – Bestandsaufnahme zur gegenwärtigen Situation in Deutschland, den Klimaprojektionen und den existierenden Maßnahmen und Strategien: Abschlussbericht. Texte | 174/2021* [PDF], Institution: Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. Zugriff am 16. März 2022, verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-01-17_texte_174-2021_niedrigwasser_duerre_und_grundwasserneubildung.pdf
- Röben, E. (19. Mai 2022). Interview durch P. Niebel. Wasserverbrauch in Fernwärmenetzen der swb [Microsoft Teams], 30 min. Bremen.
- Rosling, H., Rosling, O. & Rosling Rönnlund, A. (2019). *Factfulness: ten reasons we're wrong about the world - and why things are better than you think* (2. Aufl.). Flatiron Books. New York.
- Rothstein, B., Müller, U., Greis, S., Schulz, J., Scholten, A. & Nilson, E. (2008). Elektrizitätsproduktion im Kontext des Klimawandels: Auswirkungen der sich ändernden Wassertemperaturen und des sich verändernden Abflussverhaltens. *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 10 (1), 555–561. DWA.
- Sanna, A., Kaltschmitt, M. & Ernst, M. (2019). PV-betriebene Umkehrosmoseanlage zur Meerwasserentsalzung – Modellierung und Analyse verschiedener

- Energieversorgungsvarianten. *Chemie Ingenieur Technik*, 91 (12), 1853–1873. <https://doi.org/10.1002/cite.201900095> Zugriff am 19. August 2022, verfügbar unter https://tore.tuhh.de/bitstream/11420/3936/1/Sanna_et_al-2019-Chemie_Ingenieur_Technik.pdf
- Schäuble, D., Volkert, D., Jacobs, D. & Töpfer, K. (2014). *CO₂-Emissionsgrenzwerte für Kraftwerke: Ausgestaltungsansätze und Bewertung einer möglichen Einführung auf nationaler Ebene*. IASS Working Paper. Institute for Advanced Sustainability Studies Potsdam (IASS) e. V. Potsdam. Zugriff am 25. August 2022, verfügbar unter https://www.iass-potsdam.de/sites/default/files/files/working_paper_emissionsgrenzwerte.pdf <https://doi.org/10.2312/iass.2014.005>
- Schubert, H. (2011). Die Konzepte des Virtuellen Wassers und des Wasser-Fußabdrucks. *acatech Materialien* (4). Karlsruher Institut für Technologie KIT, Institut für Bio- und Lebensmitteltechnik.München.
- SCI4climate.NRW (Hrsg.). (2022). *Quantitativer Vergleich aktueller Klimaschutzszenarien für Deutschland*. SCI4climate.NRW, Wuppertal. Mitarbeit von Samadi, S. Zugriff am 25. August 2022, verfügbar unter https://www.energy4climate.nrw/fileadmin/Service/Publikationen/Ergebnisse_SCI4climate.NRW/Szenarien/2022/samadi-2022-vergleich-aktueller-klimaschutzszenarien-fuer-deutschland-cr-sci4climatenrw.pdf
- SCI4climate.NRW. (2021). *Wasserstoffimporte, Bewertung der Realisierbarkeit on Wasserstoffimporten gemäß der Zielvorgaben der Nationalen Wasserstoffstrategie bis zum Jahr 2030*, Institution: Fraunhofer UMSICHT. Gelsenkirchen. Mitarbeit von Egenolf-Jonkmanns, B., Glasner, C., Seifert, U., Küper, M., Schaefer, T., Merten, F., . . . Zugriff am 31. August 2022, verfügbar unter https://www.energy4climate.nrw/fileadmin/Service/Publikationen/Ergebnisse_SCI4climate.NRW/Technologie_und_Infrastrukturen/bewertung-der-realisiertbarkeit-von-wasserstoffimporten-gemaess-den-zielvorgaben-der-nationalen-wasserstoffstrategie-bis-zum-jahr-2030-cr-sci4climatenrw.pdf
- Semmling, E., Berger, M., Campos, J., Carolli, M., Dantas, I., Kosatica, E., Kramer, A., Mikosch, N., Nouri, H., Schlattmann, A., Schmidt, F. & Schomberg, A. (2019). *Advancing the Water Footprint into an instrument to support achieving the SDGs: Policy Brief*, Institution: adelphi reserach gemeinnützige GmbH. Berlin. Zugriff am 16. März 2022, verfügbar unter https://programme.worldwaterweek.org/Content/ProposalResources/PDF/2019/pdf-2019-8523-6-Policy_Brief_WEB_2b.pdf <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-15434>

