

TEXTE

106/2026

**Abschlussbericht**

# Entwicklung des zukünftigen Wasserbedarfs in verschiedenen Sektoren - Bestimmungsmethoden, Projektionen und Szenarien

von:

Thomas Dworak  
Fresh Thoughts Consulting GmbH, Wien

Marc Gramberger  
Prospex International GmbH, Berlin

Jasmin Heilemann, Christian Klassert, Bernd Klauer  
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ, Leipzig

Kolja Maaß, Martina Flörke  
Ruhr-Universität Bochum, Bochum

**Herausgeber:**  
Umweltbundesamt



TEXTE 106/2026

REFOPLAN des Bundesministeriums für Umwelt,  
Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3723 21 156 0

Abschlussbericht

# **Entwicklung des zukünftigen Wasserbedarfs in verschiedenen Sektoren - Bestimmungsmethoden, Projektionen und Szenarien**

von

Thomas Dworak  
Fresh Thoughts Consulting GmbH, Wien

Marc Gramberger  
Prospex International GmbH, Berlin

Jasmin Heilemann, Christian Klassert, Bernd Klauer  
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ, Leipzig

Kolja Maaß, Martina Flörke  
Ruhr-Universität Bochum, Bochum

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

## Impressum

### Herausgeber

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

### Durchführung der Studie:

Fresh Thoughts Consulting GmbH  
Hütteldorfer Str. 215  
1140 Wien  
Österreich

### Abschlussdatum:

April 2026

### Redaktion:

Fachgebiet II 2.1 Übergreifende Angelegenheiten Wasser und Boden  
Manuela Helmecke  
Bernd Kirschbaum

### DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8471>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juli 2026

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

**Kurzbeschreibung: Entwicklung des zukünftigen Wasserbedarfs in verschiedenen Sektoren - Bestimmungsmethoden, Projektionen und Szenarien**

Das Vorhaben verfolgte das übergeordnete Ziel, die zukünftige Entwicklung der Wasserbedarfe in Deutschland präziser zu untersuchen und fundierte Prognosen zu ermöglichen. In einem ersten Schritt wurden dazu die bislang eingesetzten Methoden zur Bedarfsermittlung zusammengestellt und kritisch hinsichtlich ihrer Eignung sowie ihrer methodischen Grenzen analysiert. Darauf aufbauend wurden bestehende Datenlücken identifiziert.

Ein wesentlicher Bestandteil der Untersuchung ist zudem die Diskussion möglicher Entwicklungspfade und Szenarien des zukünftigen Wasserbedarfs in Deutschland. Nach der partizipativen Ableitung der Szenarien erfolgte eine detaillierte Beschreibung und Quantifizierung dieser Wasserbedarfsszenarien bis 2100.

**Abstract: Development of future water demand in various sectors - methods of determination, projections and scenarios**

The project pursued the overarching goal of examining the future development of Germany's water demand more precisely and enabling well-founded forecasts. As a first step, the methods used to date for determining demand were compiled and critically analyzed with regard to their suitability and methodological limitations. Based on this analysis, existing data gaps were identified.

An essential component of the study was also the discussion of potential development pathways and scenarios for future water demand in Germany. Following the participatory development of these scenarios, a detailed description and quantification of these water demand scenarios until 2100 was carried out.

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	6
Abbildungsverzeichnis.....	8
Tabellenverzeichnis.....	10
Abkürzungsverzeichnis.....	11
Zusammenfassung.....	13
Summary.....	25
Beitragende.....	35
1 Hintergrund.....	36
2 Methoden zur Bestimmung von Wasserbedarfen und Szenarien.....	40
2.1 Herangehensweise zur Informationssammlung zu Wasserbedarfen.....	40
2.1.1 Schritt 1: Systematische Literaturrecherche verwendeter Methoden.....	40
2.1.2 Schritt 2: Analyse verwendeter Methoden mit Methodenkatalog.....	41
2.2 Ergebnisse der Literaturrecherche zu Wasserbedarfen.....	41
2.2.1 Öffentliche Wasserversorgung, Wasserversorgung von Haushalten.....	41
2.2.2 Landwirtschaft.....	43
2.2.3 Energie.....	44
2.2.4 Wirtschaft.....	46
2.2.5 Tourismus.....	48
2.2.6 Ökosysteme/ökologischer Mindestabfluss.....	49
2.3 Herangehensweise zur Entwicklung der qualitativen Szenarien-Narrative.....	51
2.3.1 Schritt 1: Entscheidungsfindung für die Szenarioentwicklung.....	52
2.3.2 Schritt 2: Ausarbeitung und Vorbereitung des ko-kreativen Prozesses.....	52
2.3.3 Schritt 3: Fachworkshop 1 mit Stakeholdern.....	54
2.3.4 Schritt 4: Ausarbeiten der Szenario-Narrative, Anpassung des Szenario-Rahmens.....	54
2.3.5 Schritt 5: Erstellung von quantitativen Wasserbedarfsszenarien.....	55
2.3.6 Schritt 6: Quantifizierung der Wasserbedarfe.....	55
2.3.6.1 Haushalte (inkl. Kleingewerbe und Tourismus).....	55
2.3.6.2 Wirtschaft.....	58
2.3.6.3 Rechenzentren.....	59
2.3.6.4 Landwirtschaft.....	59
2.3.6.5 Energie.....	60
2.3.6.6 Wasserstoff.....	61
2.3.6.7 Ökologischer Wasserbedarf/Mindestabfluss.....	62
2.3.6.8 Limitationen der Modellierung.....	62
2.3.7 Schritt 7: Fachworkshop 2 mit Stakeholdern.....	64

2.3.8	Schritt 8: Anpassung und Fertigstellung der Szenarien-Narrative.....	64
2.3.9	Schritt 9: Überarbeitung und Fertigstellung der Modellierungen.....	64
2.3.10	Schritt 10: Zusammenfügen zu integrierten qualitativ-quantitativen Szenarien zu Wasserbedarf in Deutschland.....	65
3	Wasserbedarfsszenarien für Deutschland .....	66
3.1	Wasserbedarfsszenarien.....	66
3.1.1	Szenario-Rahmen für die deutschen Wasserbedarfsszenarien .....	66
3.1.2	<i>Aufklärung 2.0</i> (Szenario SSP 1).....	67
3.1.2.1	<i>Aufklärung 2.0</i> : Szenario-Narrativ .....	67
3.1.2.2	<i>Aufklärung 2.0</i> : Modellierter Wasserbedarf.....	69
3.1.3	<i>Rückzugskampf</i> (Szenario SSP3) .....	79
3.1.3.1	<i>Rückzugskampf</i> : Szenario-Narrativ.....	79
3.1.3.2	<i>Rückzugskampf</i> : Modellierter Wasserbedarf .....	82
3.1.4	<i>Privatisierung des Lebens</i> (Szenario SSP4).....	89
3.1.4.1	<i>Privatisierung des Lebens</i> : Szenario-Narrativ .....	89
3.1.4.2	<i>Privatisierung des Lebens</i> : Modellierter Wasserbedarf.....	92
3.1.5	<i>Wirtschaftswunder 2.0</i> (Szenario SSP5).....	100
3.1.5.1	<i>Wirtschaftswunder 2.0</i> : Szenario-Narrativ .....	100
3.1.5.2	<i>Wirtschaftswunder 2.0</i> : Modellierter Wasserbedarf.....	103
3.2	Regionale und saisonale Aspekte der Ergebnisse.....	110
3.2.1	Regionale Aspekte .....	110
3.2.2	Saisonale Aspekte .....	114
4	Anschlussfähigkeit und Ergebnisverwendung.....	116
4.1	Identifizierung zukünftiger Wasserengpassregionen ("Hotspots") .....	116
4.2	Optimierung der wasserwirtschaftlichen Infrastruktur und Planung.....	117
4.3	Strategischer Zukunftstest und Maßnahmenentwicklung seitens unterschiedlicher Stakeholder .....	117
4.4	Steuerung und Regulierung der sektoralen Wassernutzung .....	118
5	Schlussfolgerungen für das weitere Vorgehen .....	119
	Quellenverzeichnis .....	122
	Quellenverzeichnis Kapitel 2 .....	126
A	Anlage A: Literaturrecherche .....	135
B	Anlage B: Darstellung projizierter Entwicklungen in den im Rahmen des Vorhabens entwickelten SSP-Szenarien .....	136
C	Anlage C: Bei den Workshops vertretene Organisationen.....	139

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Globale SSP-Treiberkräfte mit Relevanz für Wasserbedarfsveränderungen nach Szenarien (für Deutschland angepasst).....	19
Figure 2: Global SSP drivers relevant to water demand changes by scenario (adapted for Germany)	30
Abbildung 3: Übersicht der Szenarientwicklung .....	51
Abbildung 4: Methodik zur Quantifizierung der Wasserbedarfe im Haushaltssektor .....	56
Abbildung 5: Trinkwasserabgabe in Abhängigkeit der Tageshöchsttemperatur (eigene Darstellung, Daten aus Diemel, 2024) .....	57
Abbildung 6: Wasserabgabe an Haushalte je Quartal als Anteil am jeweiligen Jahreswert für alle Bundesländer (außer Stadtstaaten) für die Jahre 2016 bis 2024 (eigene Darstellung, Daten des BDEW) .....	58
Abbildung 7: Vergleich der quartalsweisen Wasserabgabe an Haushalte 2016 und 2022 für alle Bundesländer (außer Stadtstaaten) (eigene Darstellung, Daten des BDEW) .....	58
Abbildung 8: Methodik zur Quantifizierung der Wasserbedarfe im Wirtschaftssektor .....	59
Abbildung 9: Modellierungsansatz für den Sektor Landwirtschaft.....	60
Abbildung 10: Methodik zur Quantifizierung der Wasserbedarfe im Energiesektor.....	61
Abbildung 11: Die im Rahmen des Projektes für Wasserbedarfe in Deutschland entwickelten Szenarien/SSPs (eigene Darstellung) .....	67
Abbildung 12: Illustration Aufklärung 2.0 im Jahre 2100 (Quelle KI Gemini) .....	69
Abbildung 13: Durchschnittliche Anzahl an Tagen mit einer Tageshöchsttemperatur von über 25 °C (Sommertage) und 30 °C (heiße Tage) pro NUTS-3-Region im RCP-Szenario 2.6 (eigene Darstellung, Daten aus Heilemann, 2024).....	70
Abbildung 14: Modellierter Wasserbedarf des Haushaltssektors im Szenario „Aufklärung 2.0“ von 2022 bis 2100. ....	72
Abbildung 15: Modellierter Wasserbedarf des Wirtschaftssektors im Szenario „Aufklärung 2.0“ von 2022 bis 2100. ....	73
Abbildung 16: Modellierter Wasserbedarf (Kühlwasser) des Energiesektors im Szenario „Aufklärung 2.0“ von 2020 bis 2100. ....	75
Abbildung 17: Modellierter Wasserbedarf der Wasserstoff-Produktion durch Wasser-Elektrolyse im Szenario „Aufklärung 2.0“ von 2025 bis 2100. ....	76
Abbildung 18: Modellierter Wasserbedarf für die Landwirtschaft .....	77
Abbildung 19: Prognostizierter Wasserbedarf im Szenario „Aufklärung 2.0“ (eigene Darstellung).....	79
Abbildung 20: Illustration Rückzugskampf im Jahre 2100 (Quelle KI Gemini) .....	81
Abbildung 21: Durchschnittliche Anzahl an Tagen mit einer Tageshöchsttemperatur von über 25 °C (Sommertage) und 30 °C (heiße Tage) pro NUTS-3-Region im RCP-Szenario 8.5 (eigene Darstellung, Daten aus Heilemann, 2024).....	82
Abbildung 22: Modellierter Wasserbedarf des Haushaltssektors im Szenario „Rückzugskampf“ von 2022 bis 2100. ....	84
Abbildung 23: Modellierter Wasserbedarf des Wirtschaftssektors im Szenario „Rückzugskampf“ von 2022 bis 2100. ....	85
Abbildung 24: Modellierter Wasserbedarf (Kühlwasser) des Energiesektors im Szenario "Rückzugskampf" von 2022 bis 2100. ....	86