- Senatorin für Wirtschaft, Arbeit und Europa, Senatorin für Wissenschaft und Häfen & SKUMS (2021, Dezember). Wasserstoffstrategie Land Bremen. Zugriff am 25. April 2022, verfügbar unter <https://www.bremen-innovativ.de/wp-content/uploads/2022/02/Wasserstoffstrategie-Land-Bremen.pdf>
- Serena Bilanceri (buten un binnen, Hg.). (2020). *Wo kommt Bremens Trinkwasser her*. Bremen. Zugriff am 1. Juni 2022, verfügbar unter <https://www.butenunbinnen.de/nachrichten/trinkwasser-bremen-bezugsquellen-zahlen-100.html>
- SKUMS. (2022a). *Messstation Bremen-Hemelingen: Daten zum Weserwasser*. Bremen. Zugriff am 11. Juli 2022, verfügbar unter <https://www.bauumwelt.bremen.de/umwelt/wasser/oberflaechengewaesser/messstation-bremen-hemelingen-28654>
- SKUMS (Hrsg.). (2022b). *Wasserkraft: Erneuerbare Energie aus der Weser*. Bremen. Zugriff am 8. August 2022, verfügbar unter <https://www.bauumwelt.bremen.de/klimaschutz/klima-energie/wasserkraft-30758>
- SKUMS. (2021a, 15. April). *Klimaschutzsenatorin Schaefer und Onyx Power stimmen Ausstieg aus Kohleverstromung im Kraftwerk Farge ab - Pressestelle des Senats* [Press release]. Bremen. Zugriff am 1. Juni 2022, verfügbar unter <https://www.senatspressestelle.bremen.de/pressemitteilungen/klimaschutzsenatorin-schaefer-und-onyx-power-stimmen-ausstieg-aus-kohleverstromung-im-kraftwerk-farge-ab-356315?asl=bremen02.c.732.de>
- SKUMS (2021b). Das Bundesland Bremen: Länderbericht zum Stand des Ausbaus der erneuerbaren Energien sowie zu Flächen, Planungen und Genehmigungen für die Windenergienutzung an Land. Zugriff am 25. April 2022, verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/EEG-Kooperationsausschuss/2021/laenderbericht-bremen-2021.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- SKUMS (2019). *Umwelt in Bremen und Bremerhaven: Umweltzustandsbericht 2019*. Bremen. Zugriff am 8. August 2022, verfügbar unter file:///C:/Users/piani/Downloads/Umweltzustandsbericht-2019_web_barrierearm.pdf
- SKUMS (2017). *Abfallwirtschaftsplan 2017 für das Land Bremen: Planungszeitraum 2007-2026*. Der Senator für Umwelt, Bau und Verkehr. Bremen. Zugriff am 24. August 2022, verfügbar unter <https://www.bauumwelt.bremen.de/sixcms/media.php/13/AWP%202017%20buisy.pdf>
- SKUMS. (2013). *Grundwassergütebericht 2013 der Freien Hansestadt Bremen*. Senator für Umwelt, Bau und Verkehr der Freien Hansestadt Bremen. www.umwelt.bremen.de unter Wasser\Grundwasser <https://doi.org/10.1515/9783112353226-006>

- SRU. (2020). *Für eine entschlossene Umweltpolitik in Deutschland und Europa: Umweltgutachten 2020*. Geschäftsstelle des Sachverständigenrates für Umweltfragen. Berlin. Zugriff am 24. August 2022, verfügbar unter https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2016_2020/2020_Umweltgutachten_Entschlossene_Umweltpolitik.html
- StaBuA. (2022). *Wasserförderung nach Wasserarten 2019*. BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. Berlin. Zugriff am 2. Juni 2022, verfügbar unter <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/wasserfoerderung-nach-wasserarten/>
- Statistisches Bundesamt & BKG (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hg.). (2019). *Öffentliche Wasserversorgung der Bundesländer 2016 nach Wasserarten*. Zugriff am 2. Juni 2022, verfügbar unter https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Wasser/Produkte/Downloads/abb_oeff_wversorg_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- Statistisches Landesamt Bremen (Hrsg.). (2022a). *Endenergieverbrauch nach Energieträgern: Bremen 2020*, Bremen. Zugriff am 8. August 2022, verfügbar unter <https://www.lak-energiebilanzen.de/barcharts/?a=e400>
- Statistisches Landesamt Bremen (Hrsg.). (2022b). *Länderarbeitskreis Energiebilanzen: Energieflussbild Bremen 2020*, Bremen. Zugriff am 8. August 2022, verfügbar unter <https://www.lak-energiebilanzen.de/energieflussbild/>
- Statistisches Landesamt Bremen (Hrsg.). (2021a, 14. Dezember). *Primärenergieverbrauch nach Energieträgern*. Bremen. Zugriff am 22. August 2022, verfügbar unter https://www.lak-energiebilanzen.de/ergebnisse-des-datenabrufs/?a=e100&j=2019&l=1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16&v=anm,insgesamt,agg_steinkohle,agg_braunkohle,agg_minoele,agg_gase,agg_erneuer,andere_strom_pev,andere_kernenergie,andere_andere_pev,Stand
- Statistisches Landesamt Bremen (Hrsg.). (2021b, 14. Dezember). *Primärenergieverbrauch nach Erneuerbaren Energieträgern*. Bremen. Zugriff am 22. August 2022, verfügbar unter https://www.lak-energiebilanzen.de/ergebnisse-des-datenabrufs/?a=e600&j=2019&l=1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16&v=anm,agg_erneuer_insgesamt,erneuer_klaerdepgas,erneuer_wasser,erneuer_wind,erneuer_solar,erneuer_biomasse,erneuer_sonst,Stand
- Statistisches Landesamt Bremen (Hrsg.). (2021c). *Statistisches Jahrbuch 2021* (1. Aufl.), Bremen.
- Statistisches Landesamt Bremen (2016, Januar). *Energie- und CO₂- Bilanzen des Landes Bremen 2013*. Bremen. Zugriff am 22. August 2022, verfügbar unter https://www.statistik.bremen.de/sixcms/media.php/13/Bericht_EnergieCO2_2013_pdfa.pdf

- Stemmler, C. (2022, 2. Mai). *Optionen für den Import von grünem Wasserstoff nach Deutschland per Tanker und Pipeline: Zwischenergebnisse der ESYS-AG "Wasserstoffwirtschaft 2030"*. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.; Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina; Union der deutschen Akademien der Wissenschaften; ESYS. Mitarbeit von EUMB Pöschk GmbH & Co. KG. Berliner Energietage 2022, Berlin. Zugriff am 13. Mai 2022, verfügbar unter https://www.energietage.de/fileadmin/user_upload/2022/Vortraege/BET2022_5.01_Stoecker_Import_Gruener_Wasserstoff.pdf
- Stiftelsen Gapminder (Hrsg.). (2022). *Industrial Water Withdrawal (% of total): Environment: Water*. Stockholm. Mitarbeit von Rosling, O., & Rosling Rönnlund, A. Zugriff am 22. September 2022, verfügbar unter [https://www.gapminder.org/tools/#\\$ui\\$chart\\$opacitySelectDim:0.08;;&model\\$markers\\$bubble\\$encoding\\$selected\\$data\\$filter\\$markers@=deu&=bgr;;;&size\\$data\\$concept=industrial_water_withdrawal_percent_of_total&space=@=country&=time;;&scale\\$domain:null&type:null&zoomed:null;;&frame\\$speed:1200&value=2015;;;;;&chart-type=map&url=v1](https://www.gapminder.org/tools/#uichart$opacitySelectDim:0.08;;&model$markers$bubble$encoding$selected$data$filter$markers@=deu&=bgr;;;&size$data$concept=industrial_water_withdrawal_percent_of_total&space=@=country&=time;;&scale$domain:null&type:null&zoomed:null;;&frame$speed:1200&value=2015;;;;;&chart-type=map&url=v1)
- Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende & Agora Verkehrswende. (2021). *Politikinstrumente für ein klimaneutrales Deutschland: 50 Empfehlungen für die 20. Legislaturperiode (2021-2025)* (1. Aufl.). Berlin.
- swb AG. (2022). *Geschäftsbericht 2021: Nachhaltig Wirtschaften und Handeln*. swb AG. Bremen. Zugriff am 9. Juni 2022, verfügbar unter <https://www.swb.de/-/media/files/publikationen/swb-geschaeftsbericht-2021.pdf>
- swb AG & wesernetz Bremen GmbH (2020). *Der Weg der Wärme in die Zukunft: langfristige Wärmestrategie für Bremen und Bremerhaven*. Bremen. Zugriff am 23. August 2022, verfügbar unter <https://www.wesernetz.de/-/media/wesernetz/downloads/waermenetzkarte/broschuerewaermestrategie.pdf>
- swb AG & Landesinstitut für Schule Bremen. (2018). *Für Wissensdurstige: Faszinierendes zum Thema Wasser*. Bremen. Zugriff am 1. Juni 2022, verfügbar unter [swb-Trinkwasser-2018_08_web.indd](#)
- swb Entsorgung GmbH & Co. KG. (o.D.). *Unsere Müllverbrennungsanlagen in Bremen*. Bremen. Zugriff am 25. August 2022, verfügbar unter <https://www.swb.de/geschaeftskunden/entsorgung/anlagen>
- swb Erzeugung AG & Co. KG & swb Entsorgung GmbH & Co. KG. (2021). *Umwelterklärung 2021: Konsolidierte Umwelterklärung 2021 von swb Erzeugung und swb Entsorgung*. swb Erzeugung AG & Co. KG; swb Entsorgung GmbH & C. KG. Bremen. Mitarbeit von Doyen, C.