Abbildung 25: Modellierter Wasserbedarf für die Landwirtschaft im Szenario "Rückzugskampf" .....	88
Abbildung 26: Prognostizierter Wasserbedarf im Szenario „Rückzugskampf“ (eigene Darstellung) ...	89
Abbildung 27: Illustration „Privatisierung des Lebens“ im Jahre 2100 (Quelle KI Gemini).....	92
Abbildung 28: Durchschnittliche Anzahl an Tagen mit einer Tageshöchsttemperatur von über 25 °C (Sommertage) und 30 °C (heiße Tage) pro NUTS-3-Region im RCP-Szenario 4.5 (eigene Darstellung, Daten aus Heilemann, 2024).....	93
Abbildung 29: Modellierter Wasserbedarf des Haushaltssektors im Szenario „Privatisierung des Lebens“ von 2022 bis 2100.....	94
Abbildung 30: Modellierter Wasserbedarf des Wirtschaftssektors im Szenario „Privatisierung des Lebens“ von 2022 bis 2100.....	95
Abbildung 31: Modellierter Wasserbedarf (Kühlwasser) des Energiesektors im Szenario „Privatisierung des Lebens“ von 2020 bis 2100. ....	97
Abbildung 32: Modellierter Wasserbedarf für die Landwirtschaft im Szenario "Privatisierung des Lebens" von 2020 bis 2100.....	98
Abbildung 33: Prognostizierter Wasserbedarf im Szenario “Privatisierung des Lebens” (eigene Darstellung) .....	99
Abbildung 34: Illustration „Wirtschaftswunder 2.0“ im Jahre 2100 (Quelle KI Gemini).....	103
Abbildung 35: Modellierter Wasserbedarf des Haushaltssektors im Szenario „Wirtschaftswunder 2.0“ von 2022 bis 2100.....	105
Abbildung 36: Modellierter Wasserbedarf des Wirtschaftssektors im Szenario „Wirtschaftswunder 2.0“ von 2022 bis 2100. ....	106
Abbildung 37: Modellierter Wasserbedarf (Kühlwasser) des Energiesektors im Szenario „Wirtschaftswunder 2.0“ von 2020 bis 2100. ....	107
Abbildung 38: Modellierter Wasserbedarf für die Landwirtschaft im Szenario „Wirtschaftswunder 2.0“ von 2022 bis 2100.....	109
Abbildung 39: Prognostizierter Wasserbedarf im Szenario „Wirtschaftswunder 2.0“ (eigene Darstellung) .....	110
Abbildung 40: Ausgangssituation des mittleren jährlichen Gesamtwasserbedarfs für die Jahre 2022- 2025 auf Kreisebene bezogen auf die Gesamtfläche in Millimeter (mm) bzw. Liter/m <sup>3</sup> (eigene Darstellung) .....	111
Abbildung 41: Veränderung des projizierten mittleren jährlichen Gesamtwasserbedarfs im Vergleich zur Ausgangssituation 2022-2025 (siehe Abb. 40) in Prozent [%] für die vier Szenarien in den Jahren 2030, 2050 und 2100 (eigene Darstellung).....	112
Abbildung 42: Veränderung des projizierten mittleren jährlichen Wasserbedarfs der einzelnen Sektoren im Vergleich zur Ausgangssituation 2022-2025 (siehe Abb. 40) auf Kreisebene in den vier Szenarien für das Jahr 2100 in Prozent [%] (eigene Darstellung) .....	113
Abbildung 43: Projektion der thermischen Stromproduktion aus verschiedenen Energieträgern in den SSP-Szenarien bis 2100 (eigene Darstellung, Daten aus Riahi, 2017) .....	136
Abbildung 44: Projektion der gesamten thermischen Stromproduktion in den SSP-Szenarien bis 2100 (eigene Darstellung, Daten aus Riahi, 2017) .....	136
Abbildung 45: Projektion der Bevölkerungsentwicklung in Deutschland bis 2100 (eigene Darstellung, Daten aus Jones und O’Neill, 2016; Gao, 2017, 2020) .....	137

Abbildung 46: Projektion des Bruttoinlandproduktes in Deutschland bis 2100 (eigene Darstellung, Daten aus Wang & Sun, 2022, 2023)..... 137

Abbildung 47: Projektion des Agrarpreisindex in Deutschland bis 2100 (eigene Darstellung, Daten aus Popp et al, 2017 für OECD-Länder) ..... 138

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Projizierte Gesamt- und sektorale Wasserbedarfe in Deutschland im Jahr 2100 und im Referenzjahr 2022 (jeweils in Milliarden Kubikmetern) sowie relative prozentuale Änderungen (2100 gegenüber 2022) in den entwickelten Szenarien..... 20

Table 2: Total and sectoral water demands in Germany in 2100 and in the reference year 2022 (each in billion cubic meters) and relative percentage changes (2100 compared to 2022) in the scenarios developed..... 31

**Es konnten keine Einträge für ein Abbildungsverzeichnis gefunden werden.**

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
<b>AGEB</b>	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
<b>AP</b>	Arbeitspaket
<b>BDEW</b>	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
<b>BIP</b>	Bruttoinlandsprodukt
<b>BLE</b>	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
<b>BMUV</b>	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
<b>BMWK</b>	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
<b>BNetzA</b>	Bundesnetzagentur
<b>CCS</b>	Kohlendioxidabscheidung und -speicherung (Carbon Dioxide Capture and Storage)
<b>CDR</b>	Kohlendioxid-Entnahme (Carbon Dioxide Removal)
<b>Destatis</b>	Statistisches Bundesamt
<b>DVGW</b>	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
<b>EU</b>	Europäische Union
<b>EW</b>	Einwohner
<b>FKZ</b>	Forschungskennzahl
<b>GW</b>	Gigawatt
<b>IAM</b>	Integriertes Bewertungsmodell (Integrated Assessment Model)
<b>IPBES</b>	Weltbiodiversitätsrat (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services)
<b>IPCC</b>	Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change)
<b>ISSN</b>	Internationale Standardnummer für fortlaufende Sammelwerke (International Standard Serial Number)
<b>KI</b>	Künstliche Intelligenz
<b>LAWA</b>	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
<b>LNG</b>	Flüssigerdgas (Liquefied Natural Gas)
<b>MAS</b>	Multiagentensystem
<b>MNQ</b>	Mittlerer Niedrigwasserabfluss
<b>MQ</b>	Mittlerer Abfluss
<b>MWh</b>	Megawattstunde
<b>NGO</b>	Nichtregierungsorganisation (Non-Governmental Organization)
<b>NUTS</b>	Systematik der Gebietseinheiten für die Statistik (Nomenclature des unités territoriales statistiques; hier NUTS-3 für Kreisebene)
<b>OECD</b>	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Organisation for Economic Co-operation and Development)
<b>PV</b>	Photovoltaik
<b>RCP</b>	Repräsentativer Konzentrationspfad (Representative Concentration Pathway)
<b>SAS</b>	Handlungsstrang und Simulationsansatz (Story and Simulation Approach)
<b>SMR</b>	Kleine Modulare Reaktoren (Small Modular Reactors)
<b>SSP</b>	Gemeinsamer sozioökonomischer Entwicklungspfad (Shared Socioeconomic Pathway)
<b>STEPSEC</b>	Forschungsprojekt zur landbasierten Kohlendioxid-Entnahme (Projektname)

<b>Abkürzung</b>	<b>Erläuterung</b>
<b>STIR</b>	Stakeholder-integrierte Forschung (Stakeholder-Integrated Research)
<b>UBA</b>	Umweltbundesamt
<b>UFZ</b>	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung
<b>WVK</b>	Wasserversorgungskonzept

## Zusammenfassung

Die Nationale Wasserstrategie (BMUV, 2023) verfolgt das Ziel, den naturnahen Wasserhaushalt zu schützen, wiederherzustellen und langfristig zu sichern sowie Wasserknappheit und Zielkonflikten vorzubeugen. Zu diesem Zweck soll unter anderem die Prognosefähigkeit der Wasserhaushaltsanalysen verbessert werden (Aktion 1) und in Kooperation von Ländern, Wasserver- und Abwasserentsorgern, Kommunen sowie den wesentlichen Wassernutzungsgruppen sollen verstärkt Wasserversorgungskonzepte erarbeitet werden (Aktion 47 der Nationalen Wasserstrategie, NWS). Diese Konzepte zielen darauf ab, das aktuelle und zukünftige Wasserdargebot sowie die Wasserbedarfe zusammenzuführen, um so die langfristige Sicherung der Wasserversorgung innerhalb und außerhalb der öffentlichen Wasserversorgungssysteme zu unterstützen. Dies umfasst sowohl die dauerhafte Sicherstellung des Wasserbedarfs der Ökosysteme als auch die Gewährleistung der öffentlichen Trinkwasserversorgung und der Bereitstellung der für die Grundversorgung (Nahrungs- und Futtermittel) erforderlichen Wassermengen.

Das Verständnis über die zukünftige Entwicklung der Wasserbedarfe in Deutschland ist bisher jedoch sehr begrenzt. Die Erstellung von Wasserbedarfsszenarien erfährt vor dem Hintergrund des Klimawandels und sozioökonomischer Entwicklungen eine zunehmende Relevanz, insbesondere unter Berücksichtigung zukünftiger Schwankungen hinsichtlich der Nutzungsmengen und regionaler und saisonaler Differenzen. Häufigere und länger anhaltende Dürreperioden sind insbesondere für den landwirtschaftlichen Sektor problematisch. Obwohl derzeit nur etwa 3,3 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Deutschland bewässert werden (BZL, 2024), ist der Bewässerungsbedarf zwischen 2009 und 2022 um 47 % angestiegen (Bernhardt et al., 2025). Unter weiter fortschreitendem Klimawandel wird eine weitere Zunahme des Bewässerungsbedarfs prognostiziert. Eine deutliche Erweiterung landwirtschaftlicher Bewässerung kann regional zu Nutzungskonflikten und zu steigendem Druck auf lokale Wasserressourcen führen. Zudem können bei steigenden Bedarfen Nutzungskonflikte zwischen der öffentlichen Wasserversorgung und der landwirtschaftlichen Bewässerung entstehen.

Die Problematik der Wasserknappheit beschränkt sich jedoch nicht nur auf die Landwirtschaft; auch Trinkwasserversorgung, industrielle Produktion und Kühlwasserbedarfe sind zu berücksichtigen, besonders vor dem Hintergrund der wachsenden Relevanz wasserintensiver Wirtschaftszweige wie Halbleiterfertigung, Kühlung von Rechenzentren und Wasserstoffproduktion. Eine Medienrecherche zu wasserbezogenen Nutzungskonflikten in Deutschland zeigt, dass insbesondere in den trockenen Jahren 2018–2020 und 2022 zahlreiche Sektoren von Wasserknappheit betroffen waren (Industrie, Landwirtschaft, Ökosysteme, Privatverbrauch, Schifffahrt, öffentliche Wasserversorgung). Wasserbedarfsszenarien bilden eine Grundlage für die Planung und den Ausbau wasserwirtschaftlicher Infrastruktur (z. B. überregionale Versorgungsleitungen, Speicher) sowie für die Absicherung von Industriestandorten. In Verbindung mit Informationen zum (zukünftigen) Wasserdargebot können Wasserbedarfsszenarien dazu beitragen, Risiken zu identifizieren, Anpassungsstrategien und Notfallpläne zu entwickeln und potenzielle Nutzungskonflikte vorausschauend zu vermeiden oder zu reduzieren.

In der Praxis leiten viele Wasserversorgungskonzepte den zukünftigen Wasserbedarf fast ausschließlich aus der demografischen Entwicklung und der Pro-Kopf-Wassernutzung ab. Für die Sektoren Landwirtschaft, Industrie und Gewerbe wird aufgrund hoher Unsicherheit und fehlender belastbarer Annahmen häufig der Status quo fortgeschrieben. Dies kann systematische Unter- oder Überschätzungen sektoraler Bedarfe zur Folge haben. Für die

Wasserdargebotsseite liegen bereits zahlreiche Studien und Modellprojektionen vor, die auf Klimaszenarien basieren (z. B. Boeing & Marx, 2022; Hattermann et al., 2015; Stein et al., 2024). Jedoch fehlen umfassende, sektorübergreifend konsistente Untersuchungen zu möglichen Entwicklungen sektorspezifischer Wasserbedarfe in Deutschland. Derzeit vorliegende Untersuchungen umfassen unter anderem sektorenübergreifende Analysen, wie z. B. im Projekt WatDEMAND (Zaun et al., 2024), die räumlich aufgelöste Projektionen bis zum Jahr 2100 ermöglichen. Allerdings basieren diese auf vereinfachten Annahmen und schließen keine partizipativ entwickelten Narrative und Szenarien mit ein.

Qualitative sozioökonomische Szenarien wie die *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs) (dt. gemeinsame sozioökonomische Entwicklungspfade) aus dem Kontext des Weltklimarates werden in Deutschland bisher wenig genutzt, obwohl quantitative Klimaszenarien (RCPs) standardmäßig angewandt werden. Für eine robuste Wasserbedarfsabschätzung und Strategieentwicklung fehlen nutzbare, SSP-kompatible, dynamische Szenarien-Narrative, die zeitliche Entwicklungslogiken und das Zusammenspiel wesentlicher Unsicherheiten nachvollziehbar abbilden.

Vor diesem Hintergrund begründet dieser Bericht die Notwendigkeit einer Kombination qualitativer und quantitativer Wasserbedarfsszenarien. Qualitative Szenarien (Narrative/Storylines) machen die Logik und zeitliche Dynamik möglicher Zukünfte begreifbar und sind für die Strategieentwicklung von zentraler Bedeutung, während quantitative Szenarien numerische Werte und belastbare Beziehungen als Planungsgrundlage liefern. Der methodische Rahmen, der in dieser Studie vorgestellt wird, ist der sogenannte *Story and Simulation Approach* (SAS). Dieser Ansatz beinhaltet zunächst die Entwicklung von Storylines, die anschließend durch Modellierung quantifiziert und integriert werden.

### **Szenarien: Keine Politikstrategien, keine Zuordnung von Wünschbarkeit - stattdessen kontextuelle Beschreibung möglicher Zukünfte als Grundlage für Strategieplanung.**

Das Verständnis von Szenarien in diesem Bericht folgt der Methodologie des *Scenario Planning* (Schwartz 1996, van der Heijden 2005, Ringland 2006). Darauf aufbauend ist es wichtig, Folgendes anzumerken: **Szenarien sind keine Beschreibungen von Politikstrategien** – sie machen also als solche keine Aussagen wie: „Wir führen diese Politik ein und dies sind die zukünftigen Ergebnisse.“ **Stattdessen ermöglichen sie Antworten auf die Frage „Was wäre, wenn“** (*What if*), *beispielsweise*: „Was wäre (die Folge für den Wasserbedarf), wenn sich zunehmend eine stärkere Zweiteilung der Gesellschaft in Deutschland herausbilden sollte?“ oder „Was wäre (die Folge für den Wasserbedarf), wenn wir in Deutschland, in Europa und weltweit weitgehende Re-Nationalisierung erleben?“ **Verschiedene mögliche kontextuelle Entwicklungen** werden dabei in Geschichten über die Zukunft (Zukunfts-Narrative) zusammengefügt. Wichtig ist dabei, dass verschiedene Szenarien entwickelt werden, die gemeinsam für ein bestimmtes Thema und eine Blickrichtung den zukünftigen Entwicklungsraum des Möglichen beschreiben.

**Szenarien sind auch keine Beschreibung wünschenswerter oder angestrebter Zukünfte.** Bewertungen von einzelnen Szenarien (zum Beispiel *best case*, *worst case*, etc.) sind den Betrachtenden unbenommen, werden aber durch die Szenarien selbst nicht vorgeschrieben – und sie sind auch nicht auf dieser Basis methodisch entwickelt und zielen im Regelfall nicht darauf ab.<sup>1</sup> Dies heißt im konkreten Fall der in diesem Bericht beschriebenen Szenarien für den zukünftigen Wasserbedarf in Deutschland, **dass die Autoren der Studie und das**

---

<sup>1</sup> Vom in diesem Bericht nicht relevanten Sonderfall der sogenannten normativen Szenarien abgesehen.

**Umweltbundesamt keinerlei Bewertung über Wünschbarkeit oder Nicht-Wünschbarkeit der aufgezeigten Szenarien vornehmen.**

**Stattdessen zeigen Szenarien mögliche zukünftige Entwicklungen – unabhängig davon, ob diese wünschenswert sind oder nicht.** Dies ermöglicht erstens, auch die **Zukunftsentwicklungen zu erkennen**, die vielleicht nicht gewünscht, aber dennoch möglich, plausibel und relevant sind. Zweitens ermöglicht dies, **Politik- und andere Maßnahmen/Strategien zu testen und auf Basis der Szenarien anzupassen und/oder zu entwickeln**. Dies mit der Absicht, die mit den (Politik-)Maßnahmen beabsichtigten Ziele weitestmöglich unter unterschiedlichen zukünftigen Bedingungen erreichen zu können. Szenarien im Sinne des *Scenario Planung* (s. o.) sind somit ein Mittel zur Zukunftsabschätzung wie auch ein Mittel zur Strategieentwicklung – wie hier in Bezug auf Wasserbedarf.

#### **Methoden zur Bestimmung von Wasserbedarfen und Szenarien**

##### **► Herangehensweise zur Informationssammlung zu Wasserbedarfen**

Als Grundlage wurde eine umfassende Recherche zu Methoden der Abschätzung zukünftiger Wasserbedarfe durchgeführt, einschließlich regionaler Entwicklungen. Es erfolgte eine systematische Literaturrecherche in Online-Datenbanken (u. a. Web of Science, Science Direct, Google Scholar, ResearchGate) mit deutsch- und englischsprachigen, sektorspezifisch ausgewählten Suchbegriffen. Neben wissenschaftlicher Literatur wurde relevante „graue“ Literatur (z. B. Wasserversorgungskonzepte, Veröffentlichungen von DVGW, NGOs, Verbänden, Behörden der Länder und der EU) systematisch einbezogen.

Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit wurden die Quellen in einer Excel-Datenbank katalogisiert und nach bestimmten Kriterien erschlossen. Die Datenbank umfasst eine Anzahl von über 90 Studien, die anhand eines Methodenkatalogs strukturiert analysiert wurden. Ein zentrales Ergebnis der Methodenanalyse ist die große Bandbreite an Werkzeugen zur Simulation sektoraler Wasserbedarfe, die in Komplexität, Eingangsdaten und Szenarienlogik stark variieren. Szenarien weisen in der Regel eine hohe Heterogenität auf und sind selten sektor- und regionenübergreifend vergleichbar.

Aus der Literatur konnten folgende Ergebnisse zu den Wasserbedarfen der relevanten Sektoren abgeleitet werden:

- **Öffentliche Wasserversorgung / Haushalte**

In der Literatur werden Haushaltswasserbedarfe überwiegend über demografische Daten und Pro-Kopf-Verbräuche abgebildet. Komplexere Ansätze nutzen dagegen Regressionsmodelle mit sozioökonomischen Variablen. Der Bericht macht deutlich, dass damit Jahresmengen zwar oft gut, Spitzenbedarfe während Hitze- und Dürreperioden (Hitze/Dürre) aber nur unzureichend erfasst werden. Für die langfristige Planung und Versorgungssicherheit ist deshalb nicht allein die Jahressumme entscheidend, sondern die Kombination aus langfristigem Niveau (Entwicklung von Demografie, Effizienz) und kurzfristigen Belastungen (Hitzespitzen, Rohrleitungsverluste).

- **Landwirtschaft (Bewässerung)**

Während Bewässerungsbedarfe meist modellbasiert (hydrologisch bzw. auf Basis von Landnutzungs- und Vegetationsmodellen) projiziert werden, sind ökonomische Investitions- und Entscheidungsprozesse häufig nur eingeschränkt abgebildet. Diese sind für den tatsächlichen Bewässerungsbedarf jedoch zentral. Es zeigt sich, dass die Ergebnisse stark davon abhängen, ob Extremjahre berücksichtigt und wie politische (und ökonomische) Rahmenbedingungen angenommen werden und wie diese wirken.

- **Energie (Kühlwasser)**

In der Literatur wird der Wasserbedarf primär aus den Stromerzeugungspfaden und Wassernutzungsintensitäten ( $\text{m}^3/\text{MWh}$ ) in Abhängigkeit vom Energieträger abgeleitet. Regionale Restriktionen durch Niedrigwasser und hohe Gewässertemperaturen werden jedoch nur selten konsistent berücksichtigt. Es wird deutlich, dass der Energiesektor je nach Technologiepfad (fossiler oder erneuerbarer Fokus) den Gesamtwasserbedarf stark nach unten oder oben treiben kann. Die Elektrolyse von Wasserstoff bleibt zum Beispiel wegen bisher schwer prognostizierbarer Kühlkonzepte und Produktionsstandorten besonders abhängig von Annahmen. Aufgrund der damit verbundenen Unsicherheit hängen die Ermittlung und Bewertung des Wasserbedarfs von Wasserstoff stark von den gewählten Modellannahmen ab.

- **Wirtschaft**

Je nach Studie werden Industriebedarfe über spezifische Verbräuche (Wasserbedarfe nach Branche bzw. Betriebsgröße) oder über Intensitätsansätze (Wasserbedarf je Produktion oder Wertschöpfung) bestimmt. Trends sind stark vom Strukturwandel abhängig und regional stark von Annahmen bezüglich der Industrieansiedlungen geprägt. Eine höhere Effizienz kann Wasserbedarfe senken, aber durch eine Verschiebung hin zu (neuen) wasserintensiven Aktivitäten kann diese überlagert werden. Jahresdaten dominieren, während hitzebedingte Spitzen und lokale Ansiedlungseffekte methodisch oft schwer abzubilden sind.

- **Tourismus**

Da es an offiziellen Statistiken mangelt, sind in der Literatur meist einfache Pro-Gast-Ansätze zu finden und die Ergebnisse hängen stark von Annahmen und Systemgrenzen ab. Aus analytischer Sicht ist der Wasserbedarf für den Tourismus weniger als nationaler Mengentreiber relevant, sondern vielmehr als regionaler und saisonaler Zusatzdruck, der in Spitzenzeiten mit anderen Bedarfen zusammenfallen kann. Langfristige nationale Projektionen sind kaum belastbar.

- **Ökosysteme / ökologischer Mindestabfluss**

Die Herleitung ökologischer Mindestabflüsse reicht von einfachen hydrologischen Schwellwerten bis hin zu habitatbasierten Einzelfallanalysen. Eine belastbare Quantifizierung im Szenariokontext erfordert meist eine hydrologische Modellierung. In Dürreperioden können ökologische Anforderungen als Restriktion für Wasserentnahmen wirken und Nutzungskonkurrenzen verschärfen. Die Auswirkungen langfristiger Dürreperioden und wiederholter Unterschreitungen sind noch unzureichend untersucht.