- swb Vertrieb Bremen GmbH. (2022). *Trinkwasseranalyse: Schluck für Schluck geprüfte Qualität*. swb Vertrieb Bremen GmbH. Bremen. Zugriff am 1. Juni 2022, verfügbar unter <https://www.swb.de/-/media/files/wasser/trinkwasser-analyse-bremen.pdf>
- Technische Universität Berlin. (2019). *Welle Database* [Excel]. <https://welle.see.tu-berlin.de/data/>
- Terrapon-Pfaff, J., Ortiz, W., Viebahn, P., Kynast, E. & Flörke, M. (2020, September). Water Demand Scenarios for Electricity Generation at the Global and Regional Levels. *Water*, 12 (9), 2482. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/w12092482> Zugriff am 22. Juli 2022.
- The World Economic Forum. (2022). *The Global Risk Report 2022: Insight Report* (17. Aufl.). The World Economic Forum. Geneva. Zugriff am 14. April 2022, verfügbar unter https://www3.weforum.org/docs/WEF_The_Global_Risks_Report_2022.pdf
- Tollefson, J. (2022, April). Nature-Ukraine and Energy-Climage-Food: Russia's invasion has caused a short-term spike in prices, but could prompt a long-term shift towards sustainability. *Nature*, 2022 (604), 232–233. Springer Nature Limited. New York. Zugriff am 10. August 2022, verfügbar unter https://www.nature.com/articles/d41586-022-00969-9?mc_cid=a0755c17c5&mc_eid=7c357a3b65
- Tröltzsch, J., Stein, U., Vidaurre, R., Bueb, B., Schmitt, H., Flörke, M., Wrieger-Bechtold, A. & Herrmann, F. (2021). Auswirkung des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit- Anpassung an Trockenheit und Dürre in Deutschland. *WASSERWIRTSCHAFT* (11), 44–48. Springer Professional.
- TU Clausthal & Tutthaus & Meyer Ingenieurgesellschaft. (2016). *Übersicht der genutzten Wassermengen in Deutschland 2016*. Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU). Zugriff am 11. Juli 2022, verfügbar unter https://www.dbu.de/533bild47570_2985_38668.html
- UBA (Hrsg.). (2022a, 26. Juli). *Erdüberlastungstag: Ressourcen für 2022 verbraucht: Erdüberlastungstag*. Dessau-Roßlau. Zugriff am 23. August 2022, verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/erdueberlastungstag-ressourcen-fuer-2022-verbraucht>
- UBA (Hrsg.). (2022b, 19. Mai). *Kraftwerke: konventionelle und erneuerbare Energieträger*. Dessau-Roßlau. Zugriff am 25. Mai 2022, verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/kraftwerke-konventionelle-erneuerbare#kraftwerkstandorte-in-deutschland>
- UBA. (2022c, 25. März). *Energieverbrauch für fossile und erneuerbare Wärme: Wärmeverbrauch und -erzeugung nach Sektoren*. Dessau-Roßlau. Zugriff am 7. Juli 2022, verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-fuer-fossile-erneuerbare-waerme#warmeverbrauch-und-erzeugung-nach-sektoren>

- UBA. (2022d, 17. Januar). *Primärenergiegewinnung und -importe: Importabhängigkeit verringern*. Dessau-Roßlau. Zugriff am 24. August 2022, verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergiegewinnung-importe>
- UBA (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, Hg.). (2022e). *Primärenergieverbrauch*. Dessau-Roßlau. Zugriff am 20. April 2022, verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergieverbrauch#primarenergieverbrauch-nach-energietragern>
- UBA (Hrsg.). (2021a). *Ausgewählte Fachinformationen zur Nationalen Wasserstrategie: Abschlussbericht*. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. Mitarbeit von Geidel, T., Dworak, T., Schmidt, G., Rogger, M., Matauschek, C., Völker, J., & Borchardt, D. Zugriff am 5. September 2022, verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-06-03_texte_86-2021_fachinformation_wasserstrategie_0.pdf
- UBA (Hrsg.). (2021b). *Daten und Fakten zu Braun- und Steinkohlen: Stand und Perspektiven 2021*, Dessau-Roßlau. Mitarbeit von Fabian Sandau, Stephan Timme, Corinna Baumgarten, Rolf Beckers, Dr. Wolfgang Bretschneider, Sebastian Briem, Jörg Frauenstein, Claudia Gibis, Patrick Gniffke, Sabine Grimm, Caren Herbstritt, Kristina Juhrich, Andreas Kahrl, Jan Kosmol, Gunter Kuhs, Dr. Marcel Langner, Dmitri Lewandrowski, Benjamin Lünenbürger, Dr. Volker Mohaupt, David Pfeiffer, Dr. Dietrich Plaß, Sebastian Plickert, Dr. Jörg Rechenberg, Dr. Daniel Reißmann, Wolfgang Straff, Jan Weiß, Dirk Wintermeyer. Zugriff am 20. April 2022, verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-03-18_texte_28-2021_daten_fakten_braun-_und_steinkohle.pdf
- UBA (Hrsg.). (2020a). *Systemvergleich speicherbarer Energieträger aus erneuerbaren Energien: Abschlussbericht*, Dessau-Roßlau. Mitarbeit von Axel Liebich, Thomas Fröhlich, Daniel Münter, Horst Fehrenbach, Jürgen Giegrich, Susanne Köppen, Frank Dünnebeil, Wolfram Knörr, Kirsten Biemann, Sonja Simon, Simon Maier, Friedeman Albrecht, Thomas Pregger, Christoph Schillings, Massimo Moser, Regine Reißner, Schwan Hosseiny, Gerfried Jungmeier, Martin Beermann, Dorian Frieden, Neil Bird. Zugriff am 14. März 2022, verfügbar unter https://elib.dlr.de/135283/1/texte_2020_68_systemvergleich_speicherbarer_energietraeger_aus_erneuerbaren_energien.pdf
- UBA (Hrsg.). (2020b, 20. April). *Wasserressourcen und ihre Nutzung*. Dessau-Roßlau. Zugriff am 14. März 2022, verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/wasserressourcen-ihre-nutzung#wassernachfrage>