### **Wasserbedarfsszenarien für Deutschland**

In zwei partizipativen ko-kreativen Workshops mit Teilnehmenden aus Wissenschaft, Verwaltung und sektoralen Wassernutzern<sup>2</sup> wurde ein Prozess zur Entwicklung von Szenarien für den zukünftigen Wasserbedarf verschiedener Sektoren in Deutschland initiiert. Zunächst erfolgte eine Einführung in die Thematik der Szenariomentwicklung, wobei der Bezug zu den Basisszenarien des Weltklimarates (RCPs und SSPs) erläutert wurde. Der Fokus der weiteren Ausarbeitung lag auf den SSPs 1, 3, 4 und 5, deren Grundannahmen beibehalten wurden.<sup>3</sup> In

---

<sup>2</sup> Die Auswahl einzelner Teilnehmer\*innen erfolgte im direkten Austausch mit dem UBA. Eine Liste mit teilnehmenden Organisationen findet sich in Anlage C. Trotz Einladungen war die Anzahl von Vertreter\*innen der Industrie, der Landwirtschaft und des Naturschutzes in den Fachworkshops begrenzt; Tourismus war nicht vertreten.

<sup>3</sup> Die globalen SSPs sind: SSP1 (Sustainability - Taking the Green Road), SSP3 (Regional Rivalry - A Rocky Road), SSP4 (Inequality - A Road Divided) und SSP5 (Fossil-fueled Development - Taking the Highway). (O'Neill et al., 2014, O'Neill et al., 2015).

Gruppenarbeit und Diskussionen wurden treibende Kräfte für den deutschen Wasserbedarf identifiziert, um die globalen Klimaszenarien dahingehend weiterzuentwickeln.

Die treibenden Kräfte wurden in einer Unsicherheitsanalyse hinsichtlich ihrer möglichen Ausprägungen (Polaritäten) bewertet. Anschließend wurden die erarbeiteten Unsicherheitspolaritäten mit dem SSP/RCP-Rahmen des Weltklimarates abgeglichen und verknüpft, wobei eine gute Übereinstimmung festgestellt wurde. Daraufhin entwickelten die Kleingruppen geeignete Bezeichnungen und narrative Elemente für die vier Szenarien bis zum Jahr 2100. Die Ergebnisse der Workshops waren Szenariennarrative für den zukünftigen Wasserbedarf in Deutschland sowie eine detaillierte Analyse der Unsicherheiten. Die vier Szenarien beschreiben in Form von Storylines mögliche, für sektorale Wasserbedarfe relevante Entwicklungen bis zum Jahr 2100 mit Zwischentritten in den Jahren 2050 und 2075.

Die Ausgestaltung der Szenarien impliziert keine Aussagen darüber, dass die beschriebenen Entwicklungen als wahrscheinlich oder wünschenswert angesehen werden.

Die Szenarien enthalten keine Strategien sowie politische und ordnungsrechtliche Maßnahmen im Wassersektor, die eingeführt werden könnten, um den Wasserbedarf zu regulieren und gegenzusteuern.

Aus diesen Szenariennarrativen wurden auf Basis verschiedener Modelle und der Analyse der wissenschaftlichen Literatur sektorale Bedarfsannahmen abgeleitet und Wasserbedarfe quantifiziert und modelliert. Zur Berücksichtigung von Klimawandeleffekten wurde jedes SSP mit einem RCP-Szenario verknüpft, welches dem jeweiligen Narrativ entspricht (O'Neill et al., 2020):

- ▶ SSP1 mit RCP2.6;
- ▶ SSP3 mit RCP8.5;
- ▶ SSP4 mit RCP4.5; und
- ▶ SSP5 mit RCP8.5.

#### ▶ **Aufklärung 2.0 (SSP1)**

„Aufklärung 2.0“ steht für einen gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Transformationspfad, in dem ökologische Krisenerfahrungen zu einem breiten Umdenken führen und Nachhaltigkeit zur dominierenden Leitlinie wird. Die politische und institutionelle Handlungsfähigkeit ist hoch. Umwelt- und Ressourcenschutz werden systematisch in Planung, Infrastruktur und Produktion integriert. Technologische Entwicklungen (insbesondere Digitalisierung und KI-gestützte Optimierung) werden gezielt für Effizienz, Kreislaufführung und Ressourcenentlastung genutzt. Im Energiesystem dominiert der Umbau hin zu erneuerbaren Energien, während wasserintensive, auf fossilen Energieträgern basierte Stromerzeugung deutlich an Bedeutung verliert. Gleichzeitig kann der Übergang über eine Wasserstoffwirtschaft neue Wasserbedarfe erzeugen, deren Ausmaß vor allem von technischen Ausgestaltungen (z. B. Kühlkonzepte) und Standortentscheidungen abhängt. In der Landwirtschaft führen verbesserte Anpassungskapazitäten und effizientere Bewässerungstechniken zu einem niedrig bleibenden Wasserbedarf; wirtschaftliche sowie strukturelle Veränderungen können langfristig ebenfalls zu einer weiteren Reduktion des Bewässerungsbedarfs beitragen. Insgesamt ist das Szenario durch eine vergleichsweise geringe klimatische Zusatzbelastung, eine hohe Anpassungsfähigkeit sowie eine übergreifende Ausrichtung auf Effizienz und Resilienz gekennzeichnet und ist durch einen Bevölkerungsrückgang geprägt.

### ► Rückzugskampf (SSP3)

„Rückzugskampf“ beschreibt eine Zukunft mit hoher klimatischer Belastung und zugleich geringer internationaler Kooperation. Politische und wirtschaftliche Systeme sind stärker auf nationale bzw. regionale Interessen ausgerichtet und globale Problemlösungsfähigkeit (inkl. Klimaschutz) bleiben schwach. In der Folge nimmt der Druck auf Wasserressourcen deutlich zu und Nutzungskonkurrenzen verschärfen sich. Der Umgang mit Wasser ist stärker konflikt- und krisengetrieben als strategisch-präventiv. Landwirtschaftliche Produktion wird stärker auf die Sicherung der Eigenversorgung ausgerichtet und Anpassungen an den Klimawandel erfolgen nur unter erschwerten Rahmenbedingungen, wodurch Bewässerung als Stabilisierungsmaßnahme an Bedeutung gewinnt. Im Energiesektor bleibt eine hohe Abhängigkeit von der thermischen Stromerzeugung bestehen, was die wasserbezogene Verwundbarkeit gegenüber Niedrigwasser- und Temperaturrestriktionen erhöht, die bei Niedrigwasser und hohen (Wasser-)Temperaturen verwundbarer ist. Gleichzeitig führen klimawandelbedingte Veränderungen (z. B. höhere Gewässertemperaturen) zu zusätzlichen Belastungen. Der sozioökonomische Kontext ist von struktureller Schwäche, eingeschränkter Investitionsfähigkeit und zunehmenden Konfliktlagen geprägt. Deutschlands Bevölkerung geht drastisch zurück. Insgesamt ist „Rückzugskampf“ ein Szenario, in dem die Wasserfrage häufiger als Engpass und Konfliktfeld sichtbar wird und kurzfristige Sicherungslogiken und Verteilungsentscheidungen gegenüber langfristiger Vorsorge dominieren.

### ► Privatisierung des Lebens (SSP4)

Das Szenario „Privatisierung des Lebens“ ist geprägt durch eine starke soziale und räumliche Ungleichheit sowie durch eine unterschiedliche Anpassungsfähigkeit der Akteure an Klimafolgen und Ressourcenknappheit. Technologische Innovationen und effiziente Lösungen sind verfügbar, werden jedoch vor allem dort umgesetzt, wo Kapital, Governance-Kapazitäten und Zugang zu Infrastruktur vorhanden sind. In weniger privilegierten Teilräumen kommt es dagegen zu Infrastrukturlücken und schleichender Erosion öffentlicher Leistungen. Hinzu kommen erhöhte Wasserverluste, die beispielsweise durch unzureichend gewartete Netze und Infrastruktur verursacht werden. Insgesamt entwickelt sich der Energiesektor in Richtung geringerer wasserbezogener Belastung, u. a. durch technologische Umstellungen und Effizienz. Allerdings ist die Verteilung der Vorteile ungleich. In der Landwirtschaft können global bedingte ökonomische Rahmenbedingungen und Preissignale zu einer deutlichen Ausweitung bzw. Stabilisierung bewässerungsintensiver Produktion führen, während gleichzeitig regionale Restriktionen und Konflikte zunehmen. Das Szenario ist damit durch ein Nebeneinander von „Hochleistungsinseln“ und strukturell benachteiligten Räumen gekennzeichnet, was entsprechende Konsequenzen für die Verteilung und Steuerbarkeit des Wasserbedarfs sowie für die gesellschaftliche Konflikanfälligkeit hat. Auch dieses Szenario ist von einem Bevölkerungsrückgang geprägt.

### ► Wirtschaftswunder 2.0 (SSP5)

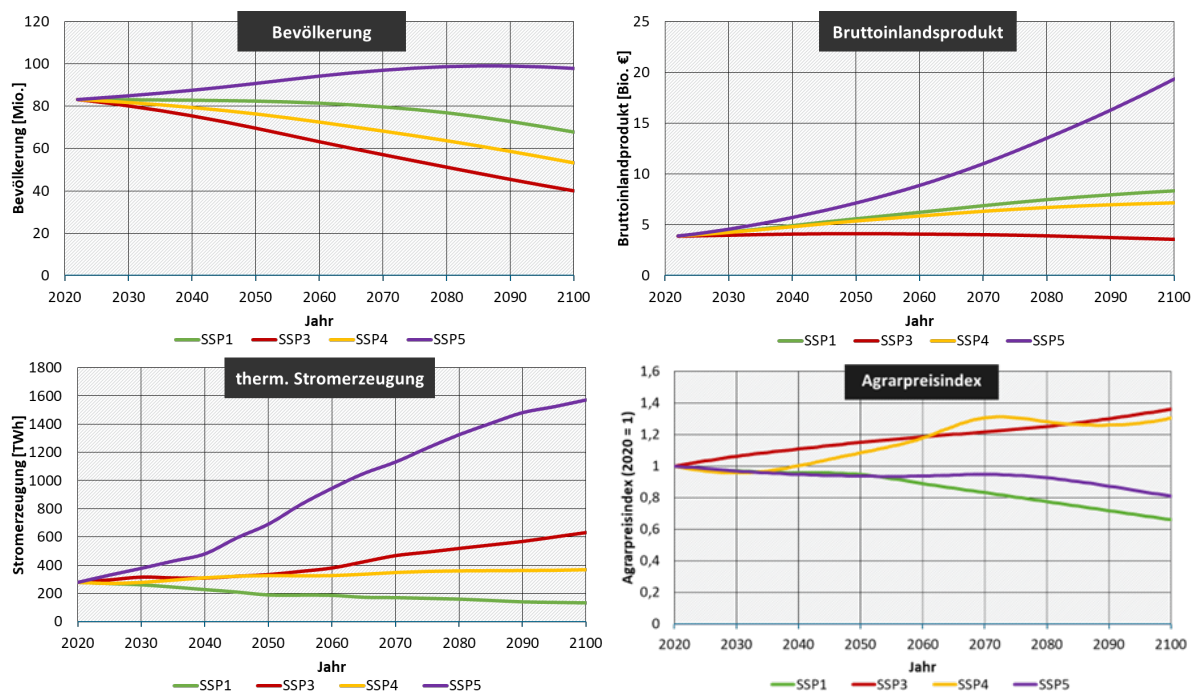
„Wirtschaftswunder 2.0“ beschreibt eine Zukunft mit hoher wirtschaftlicher Dynamik und starker industrieller Aktivität, bei gleichzeitig hohem klimatischem Druck. Wirtschaftliche Leistungsfähigkeit und Versorgungssicherheit haben Priorität und ein nicht nachhaltiger Ressourcenverbrauch wird zugunsten von Wachstum und Wohlstand zunächst akzeptiert. Die Energieversorgung und Stromerzeugung bleiben lange stark auf thermischer Erzeugung ausgerichtet (zunächst Kohle und Erdgas, später Kernfusion), wodurch die wasserbezogene Abhängigkeit des Energiesystems erheblich steigt. Klimawandelbedingte Herausforderungen (z. B. Niedrigwasser, hohe Gewässertemperaturen) wirken als potenzieller Engpassfaktor. Haushaltsnahe Wasserbedarfe werden durch demografische und siedlungsstrukturelle

Entwicklungen (u. a. Suburbanisierung) sowie durch klimatisch verstärkte Spitzen erhöht. In der Landwirtschaft stehen Anpassung und Produktivität im Vordergrund. Der Wasserbedarf wird dabei weniger durch flächige Ausweitung als vielmehr durch Management und technische Entwicklung geprägt. Insgesamt ist das Szenario dadurch gekennzeichnet, dass eine hohe wirtschaftliche Aktivität sowie ein wasserintensives Energiesystem den Gesamtwasserbedarf dominieren. Die Resilienz hängt stark von technischer Beherrschbarkeit und Infrastruktur ab. In diesem Szenario steigt die Bevölkerung bis 2100.