- UBA (Hrsg.). (2020c). *Wasserbilanz für Deutschland*, Koblenz. Zugriff am 8. August 2022, verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/bild/tab-wasserbilanz-fuer-deutschland>
- UBA (2019a, Dezember). Indikatoren-Factsheet: Mittlere Abflusshöhe: WW-I-2: Indikatoren-Factsheets zum Handlungsfeld Wasser. Zugriff am 13. Juli 2022, verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/380/dokumente/ww-i-2_indikator_mittlerer_abfluss_2019.pdf
- UBA (Hrsg.). (2019b, 26. November). *WW-R-1: Wassernutzungsindex*. Dessau-Roßlau. Zugriff am 11. August 2022, verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/ww-r-1-das-indikator#ww-r-1-wassernutzungsindex>
- UBA. (2019c, 26. November). *WW-R-1: Wassernutzungsindex: Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel*. Dessau-Roßlau. Zugriff am 20. Juli 2022, verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/ww-r-1-das-indikator#wassernutzung-deutlich-zuruckgegangen>
- UBA (Hrsg.). (2019d). *Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger: Bestimmung der verschiedenen Emissionen im Jahr 2018*, Dessau-Roßlau. Mitarbeit von Lauf, D., Memmler, M., & Schneider, S. Zugriff am 25. April 2022, verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-11-07_cc-37-2019_emissionsbilanz-erneuerbarer-energien_2018.pdf
- UBA. (2019e). *WW-I-1: Grundwasserstand*. Dessau-Roßlau. Zugriff am 13. Juli 2022, verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/ww-i-1-das-indikator#ww-i-1-grundwasserstand>
- UBA. (2019f). *WW-I-2: Mittlerer Abfluss*. Dessau-Roßlau. Zugriff am 13. Juli 2022, verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/ww-i-2-3-das-indikatoren#ww-i-2-mittlerer-abfluss>
- UBA (Hrsg.). (2018). *Klimaschutz und Abwasserbehandlung.: Sinnvolle Beiträge zur Energiewende*, Dessau-Roßlau. Mitarbeit von Obermaier, N., Purr, K., Werlein, M., & Bannik, C. G. Zugriff am 19. August 2022, verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/190111_uba_pos_klimaschutz_und_abwasserbehandlung_bf.pdf
- UBA (Hrsg.). (2017). *Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen*, Institution: adelphi reserach gemeinnützige GmbH; plan + risk consult; Europäische Akademie Bozen; UBA, Dessau-Roßlau. Mitarbeit von Buth, M., Kahlenborn, W., Greiving, S., Fleischhauer, M., Zebisch, M., Schneiderbauer, S., & Schauer, I. Zugriff am 29. Juni 2022, verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/uba_2017_leitfaden_klimawirkungs_und_vulnerabilitatsanalysen.pdf
- UBA (Hrsg.). (2015). *Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel*, Institution: adelphi reserach gemeinnützige GmbH, Dessau-Roßlau. Mitarbeit von Mareike Buth, Walter

- Kahlenborn, Jonas Savelsberg, Nina Becker, Dr. Philip, Prof. Stefan Greiving, Dr. Mark Fleischhauer, Dr. Christian Lindner, Dr. Johannes, Dr. Marc Zebisch, Dr. Stefan Schneiderbauer, Christian Kofler. Zugriff am 17. März 2022, verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_24_2015_vulnerabilitaet_deutschlands_gegenueber_dem_klimawandel_1.pdf
- UNESCO World Water Assessment Programme (2022). *Weltwasserbericht der Vereinten Nationen 2022: Grundwasser- Unsichtbares sichtbar machen* (Zusammenfassung). Vorab-Onlinepublikation. https://doi.org/10.30965/9783846762233_010 Mitarbeit von Connor, R., & Miletto, M. Zugriff am 22. März 2022, verfügbar unter https://www.unesco.de/sites/default/files/2022-03/Weltwasserbericht%202022_Deutsche%20Kurzfassung.PDF
- United Nations. (2022). *Weltwasserbericht der Vereinten Nationen 2022: Grundwasser: Unsichtbares sichtbar machen*. UNESCO World Water Assessment Programme, Institution: Unesco Paris. Paris. Mitarbeit von Richard Connor, & Michaela Miletto. Zugriff am 14. April 2022, verfügbar unter https://www.unesco.de/sites/default/files/2022-03/Weltwasserbericht%202022_Deutsche%20Kurzfassung.PDF
https://doi.org/10.30965/9783846762233_010
- United Nations. (2019). Resolution Adopted by the General Assembly on 25 September 2015: Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development (SDGs). In J. Walker, A. Pekmezovic & G. Walker (Hrsg.), *Sustainable Development Goals* (S. 333–374). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119541851> Zugriff am 1. September 2022, verfügbar unter https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf
- Universität Bremen (Hrsg.). (2020). *Analyse und Bewertung der Resilienz urbaner Wärmeversorgungskonzepte: Methodenentwicklung und Anwendung*. artec-paper Nr. 225. artec Forschungszentrum Nachhaltigkeit, Bremen. Mitarbeit von Röder, J., Mitzinger, T., Thier, P., Wassermann, T., & Dunkelberg, E. Zugriff am 23. August 2022, verfügbar unter https://www.uni-bremen.de/fileadmin/user_upload/sites/artec/Publikationen/artec_Paper/225_paper.pdf
- van der Meulen, E. S., van Oel, P. R., Rijnaarts, H., Sutton, N. B. & van de Ven, F. (2022). *Suitability indices for assessing functional quality of urban surface water* (Bd. 13). <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2590252022000010?token=0E5B9639E54CD208819C04F84B321685F8A8949E07F51EFEA791B86129A9E16B4B4A4467F4EE6548C99F95C233426F16&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220414065750>
<https://doi.org/10.1016/j.cacint.2022.100079>

- van Vliet, M. T. H., Yearsley, J. R., Ludwig, F., Vögele, S., Lettenmaier, D. P. & Kabat, P. (2016, Februar). Sichere Energie in einer Welt knapper Wasserressourcen. *Nature Climate Change*, 2 (9), 676–681. Institute for Advanced Sustainability Studies Potsdam (IASS) e.V.Potsdam. <https://doi.org/10.1038/nclimate1546> Zugriff am 14. März 2022, verfügbar unter https://publications.iass-potsdam.de/rest/items/item_1647892_6/component/file_1647893/content
- van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J. & Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109 (1), S. 5–31. Zugriff am 9. Juni 2022, verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/227583841_The_representative_concentration_pathways_an_overview_Climatic_Change_This_issue
- Vierhuff, H. (o.D.). Grundwasserergiebigkeit. *Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland- Relief, Boden und Wasser* (1), 142–143. Zugriff am 25. Mai 2022, verfügbar unter http://archiv.nationalatlas.de/wp-content/art_pdf/Band2_142-143_archiv.pdf
- VKU (2021). Zahlen Daten Fakten 2021. Verband kommunaler Unternehmen Verlag GmbH. Zugriff am 28. Juni 2022, verfügbar unter https://www.vku.de/fileadmin/user_upload/Verbandsseite/Publikationen/2021/2021_VKU_Zahlen_Daten_Fakten_WEB_EN_ES.pdf
- Völker, J. (2020, Oktober). Elektrochemische Abwasserreinigung erzeugt Wasserstoff. *gwf Wasser / Abwasser*. Vulkan-Verlag GmbH.Essen. Zugriff am 19. August 2022, verfügbar unter <https://gwf-wasser.de/forschung-und-entwicklung/27-10-2020-elektrochemische-abwasserreinigung-erzeugt-wasserstoff/>
- Wasserforum Bremen. (2022). *Trinkwasserversorgung und Abwasseraufbereitung in Bremen: Trinkwasserversorgung in Bremen*. Bremen. Zugriff am 1. Juni 2022, verfügbar unter <http://www.wasserforum-bremen.de/das-wasserforum-informiert/trinkwasser-und-sanitaerversorgung/abwasseraufbereitung-in-bremen/>
- wegewerk GmbH (21. März 2022). Neue Versuchsanlage erzeugt Wasserstoff und Methan aus Abwasser. *ZfK Zeitung für kommunale Wirtschaft*. München/Berlin. Zugriff am 19. August 2022, verfügbar unter <https://www.zfk.de/energie/gas/neue-versuchsanlage-erzeugt-wasserstoff-und-methan-aus-abwasser>
- Weltenergieat Deutschland e. V. (2021a). *Energie für Deutschland 2021: Fakten, Perspektiven und Positionen im globalen Kontext 2021*. Weltenergieat – Deutschland e. V. Berlin. Zugriff am 28. Juni 2022, verfügbar unter https://www.weltenergieat.de/wp-content/uploads/2021/06/WEC_Energie-f%C3%BCr-Deutschland-2021.pdf