► **Rahmenannahmen zu zentralen Wasserbedarfsparametern/-treibern**

Die folgende Abbildung zeigt die Rahmenannahmen relevanter Parameter aus den globalen Szenarien bis zum Jahr 2100, die für die Modellierung der vier Szenarien auf Deutschland angepasst wurden. Die Abbildung links oben stellt die Bevölkerungsentwicklung in Deutschland dar; sie dient als zentraler Treiber für die Projektionen im Haushaltssektor. Die Abbildung rechts oben zeigt die Projektionen des Bruttoinlandsprodukts, welches einen wesentlichen Bezugspunkt für die Modellierung der Wasserbedarfe im Wirtschaftssektor bildet. Die Abbildung links unten zeigt die Entwicklung der thermischen Stromproduktion insgesamt und die Abbildung rechts unten den Agrarpreisindex.

**Abbildung 1: Globale SSP-Treiberkräfte mit Relevanz für Wasserbedarfsveränderungen nach Szenarien (für Deutschland angepasst)**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

Die in den beiden Workshops entwickelten Wasserbedarfsszenarien wurden, wie im *Story and Simulation Approach (SAS)* verankert, mithilfe sektoraler Modelle (z. B. Wasserhaushaltsmodelle und hydro-ökonomische Modellierung) bis zum Jahr 2100 quantifiziert. Die Ergebnisse der vier Szenarien demonstrieren, dass sich der zukünftige Wasserbedarf bis zum Jahr 2100 in Abhängigkeit des sozioökonomischen und klimapolitischen Entwicklungspfads signifikant unterscheiden kann. In zwei Szenarien, "Aufklärung 2.0" und "Privatisierung des Lebens", **sinkt der Gesamtwasserbedarf** gegenüber dem aktuellen Referenzwert um rund ein Fünftel. Demgegenüber **steigen die Bedarfe** in den Szenarien "Rückzugskampf" und insbesondere in

“Wirtschaftswunder 2.0” stark an. Die Spannweite des jährlichen Gesamtwasserbedarfs im Jahr 2100 reicht damit von 14 bis 35 Mrd. m<sup>3</sup>, was eine hohe Sensitivität des Gesamtwasserbedarfs gegenüber sektoralen Struktur- und Transformationsprozessen verdeutlicht.

**Tabelle 1: Projizierte Gesamt- und sektorale Wasserbedarfe in Deutschland im Jahr 2100 und im Referenzjahr 2022 (jeweils in Milliarden Kubikmetern) sowie relative prozentuale Änderungen (2100 gegenüber 2022) in den entwickelten Szenarien.**

Sektor	Referenz <sup>4</sup>	Aufklärung 2.0 (SSP1-RCP-2.6)	Rückzugskampf (SSP3-RCP8.5)	Privatisierung des Lebens (SSP4-RCP4.5)	Wirtschaftswunder 2.0 (SSP5-RCP8.5)
Haushalte	4,28 <sup>5</sup>	2,77 (-35 %)	2,19 (-49 %)	2,67 (-38 %)	4,68 (+9 %)
Wirtschaft	5,44 <sup>6</sup>	7,56 (+39 %)	4,1 (-25 %)	4,8 (-12 %)	8,26 (+52 %)
Landwirtschaft – Bewässerung	0,81 <sup>7</sup>	0,48 (-41 %)	6,5 (+703 %)	5,6 (+591 %)	1 (+24 %)
Energie – Kühlwasser	7,69 <sup>8</sup>	0,34 (-95 %)	16 (+108 %)	1,4 (-81 %)	21,1 (+175 %)
Wasserstoff – Elektrolyse	<0,1 <sup>9</sup>	3,0	–	–	–
Gesamtwasserbedarf	18	14 (-22 %)	29 (+61 %)	14 (-22 %)	35 (+94 %)

Im **Haushaltssektor** wirken insbesondere demografische Veränderungen und Effizienzsteigerungen in drei Szenarien dämpfend auf den Wasserbedarf. Im Wachstumsszenario „Wirtschaftswunder 2.0“ steigt der Haushaltswasserbedarf dagegen moderat an, was auf Bevölkerungszuwachs und hitzebedingte Bedarfsspitzen zurückgeführt werden kann. Ein sinkender Jahresbedarf bedeutet allerdings dennoch nicht automatisch eine Entspannung für die Wasserversorgung. Auch bei rückläufigen Jahresmengen können hitzebedingte Spitzenbedarfe und damit kurzfristige Belastungen der Infrastruktur bestehen bleiben oder sogar an Bedeutung gewinnen. Umgekehrt führt Bevölkerungswachstum nicht

<sup>4</sup> Statistisches Bundesamt (2025a)

<sup>5</sup> Statistisches Bundesamt (2025a), <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltzustand-trends/wasser/wasserwirtschaft/oeffentliche-wasserversorgung#grundwasser-ist-wichtigste-trinkwasserressource>

<sup>6</sup> <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/rohstoffe-materialfluesse-wasser/Publikationen/Downloads/statistischer-bericht-ugr-wassergesamtrechnung-5851401.xlsx>

<sup>7</sup> Hier ist zu beachten, dass sich diese Referenz auf die modellierte Bewässerungsmenge für Feldfrüchte und Gemüse im Jahr 2020 bezieht (Ansatz beschrieben in Kapitel 2.3.6.4). Diese Zahl unterscheidet sich von Destatis (2023b), wo ein gesamter Bewässerungsbedarf von 0,43 Mrd. m<sup>3</sup> angegeben wurde. Die Diskrepanz ergibt sich daraus, dass detaillierte räumliche Daten zu Bewässerungsmenge in Destatis (2023b) fehlen. Stattdessen wurden räumliche Daten zur bewässerbaren Flächen für die Modellierung der Bewässerungsmenge genutzt, die in der Modellierung zu einem höheren Anteil auch tatsächlich bewässert werden.

<sup>8</sup> Ermittelt für das Jahr 2020 nach AGEB (2025) und Lohrmann (2019)

<sup>9</sup> Abgeschätzt nach <https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-Fokus-Volkswirtschaft/Fokus-2024/Fokus-Nr.-475-November-2024-Wasserstoff.pdf> und DVGW (2024)

zwangsläufig zu proportional steigenden Wasserbedarfen, wenn Effizienzgewinne wirken und die Wachstumseffekte teilweise kompensieren können.

Für die **Wirtschaft** ergibt sich ebenfalls ein zweigeteiltes Bild. In den wachstums- und (re-) industrialisierungsgeprägten Szenarien („Aufklärung 2.0“ und „Wirtschaftswunder 2.0“) steigen die Wasserbedarfe deutlich an, während sie in „Rückzugskampf“ und „Privatisierung des Lebens“ zurückgehen. Daraus lässt sich ableiten, dass der industrielle Wasserbedarf nicht allein von der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung abhängt, sondern wesentlich vom Strukturwandel und der Wasserintensität einzelner Branchen. Effizienzsteigerungen können steigende Wasserbedarfe dämpfen, werden aber durch eine Verschiebung hin zu wasserintensiven Produktionsprofilen (z. B. Halbleiterproduktion) potenziell überlagert. Für die Bewertung regionaler Risiken ist deshalb weniger der nationale Trend entscheidend, sondern die Frage, **wo** sich wasserintensive Wertschöpfung konzentriert.

Die Analyse der **landwirtschaftlichen Bewässerung** zeigt den Sektor Landwirtschaft mit den größten relativen Veränderungen und einer ausgeprägten Szenarioabhängigkeit. Während der Bewässerungsbedarf in „Aufklärung 2.0“ sinkt, steigt er in „Rückzugskampf“ und „Privatisierung des Lebens“ massiv an und bleibt in „Wirtschaftswunder 2.0“ moderat erhöht. Dies lässt darauf schließen, dass die Bewässerung nicht ausschließlich klimatisch determiniert ist, sondern in hohem Maß durch ökonomische Rahmenbedingungen, Technologiepfade sowie Anbau- bzw. Investitionsentscheidungen in Bewässerungssysteme geprägt wird. Gleichzeitig ist Bewässerung ein besonders konflikträchtiges Feld, weil sie vor allem im Sommerhalbjahr ansteigt und damit zeitlich mit erhöhten Haushaltsbedarfen zusammenfällt.

Der **Energiesektor (Kühlwasser)** ist in mehreren der vier Szenarien der entscheidende Treiber für die Entwicklung des Gesamtwasserbedarfs. In den Szenarien „Aufklärung 2.0“ und „Privatisierung des Lebens“ sinkt der Kühlwasserbedarf stark, während er in „Rückzugskampf“ und insbesondere in „Wirtschaftswunder 2.0“ deutlich ansteigt. Daraus folgt, dass die Wasserbedarfsentwicklung im Energiesektor weniger von Einzelmaßnahmen abhängt, sondern mehr von grundlegenden energiepolitischen Pfadentscheidungen (d. h. Anteil thermischer Stromerzeugung, Technologien und Kühlsysteme). In Zukunftspfaden mit hoher thermischer Stromerzeugung können sich zudem klimabedingte Einschränkungen (z. B. höhere Gewässertemperaturen und Niedrigwasser) stärker auf die Wassernutzung auswirken und Risiken verstärken.

#### **Anmerkung zu regionalen und saisonalen Aspekten der Ergebnisse**

Die Modellierung der sektoralen Wasserbedarfe erfolgte auf Kreisebene (NUTS-3), mit Ausnahme der Wasserstoffelektrolyse, die für die nationale Ebene quantifiziert wurde. Für Wasserstoff ist keine räumliche Zuordnung möglich, da die Standortverteilung zukünftiger Produktion mit sehr hohen Unsicherheiten verbunden ist. Zur Vergleichbarkeit der NUTS-3-Regionen wurden die Wasserbedarfe auf die Kreisflächen normiert (Flächenwasserbedarf in mm bzw. Liter/m<sup>2</sup>).

Die Ergebnisse zeigen deutliche räumliche Unterschiede: In allen vier Szenarien treten „Wasserbedarf-Hotspots“ insbesondere im Ruhrgebiet, im Rhein-Main-Gebiet sowie in großen Städten wie Berlin und Hamburg auf. Nordostdeutschland weist in vielen Regionen geringe projizierte Wasserbedarfe auf, während Hotspots, durch die landwirtschaftliche Bewässerung hervorgerufen, bestehen bleiben. Hotspots werden vor allem durch Wasserbedarfe in den Sektoren Haushalte und Wirtschaft in urbanen Regionen sowie durch räumlich konzentrierte Energieproduktion geprägt (besonders in „Rückzugskampf“ und „Wirtschaftswunder 2.0“). Landwirtschaftlicher Bewässerungsbedarf konzentriert sich auf ländliche Regionen mit großer

landwirtschaftlicher Nutzfläche, u. a. Nordost-Niedersachsen, Sachsen-Anhalt sowie entlang der Rhein- und Donautäler, besonders in den beiden Szenarien „Rückzugskampf“ und „Privatisierung des Lebens“.

Saisonalität ist sektorspezifisch ausgeprägt. Landwirtschaftlicher Bewässerungsbedarf konzentriert sich auf das Sommerhalbjahr (April–September) und wird unter Dürre- und Hitzeperioden verstärkt. Der höhere landwirtschaftliche Bewässerungsbedarf im Sommerhalbjahr fällt zeitlich mit erhöhtem Wasserbedarf für Haushalte zusammen. Dies hat potenziell eine saisonale Überlagerung von Spitzenbedarfen zur Folge, die für die regionale Versorgungssicherheit von signifikanter Relevanz ist.

Mögliche Auswirkungen auf wasserabhängige Ökosysteme, deren Wasserbedarfe sowohl saisonal als auch bedingt durch klimatische Veränderungen variieren, können durch die Szenarien und Quantifizierungen nicht abgebildet werden.

### **Anschlussfähigkeit und Ergebnisverwendung**

Wasserbedarfsszenarien bieten einen strategischen Mehrwert gegenüber klassischen statistischen Prognosen, da sie nicht eine einzige „wahrscheinliche“ Zukunft unterstellen, sondern ein Spektrum plausibler Zukünfte abbilden. Durch unterschiedliche Entwicklungslogiken können Unsicherheiten und Komplexität (Klimawandel, Globalisierung, technologische Fortschritte, sozio-ökonomische und politische Dynamiken, Wasserstoffwirtschaft, demografische Verschiebungen) besser in der Planung berücksichtigt werden, um robuste Anpassungsstrategien zu entwickeln. Die gemeinsame Erarbeitung und Diskussion möglicher Entwicklungspfade in partizipativen Workshops erhöhen Transparenz über zukünftige Herausforderungen, fördern gegenseitiges Verständnis und unterstützen Akzeptanz potenziell notwendiger (politischer) Maßnahmen und Entnahmeregelungen.

Folgende zentrale Nutzungsmöglichkeiten für die in dem Vorhaben entwickelten Szenarien ergeben sich:

#### **► Identifizierung zukünftiger Wasserengpassregionen („Hotspots“)**

- Der Kernnutzen besteht in der räumlich hochaufgelösten Quantifizierung möglicher zukünftiger Wasserbedarfe in den Sektoren Haushalte, Industrie/Wirtschaft, Landwirtschaft und Energie.
- Hotspots können durch das Mapping der szenariospezifischen Wasserbedarfe mit Projektionen des Wasserdargebots identifiziert werden.
- Für die Bewertung nicht-nachhaltiger Wassernutzung ist die Herkunft des Wassers (Grundwasser oder Oberflächenwasser) sowie der Ausgleich über Wassertransfers (Fernwassernetze) relevant.
- Einschränkung: Saisonale Hotspots sind mit den derzeitigen, meist jahresbasierten Datenerhebungen der Wasserbedarfe nur begrenzt ableitbar. Ausnahme ist die Landwirtschaft mit klimamodellbasierter, höher aufgelöster Bewässerungsmodellierung.

#### **► Optimierung der wasserwirtschaftlichen Infrastruktur und Planung**

- Im Kontext der Nationalen Wasserstrategie (Aktion 41) können regionale Szenarien als Basis für konzeptionelle Leitlinien zu klimaresilienter, ressourcenschonender und multifunktionaler Infrastruktur dienen.
- Wasserversorger können Bedarfe im Versorgungsgebiet abschätzen und Investitionen in Netzerweiterungen, Speicher (Talsperren, Grundwasserspeicher)

oder Verbundsysteme (Fernwasserleitungen) strategisch planen und dimensionieren.

► **Strategischer Zukunftstest und Maßnahmenentwicklung**

- Stakeholder können bestehende Strategien auf Kompatibilität in unterschiedlichen Szenarien prüfen, vorausschauend anpassen und neue zukunftsrobuste Maßnahmen entwickeln.

► **Steuerung und Regulierung sektoraler Wassernutzung**

- Szenarien (Narrative und Quantifizierung) ermöglichen treiberspezifische Betrachtungen, z. B. der Entwicklung von Bevölkerung, Innovation, Wirtschaft, Klima und Agrarpolitik.
- In landwirtschaftlich geprägten Regionen liefern Szenarien Grundlagen für Bewässerungsstrategien und Konfliktminimierung (Landwirtschaft, Trinkwasser, Ökosysteme), einschließlich möglicher Entnahmebeschränkungen oder Entnahmeentgelte oder anderer bewässerungssteuernder Maßnahmen für bestimmte Regionen und Zeiten.
- Bei Industrieansiedlungen (z. B. Chipfabriken, Rechenzentren oder Wasserstoffanlagen) können Szenarien dazu beitragen, standortbezogene Bewertungen vorzunehmen, um Wassernutzungskonflikten vorzubeugen. Dies ist insbesondere auf regionaler/ lokaler Ebene relevant, auch wenn der industrielle Gesamtwasserbedarf in Deutschland langfristig sinken könnte.

**Schlussfolgerungen und Empfehlungen für das weitere Vorgehen**

Im Rahmen des Vorhabens wurden vier qualitative Szenarien (Narrative) für die Wasserbedarfsseite entwickelt. Mittels diverser Modellierungsansätze erfolgte eine Quantifizierung der Szenarien unter Verwendung szenariospezifischer Annahmen. Schließlich wurden die Ergebnisse zu einem integrierten, qualitativ-quantitativen Szenarioset zusammengefasst. Die Darstellung der Wasserbedarfsprojektionen pro Sektor und insgesamt leistet einen wichtigen Beitrag zur Schließung bestehender Lücken, insbesondere durch die Berücksichtigung sozioökonomischer Faktoren als Treiber zukünftiger Wasserbedarfe neben klimatischen Veränderungen. Die zusätzliche Analyse saisonaler und regionaler Effekte ist hilfreich, um potenzielle zeitliche Versorgungsengpässe und räumliche „Hotspots“ von Wasserengpassregionen aufzudecken.

Die Quantifizierung zukünftiger Wasserbedarfe ist mit Unsicherheiten behaftet, die aus abgeleiteten Annahmen, Modellstrukturen und Vereinfachungen resultieren. Diese werden u. a. durch die aktuelle Datenlage zu sektoralen Wasserentnahmen in Deutschland verstärkt, v. a. bei den Sektoren Haushalte, Industrie und Landwirtschaft. Wasserentnahmen werden derzeit auf jährlicher Basis erfasst und in einem dreijährlichen Turnus von den Statistischen Landesämtern veröffentlicht. Eine Skalierung erfolgt zudem auf NUTS-3-Ebene, sofern es sich nicht um die Nutzung durch einen einzelnen Wassernutzer handelt (Schutz der Anonymität). Durch raumzeitlich detailliertere Wasserbedarfsdaten könnte das Prozessverständnis und die Prognosefähigkeit der verwendeten Modelle deutlich gesteigert werden. Da Wasserknappheit auch temporär über Tage und Wochen auftritt, wäre eine Bereitstellung wöchentlicher oder monatlicher Wassernutzungsdaten durch Wasserversorgungsunternehmen, Landwirtschaftskammern oder Wirtschaftsunternehmen für derartige Studien oder Forschungszwecke sinnvoll. Darüber hinaus ist anzumerken, dass die Modellierung Szenario-

Inputs nutzt, die auf dem verfügbaren Expertenwissen der Fachworkshops beruhen; mangels Expertise in einzelnen Teilsektoren weisen diese Modellinputs ein kenntnisbasiertes Bias auf.

Die Studie prognostiziert keine Einzelzukunft, sondern entwirft vier plausible Szenarien, die durch zentrale Treiber und kritische Unsicherheiten (z. B. in Bezug auf Klima, Politik, Technologie) definiert werden. Die vier Szenarien und quantifizierten Modellergebnisse spannen einen Raum möglicher zukünftiger sektoraler Wasserbedarfe auf. Diese Aufspannung soll dazu dienen, Strategien auf ihre Zukunftsfähigkeit zu prüfen, Risiken frühzeitig zu identifizieren und robuste Handlungspläne für unterschiedliche Entwicklungen zu entwerfen, um so auf die verschiedenen möglichen Zukünfte vorbereitet zu sein.

## Summary

The National Water Strategy (BMUV, 2023) aims to protect, restore, and secure the natural water balance in the long term, as well as to prevent water scarcity and conflicting objectives. To this end, comprehensive water supply concepts are to be developed in cooperation between federal states, water suppliers and wastewater disposal companies, municipalities, and key water user groups. These concepts aim to reconcile current and future water supply and demand in order to support the long-term security of the water supply both within and outside of public water supply systems. This includes ensuring the sustainable water needs of ecosystems, guaranteeing the public drinking water supply, and providing the quantities of water required for basic needs (food and animal feed).

However, the understanding of future water demand in Germany remains very limited. Developing water demand scenarios is becoming increasingly important in light of climate change and socioeconomic developments, particularly considering future fluctuations in water usage and regional and seasonal variations. More frequent and prolonged droughts are especially problematic for the agricultural sector. Although only about 3.3% of agricultural land in Germany is currently irrigated (BZL, 2024), irrigation demand increased by 47% between 2009 and 2022 (Bernhardt et al., 2025). Further increases in irrigation demand are predicted as climate change progresses. A significant expansion of agricultural irrigation can lead to regional conflicts over water use and increased pressure on local water resources. Furthermore, rising demand can create conflicts between public water supply and agricultural irrigation.

The problem of water scarcity is not limited to agriculture. Drinking water supply, industrial production, and cooling water requirements must also be considered, especially given the growing importance of water-intensive industries such as semiconductor manufacturing, data center cooling, and hydrogen production. Media research on water-related conflicts in Germany shows that numerous sectors were affected by water scarcity, particularly during the dry years of 2018–2020 and 2022 (industry, agriculture, ecosystems, private consumption, shipping, and public water supply). Water demand scenarios provide a basis for planning and expanding water management infrastructure (e.g., supra-regional supply lines, reservoirs) and for safeguarding industrial sites. Combined with information on (future) water availability, water demand scenarios can help identify risks, develop adaptation strategies and emergency plans, and proactively avoid or reduce potential conflicts over water use.

In practice, many water supply concepts derive future water demand almost exclusively from demographic trends and per capita water use. For the agricultural, industrial, and commercial sectors, the status quo is often simply extrapolated due to high uncertainty and a lack of reliable assumptions. This can lead to systematic underestimations or overestimations of sectoral needs. Numerous studies and model projections based on climate scenarios already exist for the water supply side (e.g., Boeing & Marx, 2022; Hattermann et al., 2015; Stein et al., 2024). However, comprehensive, cross-sectoral studies on potential developments in sector-specific water demands in Germany are lacking. Currently available studies include cross-sectoral analyses, such as those conducted in the WatDEMAND project (Zaun et al., 2024), which enable spatially resolved projections up to the year 2100. However, these are based on simplified assumptions and do not include narratives and scenarios developed through participatory processes.

Qualitative socioeconomic scenarios, such as the *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs) from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), are currently underutilized in Germany, even though quantitative climate scenarios (RCPs) are the standard approach. For robust water demand assessments and strategy development, usable, SSP-compatible, dynamic scenario

narratives that transparently depict temporal development logics and the interplay of key uncertainties are lacking.

Against this backdrop, the report justifies the need for a combination of qualitative and quantitative water demand scenarios. Qualitative scenarios (narratives/storylines) make the logic and temporal dynamics of possible futures comprehensible and are of central importance for strategy development, while quantitative scenarios provide numerical values and robust relationships as a basis for planning. The methodological framework presented in this study is the so-called *Story and Simulation Approach (SAS)*. This approach initially involves the development of storylines, which are then quantified and integrated through modelling.

**Scenarios: No policy strategies without assigning desirability – instead, a contextual description of possible futures as a basis for strategic planning.**

The understanding of scenarios in this report follows the methodology of *scenario planning* (Schwartz 1996, van der Heijden 2005, Ringland 2006). Building on this, it is important to note the following: **Scenarios are not descriptions of policy strategies** – they do not, as such, make statements like: “We implement this policy and these are the future results.” **Instead, they enable answers to the question “What if?”**, for example: “What would happen (the consequences for water demand) if a growing divide were to emerge in German society?” **Different Possible contextual developments** are thus combined into stories about the future (future narratives). It is important that different scenarios are developed, which together seek to describe the future development space of possibilities for a specific topic and perspective.