- Weltenergierat Deutschland e. V. (2021b). *German Energy Transition- a Blueprint for the World? 10th Anniversary of the International Survey*. World Energy Council - Germany. Berlin. Zugriff am 28. Juni 2022, verfügbar unter https://www.weltenergierat.de/wp-content/uploads/2021/10/2021-Blueprint-Survey_complete.pdf
- Weltenergierat Deutschland e. V. & klimafakten.de. (2021). *Klimawandel: Was er für die Energiewirtschaft bedeutet: Kernergebnisse aus dem Fünften Sachstandbericht des IPCC*. Berlin. Zugriff am 28. Juni 2022, verfügbar unter https://www.weltenergierat.de/wp-content/uploads/2021/01/klimawandel_was_er_fuer_die_energiewirtschaft_bedeutet_Brosch%3%BCre.pdf
- Weserkraftwerk Bremen GmbH & Co. KG (Hrsg.). (2021). *Weserkraftwerk Bremen*. Bremen. Zugriff am 8. August 2022, verfügbar unter <http://www.weserkraftwerk-bremen.de/>
- wesernetz Bremen GmbH (wesernetz Bremen GmbH, Hg.). (2022). *Trinkwassernetz*. Zugriff am 1. Juni 2022, verfügbar unter <https://www.wesernetz.de/ueberuns/netzbeschreibung/trinkwassernetz>
- WetterOnline Meteorologische Dienstleistungen GmbH. (2022). *Pegel Weser: Hochwasser, Niedrigwasser und Tendenz*. Bonn. Zugriff am 13. Juli 2022, verfügbar unter <https://www.wetteronline.de/pegelstand/weser>
- Wiedenmannott, W. (2017). *Industrielle Wasseraufbereitung: Anlagen, Verfahren, Qualitätssicherung*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; John Wiley & Sons, Inc. Weinheim, Germany, USA. Zugriff am 19. August 2022, verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=4812521>
- Wilhelm, S. (2008). *Wasseraufbereitung: Chemie und chemische Verfahrenstechnik*. VDI Buch (7. Auflage). Springer. Berlin, Heidelberg.
- Wirtschafts- und Verkehrsministerien der norddeutschen Küstenländer (2019, November). *Norddeutsche Wasserstoffstrategie: Bremen, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und Schleswig-Holstein*. Zugriff am 25. April 2022, verfügbar unter <https://norddeutschewasserstoffstrategie.de/wp-content/uploads/2020/11/norddt-H2-Strategie-final.pdf>
- Wisotzky, F., Cremer, N. & Lenk, S. (2021). *Angewandte Grundwasserchemie, Hydrogeologie und hydrogeochemische Modellierung: Grundlagen, Anwendungen und Problemlösungen* (3. Aufl.). *Lehrbuch*. Springer Spektrum, Berlin. Zugriff am 14. April 2022, verfügbar unter <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-662-62755-6.pdf>
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-62755-6>
- World Energy Council Europe. (2022). *2022 World Energy Issues Monitor: Eenergy in uproar- achieving comittments through community action*. WEC Europe. London. Zugriff am 28. Juni 2022,

- verfügbar unter
https://www.worldenergy.org/assets/downloads/World_Energy_Issues_Monitor_2022_-_Global_Report.pdf?v=1646945650
- World Energy Council Europe. (2021). *Europe Hydrogen Import Study*. WEC Europe. Berlin. Zugriff am 28. Juni 2022, verfügbar unter https://www.weltenergierrat.de/wp-content/uploads/2021/10/WEC-Europe_Hydrogen-Import-Study.pdf
- World Energy Council Europe. (2010). *Water for Energy*. WEC Europe. London. Zugriff am 11. Juli 2022, verfügbar unter https://www.worldenergy.org/assets/downloads/PUB_Water_For_Energy_2010_WEC.pdf
- WWF Deutschland (Hrsg.). (2009). *Der Wasser-Fußabdruck Deutschlands: Woher stammt das Wasser, das in unseren Lebensmitteln steckt?*, Institution: WWF; WWF Großbritannien, Frankfurt am Main. Mitarbeit von Sonnenberg, A., Chapagain, A., Geiger, M., & August, D. Zugriff am 25. April 2022, verfügbar unter https://www.wwf.de/fileadmin/user_upload/wwf_studie_wasserfussabdruck.pdf
- ZDF Magazin Royale (Zweites Deutsches Fernsehen, Hg.). (2022, 2. September). *Die Deutschen und ihr Wasser: Es ist kompliziert*. Mainz. Mitarbeit von Böhmermann, J. Zugriff am 22. September 2022, verfügbar unter <https://www.zdf.de/comedy/zdf-magazin-royale/zdf-magazin-royale-vom-2-september-2022-100.html>

Anhangsverzeichnis

Anhang 1: Nachhaltigkeitsbewertung Steinkohle.....	XXXIV
Anhang 2: Nachhaltigkeitsbewertung Braunkohle.....	XXXIV
Anhang 3: Nachhaltigkeitsbewertung Erdgas.	XXXIV
Anhang 4: Nachhaltigkeitsbewertung Mineralöl und -produkt.	XXXIV
Anhang 5: Nachhaltigkeitsbewertung Kernenergie.	XXXV
Anhang 6: Nachhaltigkeitsbewertung Biomasse.....	XXXV
Anhang 7: Nachhaltigkeitsbewertung Wasserkraft.	XXXV
Anhang 8: Nachhaltigkeitsbewertung Windkraft.....	XXXV
Anhang 9: Nachhaltigkeitsbewertung Solarenergie.....	XXXVI
Anhang 10: Nachhaltigkeitsbewertung Biogas.....	XXXVI
Anhang 11: Nachhaltigkeitsbewertung Geothermie.....	XXXVI

Anhang 1: Nachhaltigkeitsbewertung Steinkohle.