**Scenarios are not, in themselves, descriptions of desirable or aspired-to futures.** While observers are free to evaluate individual scenarios (for example, *best case, worst case, etc.*), *such evaluations are not prescribed by the scenarios themselves – nor are they methodologically developed on this basis, nor do they generally aim to do so.*<sup>10</sup>In the specific case of the scenarios for future water demand in Germany described in this report, this means that **the German Federal Environment Agency does not make any assessment of the desirability or undesirability of the presented scenarios.**

**Instead, scenarios depict possible future developments – regardless of whether they are desirable or not.** This allows, firstly, the **identification of potential future developments** that may not be desirable but are nevertheless possible, plausible, and relevant. Secondly, it enables **the testing and adaptation of policies and other measures/strategies based on these scenarios. and/or to develop.** This is done with the intention of being able to achieve the goals intended by the (policy) measures as comprehensively as possible under different future conditions. Scenarios in the sense of *scenario planning* (so) are therefore a means of future assessment as well as a means of strategy development – as here with regard to water demand.

**Methods for determining water requirements and scenarios**

► **Approach to gathering information on water needs**

As a basis for this study, comprehensive research was conducted on methods for estimating future water demands, including regional developments. A systematic literature search was carried out in online databases (including Web of Science, ScienceDirect, Google Scholar, and ResearchGate) using sector-specific search terms in both German and English. In addition to

---

<sup>10</sup>Leaving aside the special case of so-called *normative scenarios*, which is not relevant to this report.

scientific literature, relevant "grey" literature (e.g., water supply concepts, publications from DVGW, NGOs, associations, state authorities, and EU agencies) was systematically included.

To ensure comparability, the sources were cataloged in an Excel database and indexed according to specific criteria. The database comprises over 90 studies, which were analyzed systematically using a methodological catalog. A key finding of the methodological analysis is the wide range of tools available for simulating sectoral water demands, which vary considerably in complexity, input data, and scenario logic. Scenarios typically exhibit high heterogeneity and are rarely comparable across sectors and regions.

The following results regarding the water requirements of the relevant sectors were derived from the literature:

- **Public water supply / Households**

In the literature, household water demand is predominantly represented using demographic data and per capita consumption. More complex approaches, however, utilize regression models with socioeconomic variables. The report makes it clear that while these methods often accurately reflect annual volumes, they inadequately capture peak demand during heat waves and droughts. Therefore, for long-term planning and security of supply, the annual total is not the only decisive factor; rather, it is the combination of long-term levels (demographic trends, efficiency) and short-term demands (heat waves, pipeline losses) that matters.

- **Agriculture (irrigation)**

While irrigation needs are usually projected using models (hydrological or based on land-use and vegetation models), economic investment and decision-making processes are often only partially represented. However, these are crucial for determining actual irrigation needs. It turns out that the results depend heavily on whether extreme years are considered and how the political (and economic) frameworks used are assumed and how they work.

- **Energy (cooling water)**

In the literature, water demand is primarily derived from electricity generation pathways and water use intensities ( $\text{m}^3/\text{MWh}$ ) depending on the energy carrier. However, regional restrictions due to low water levels and high water temperatures are rarely considered consistently. It is clear that the energy sector can significantly influence overall water demand, either increasing or decreasing it, depending on the technology pathway (thermal or renewable focus). Hydrogen remains particularly dependent on assumptions due to the current difficulty in predicting cooling concepts and locations. Because of the associated uncertainty, determining and assessing hydrogen's water demand depends heavily on the chosen model assumptions.

- **Manufacturing Industry (excluding mining)**

Depending on the study, industrial water demand is determined either through specific consumption figures (water demand by sector or company size) or through intensity-based approaches (water demand per unit of production or value added). Trends are strongly dependent on structural change and are regionally heavily influenced by assumptions regarding industrial development. Increased efficiency can reduce water demand, but this can be offset by a shift towards (new) water-intensive activities. Annual data dominates, while heat-related peaks and local development effects are often methodologically difficult to represent.

- **Tourism**

Due to a lack of official statistics, literature mostly uses simple per-guest approaches, and the results depend heavily on assumptions and system boundaries. From an analytical perspective,

water demand for tourism is less relevant as a national driver of volume and more so as a regional and seasonal additional pressure that can coincide with other demands during peak periods. Long-term national projections are hardly reliable.

- **Ecosystems / minimum ecological runoff**

The derivation of minimum ecological runoff values ranges from simple hydrological thresholds to habitat-based case studies. Reliable quantification within a scenario context usually requires hydrological modelling. During droughts, ecological requirements can act as a restriction on water withdrawals and exacerbate competition for water resources. The effects of prolonged droughts and repeated instances of falling below these requirements are still insufficiently understood.

### **Water demand scenarios for Germany**

In two participatory co-creative workshops with participants from science, administration and sectoral water users<sup>11</sup> A process was initiated to develop scenarios for the future water demand of various sectors in Germany. First, an introduction to the topic of scenario development was provided, explaining the connection to the baseline scenarios of the Intergovernmental Panel on Climate Change (RCPs and SSPs). The focus of the subsequent work was on SSPs 1, 3, 4, and 5, whose basic assumptions were retained.<sup>12</sup>Through group work and discussions, drivers of German water demand were identified in order to further develop the global climate scenarios accordingly.

The driving forces were assessed in an uncertainty analysis with regard to their possible manifestations (polarities). The resulting uncertainty polarities were then compared and linked to the SSP/RCP framework of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), revealing a good degree of agreement. Subsequently, small groups developed suitable labels and narrative elements for the four scenarios up to the year 2100. The workshop results included scenario narratives for future water demand in Germany and a detailed analysis of the uncertainties. The four scenarios, presented as storylines, describe possible developments relevant to sectoral water demand up to the year 2100, with intermediate stages in 2050 and 2075.

The design of the scenarios does not imply any statements that the described developments are considered likely or desirable.

The scenarios do not include any strategies or political and regulatory measures in the water sector that could be introduced to regulate and counteract water demand.

Based on various models and the analysis of scientific literature, sectoral demand assumptions were derived from these scenario narratives, and water demands were quantified and modeled.

### **► Enlightenment 2.0 (SSP1)**

"Enlightenment 2.0" represents a societal and economic transformation path in which experiences of ecological crises lead to a broad rethinking and sustainability becomes the dominant guiding principle. Political and institutional capacity for action is high. Environmental and resource protection are systematically integrated into planning, infrastructure, and production. Technological developments (especially digitalization and AI-supported

---

<sup>11</sup> The selection of individual participants was made in direct consultation with the German Environment Agency (UBA). A list of participating organizations can be found in Appendix C. Despite invitations, the number of representatives from industry, agriculture, and nature conservation in the specialist workshops was limited; tourism was not represented.

<sup>12</sup>The global SSPs are: SSP1 (Sustainability – Taking the Green Road), SSP3 (Regional Rivalry – A Rocky Road), SSP4 (Inequality – A Road Divided) and SSP5 (Fossil-fueled Development – Taking the Highway). (O'Neill et al., 2014, O'Neill et al., 2015).

optimization) are specifically used for efficiency, circular economy, and resource conservation. In the energy system, the transition to renewable energies dominates, while water-intensive electricity generation based on fossil fuels declines significantly. At the same time, the transition to a hydrogen economy can generate new water demands, the extent of which depends primarily on technical designs (e.g., cooling concepts) and location decisions. In agriculture, improved adaptation capacities and more efficient irrigation techniques lead to consistently low water demand. Economic and structural changes can also contribute to a further reduction in irrigation needs in the long term. Overall, the scenario is characterized by a comparatively low additional climatic burden, a high adaptability and an overarching focus on efficiency and resilience, and is marked by a population decline.

### ► **Retreating Struggle (SSP3)**

"Retreat Struggle" describes a future characterized by high climatic stress and simultaneously low international cooperation. Political and economic systems are more strongly oriented towards national or regional interests, and global problem-solving capacity (including climate protection) remains weak. As a result, pressure on water resources increases significantly, and competition for their use intensifies. Water management is more conflict- and crisis-driven than strategically preventative. Agricultural production is increasingly focused on ensuring self-sufficiency, and adaptations to climate change occur only under difficult conditions, making irrigation an increasingly important stabilization measure. The energy sector remains highly dependent on thermal power generation, increasing water-related vulnerability to low water levels and temperature restrictions, which are more pronounced during periods of low water and high water temperatures. At the same time, climate change-related changes (e.g., higher water temperatures) lead to additional stress. The socio-economic context is characterized by structural weaknesses, limited investment capacity, and increasing conflict. Germany's population is declining drastically. Overall, "retreating struggle" is a scenario in which the water issue becomes more frequently visible as a bottleneck and area of conflict, and short-term security logics and distribution decisions dominate over long-term precautions.

### ► **Privatization of Life (SSP4)**

The "privatization of life" scenario is characterized by significant social and spatial inequality, as well as differing adaptability of actors to the impacts of climate change and resource scarcity. Technological innovations and efficient solutions are available, but are primarily implemented where capital, governance capacity, and access to infrastructure are present. In less privileged areas, however, infrastructure gaps and a gradual erosion of public services occur. This is compounded by increased water losses, caused, for example, by inadequately maintained networks and infrastructure. Overall, the energy sector is moving towards lower water-related impacts, partly through technological shifts and efficiency improvements. However, the distribution of benefits is unequal. In agriculture, globally determined economic conditions and price signals can lead to a significant expansion or stabilization of irrigation-intensive production, while at the same time regional restrictions and conflicts increase. This scenario is thus characterized by a coexistence of "high-performance islands" and structurally disadvantaged areas, which have corresponding consequences for the distribution and controllability of water demand as well as for the susceptibility to social conflict. This scenario is also characterized by a population decline.

### ► **Economic Miracle 2.0 (SSP5)**

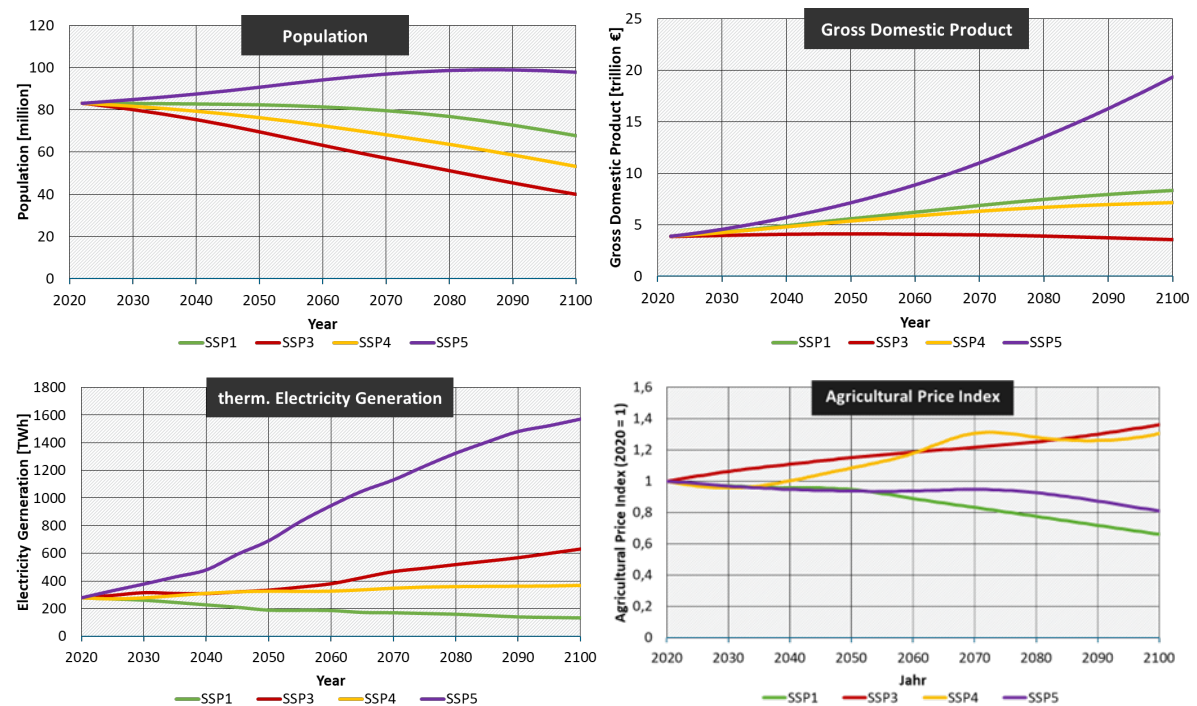
"Economic Miracle 2.0" describes a future with high economic dynamism and strong industrial activity, coupled with high climate pressure. Economic performance and security of supply take

priority, and unsustainable resource consumption is initially accepted in favor of growth and prosperity. Energy supply and electricity generation remain heavily reliant on thermal generation for a long time (initially coal and natural gas, later nuclear fusion), significantly increasing the energy system's dependence on water. Climate change-related challenges (e.g., low water levels, high water temperatures) act as a potential bottleneck. Household water demand is increased by demographic and settlement structure developments (including suburbanization) as well as by climate-intensified peaks. In agriculture, adaptation and productivity are paramount. Water demand is driven less by land expansion than by management and technological development. Overall, the scenario is characterized by high economic activity and a water-intensive energy system dominating total water demand. Resilience depends heavily on technological manageability and infrastructure. In this scenario, the population increases until 2100.