Kriterium	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
1.1 THG-Emissionen			x
1.2 Wasserverbrauch		x	
1.3 Naturverträglichkeit (Wasserqualität)		x	
2.1 Redundanz	x		
2.2 Energieabhängigkeitsquote			x
3.1 Akzeptanz		x	
3.2 Konfliktpotential			x

Anhang 2: Nachhaltigkeitsbewertung Braunkohle.

Kriterium	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
1.1 THG-Emissionen			x
1.2 Wasserverbrauch		x	
1.3 Naturverträglichkeit (Wasserqualität)		x	
2.1 Redundanz	x		
2.2 Energieabhängigkeitsquote	x		
3.1 Akzeptanz		x	
3.2 Konfliktpotential			x

Anhang 3: Nachhaltigkeitsbewertung Erdgas.

Kriterium	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
1.1 THG-Emissionen			x
1.2 Wasserverbrauch		x	
1.3 Naturverträglichkeit (Wasserqualität)		x	
2.1 Redundanz	x		
2.2 Energieabhängigkeitsquote			x
3.1 Akzeptanz		x	
3.2 Konfliktpotential			x

Anhang 4: Nachhaltigkeitsbewertung Mineralöl und -produkt.

Kriterium	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
1.1 THG-Emissionen			x
1.2 Wasserverbrauch			x
1.3 Naturverträglichkeit (Wasserqualität)		x	
2.1 Redundanz	x		
2.2 Energieabhängigkeitsquote			x
3.1 Akzeptanz		x	
3.2 Konfliktpotential			x

Anhang 5: Nachhaltigkeitsbewertung Kernenergie.

Kriterium	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
1.1 THG-Emissionen	x		
1.2 Wasserverbrauch			x
1.3 Naturverträglichkeit (Wasserqualität)			x
2.1 Redundanz	x		
2.2 Energieabhängigkeitsquote			x
3.1 Akzeptanz			x
3.2 Konfliktpotential			x

Anhang 6: Nachhaltigkeitsbewertung Biomasse.

Kriterium	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
1.1 THG-Emissionen	x		
1.2 Wasserverbrauch	x*	x*	
1.3 Naturverträglichkeit (Wasserqualität)	x		
2.1 Redundanz	x		
2.2 Energieabhängigkeitsquote	x		
3.1 Akzeptanz	x		
3.2 Konfliktpotential		x	

*durch Bandbreite in beide Stufen einzuteilen, für Abbildung Stufe 2 gewählt

Anhang 7: Nachhaltigkeitsbewertung Wasserkraft.

Kriterium	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
1.1 THG-Emissionen	x		
1.2 Wasserverbrauch	x		
1.3 Naturverträglichkeit (Wasserqualität)	x		
2.1 Redundanz		x	
2.2 Energieabhängigkeitsquote	x		
3.1 Akzeptanz	x		
3.2 Konfliktpotential		x	

Anhang 8: Nachhaltigkeitsbewertung Windkraft.

Kriterium	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
1.1 THG-Emissionen	x		
1.2 Wasserverbrauch	x		
1.3 Naturverträglichkeit (Wasserqualität)	x		
2.1 Redundanz		x	
2.2 Energieabhängigkeitsquote	x		
3.1 Akzeptanz	x		
3.2 Konfliktpotential	x		

Anhang 9: Nachhaltigkeitsbewertung Solarenergie.

Kriterium	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
1.1 THG-Emissionen	x		
1.2 Wasserverbrauch	x		
1.3 Naturverträglichkeit (Wasserqualität)	x		
2.1 Redundanz		x	
2.2 Energieabhängigkeitsquote	x		
3.1 Akzeptanz	x		
3.2 Konfliktpotential	x		

Anhang 10: Nachhaltigkeitsbewertung Biogas.

Kriterium	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
1.1 THG-Emissionen		x	
1.2 Wasserverbrauch*			
1.3 Naturverträglichkeit (Wasserqualität)		x	
2.1 Redundanz		x	
2.2 Energieabhängigkeitsquote	x		
3.1 Akzeptanz	x		
3.2 Konfliktpotential	x		

*keine Verbrauchswerte generierbar/ in der Literatur

Anhang 11: Nachhaltigkeitsbewertung Geothermie.

Kriterium	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
1.1 THG-Emissionen	x		
1.2 Wasserverbrauch			x
1.3 Naturverträglichkeit (Wasserqualität)		x	
2.1 Redundanz	x		
2.2 Energieabhängigkeitsquote	x		
3.1 Akzeptanz	x		
3.2 Konfliktpotential		x	