► **Framework assumptions regarding key water demand parameters/drivers**

The following figure shows the framework assumptions of relevant parameters from the global scenarios up to the year 2100, which were adapted for Germany to model the four scenarios. The figure at the top left shows the population development in Germany; it serves as a key driver for projections in the household sector. The figure at the top right shows the projections of gross domestic product, which forms an essential reference point for modelling water demand in the economic sector. The figure below on the left shows the development of thermal electricity production as a whole and the figure on the bottom right shows the agricultural price index.

**Figure 2: Global SSP drivers relevant to water demand changes by scenario (adapted for Germany)**



Source: own illustration, research team

The water demand scenarios developed in the two workshops were quantified up to the year 2100 using sectoral models (e.g., water balance models and hydro-economic modeling), as is anchored in the *Story and Simulation Approach (SAS)*. The results of the four scenarios

demonstrate that future water demand up to the year 2100 can differ significantly depending on the socio-economic and climate policy development path. In two scenarios, “Enlightenment 2.0” and “Privatization of Life,” total water demand decreases by approximately one-fifth compared to the current reference value. In contrast, demand increases sharply in the scenarios “Retreat Struggle” and especially in “Economic Miracle 2.0.” The range of total annual water demand in 2100 thus extends from 14 to 35 billion m<sup>3</sup>, highlighting the high sensitivity of total water demand to sectoral structural and transformation processes.

**Table 2: Total and sectoral water demands in Germany in 2100 and in the reference year 2022 (each in billion cubic meters) and relative percentage changes (2100 compared to 2022) in the scenarios developed**

Sector	Reference <sup>13</sup>	Enlightenment 2.0 (SSP1-RCP-2.6)	Retreat Struggle (SSP3-RCP8.5)	Privatization of Life (SSP4-RCP4.5)	Economic Miracle 2.0 (SSP5-RCP8.5)
Households	4.28 <sup>14</sup>	2.77 (-35%)	2.19 (-49%)	2.67 (-38%)	4.68 (+9%)
Manufacturing Industry	5.44 <sup>15</sup>	7.56 (+39%)	4.1 (-25%)	4.8 (-12%)	8.26 (+52%)
Agriculture – Irrigation	0.81 <sup>16</sup>	0.48 (-41%)	6.5 (+703%)	5.6 (+591%)	1 (+24%)
Energy – Cooling water	7.69 <sup>17</sup>	0.34 (-95%)	16 (+108%)	1.4 (-81%)	21.1 (+175%)
Hydrogen electrolysis	<0.1 <sup>18</sup>	3.0	–	–	–
Total water demand	18	14 (-22%)	29 (+61%)	14 (-22%)	35 (+94%)

In the **household sector**, demographic changes and efficiency improvements have a dampening effect on water demand in three scenarios. In the growth scenario “Economic Miracle 2.0,” however, household water demand rises moderately, which can be attributed to population growth and heat-related peak demands. A decreasing annual demand, however, does not automatically mean that the water supply is less strained. Even with declining annual volumes,

<sup>13</sup> Statistisches Bundesamt (2025a)

<sup>14</sup> Statistisches Bundesamt (2025a), <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltzustand-trends/wasser/wasserwirtschaft/oeffentliche-wasserversorgung#grundwasser-ist-wichtigste-trinkwasserressource>

<sup>15</sup> <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/rohstoffe-materialfluesse-wasser/Publikationen/Downloads/statistischer-bericht-ugr-wassergesamtrechnung-5851401.xlsx>

<sup>16</sup> It should be noted that this reference relates to the modeled irrigation volume for field crops and vegetables in 2020 (approach described in section 2.3.6.4). This figure differs from Destatis (2023b), which reported a total irrigation demand of 0.43 billion m<sup>3</sup>. The discrepancy arises from the lack of detailed spatial data on irrigation volume in Destatis (2023b). Instead, spatial data on irrigable areas were used to model the irrigation volume, and a higher proportion of these areas are actually irrigated in the model.

<sup>17</sup> Calculated for the year 2020 based on AGEB (2025) and Lohrmann (2019).

<sup>18</sup> Estimated based on <https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-Fokus-Volkswirtschaft/Fokus-2024/Fokus-Nr.-475-November-2024-Wasserstoff.pdf> and [DVGW \(2024\)](#).

heat-related peak demands and thus short-term strain on the infrastructure can persist or even increase in significance. Conversely, population growth does not necessarily lead to proportionally increasing water demand if efficiency gains are achieved and can partially offset the effects of growth.

The **economic** picture is similarly divided. In the scenarios characterized by growth and (re-) industrialization ("Enlightenment 2.0" and "Economic Miracle 2.0"), water demand increases significantly, while it decreases in the scenarios of "Retreat Struggle" and "Privatization of Life." This suggests that industrial water demand depends not only on overall economic development but also significantly on structural change and the water intensity of individual sectors. Efficiency improvements can mitigate rising water demand, but these effects are potentially overshadowed by a shift towards water-intensive production profiles (e.g., semiconductor manufacturing). Therefore, when assessing regional risks, the decisive factor is not so much the national trend, but rather **where** water-intensive value creation is concentrated.

The analysis of **agricultural irrigation** reveals that the agricultural sector experiences the greatest relative changes and a pronounced dependence on different scenarios. While irrigation demand decreases in the "Enlightenment 2.0" scenario, it increases dramatically in the "Retreat Struggle" and "Privatization of Life" scenarios, remaining moderately elevated in the "Economic Miracle 2.0" scenario. This suggests that irrigation is not solely determined by climate, but is also significantly influenced by economic conditions, technological pathways, and cultivation and investment decisions regarding irrigation systems. At the same time, irrigation is a particularly contentious area because demand increases primarily during the summer months, coinciding with peak household needs.

The **energy sector (cooling water)** is the decisive driver for the development of overall water demand in several of the four scenarios. In the "Enlightenment 2.0" and "Privatization of Life" scenarios, cooling water demand decreases sharply, while it increases significantly in "Retreat War" and especially in "Economic Miracle 2.0." This suggests that the development of water demand in the energy sector depends less on individual measures and more on fundamental energy policy path decisions (i.e., the share of thermal power generation, technologies, and cooling systems). In future pathways with high thermal power generation, climate-related constraints (e.g., higher water temperatures and low water levels) can also have a greater impact on water use and exacerbate risks.

#### **Note on regional and seasonal aspects of the results**

The modeling of sectoral water demands was carried out at the county level (NUTS 3), with the exception of hydrogen electrolysis, which was quantified at the national level. Spatial allocation for hydrogen is not possible, as the distribution of future production sites is subject to very high uncertainties. To ensure comparability between the NUTS 3 regions, the water demands were normalized to county areas (area water demand in  $\text{mm}^2$  or  $\text{liters}/\text{m}^2$ ).

The results reveal significant spatial differences: In all four scenarios, "water demand hotspots" emerge particularly in the Ruhr area, the Rhine-Main region, and major cities such as Berlin and Hamburg. Northeastern Germany exhibits low projected water demands in many regions, while hotspots caused by agricultural irrigation persist. These hotspots are primarily driven by water demands in the household and industrial sectors within urban areas, as well as by spatially concentrated energy production (especially in the "Retreat Struggle" and "Economic Miracle 2.0" scenarios). Agricultural irrigation demand is concentrated in rural regions with large agricultural areas, including northeastern Lower Saxony, Saxony-Anhalt, and along the Rhine and Danube valleys, particularly in the "Retreat Struggle" and "Privatization of Life" scenarios.

Seasonality is pronounced in specific sectors. Agricultural irrigation needs are concentrated in the summer months (April–September) and are intensified during periods of drought and heat. The higher agricultural irrigation demand in the summer months coincides with increased water demand from households. This potentially results in a seasonal overlap of peak demands, which is of significant relevance for regional water security.

The scenarios and quantifications cannot depict the potential impacts on water-dependent ecosystems, whose water requirements vary both seasonally and due to climatic changes.

### **Connectivity and use of results**

Water demand scenarios offer strategic added value compared to traditional statistical forecasts because they do not assume a single "probable" future, but rather depict a spectrum of plausible futures. Different development logics allow for better consideration of uncertainties and complexities (climate change, globalization, technological advances, socio-economic and political dynamics, the hydrogen economy, demographic shifts) in planning, enabling the development of robust adaptation strategies. The collaborative development and discussion of potential pathways in participatory workshops increases transparency regarding future challenges, fosters mutual understanding, and supports acceptance of potentially necessary (political) measures and water withdrawal regulations.

The following key potential uses for the scenarios developed in the project emerge:

#### **► Identification of future water shortage regions ("hotspots")**

- The core benefit lies in the spatially high-resolution quantification of possible future water demands in the household, industry/business, agriculture and energy sectors.
- Hotspots can be identified by mapping scenario-specific water demands with projections of water supply.
- For the assessment of unsustainable water use, the origin of the water (groundwater or surface water) and the compensation via water transfers (long-distance water networks) are relevant.
- Limitation: Seasonal hotspots can only be derived to a limited extent using current, mostly annual-based data collections of water demand. Agriculture is an exception, with its climate model-based, higher-resolution irrigation modeling.

#### **► Optimization of water management infrastructure and planning**

- In the context of the National Water Strategy (Action 41), regional scenarios can serve as a basis for conceptual guidelines on climate-resilient, resource-efficient and multifunctional infrastructure.
- Water suppliers can estimate needs in the supply area and strategically plan and dimension investments in network expansions, storage facilities (dams, groundwater reservoirs) or interconnected systems (long-distance water pipelines).

#### **► Strategic future assessment and development of measures**

- Stakeholders can examine existing strategies for compatibility in different scenarios, adapt them proactively, and develop new, future-proof measures.

#### **► Control and regulation of sectoral water use**

- Scenarios (narratives and quantification) enable driver-specific considerations, e.g., of the development of population, innovation, economy, climate and agricultural policy.

- In agriculturally dominated regions, scenarios provide a basis for irrigation strategies and conflict minimization (agriculture - drinking water - ecosystems), including possible withdrawal restrictions or withdrawal charges or other irrigation control measures for specific regions and times.
- For industrial developments (e.g., chip factories, data centers, or hydrogen plants), scenarios can help to conduct site-specific assessments in order to prevent water use conflicts. This is particularly relevant at the regional/local level, even if the overall industrial water demand in Germany could decrease in the long term.

### **Conclusions and recommendations for further action**

Within the scope of this project, four qualitative scenarios (narratives) were developed to address water demand. These scenarios were then quantified using various modeling approaches and scenario-specific assumptions. Finally, the results were compiled into an integrated, qualitative-quantitative scenario set. Presenting water demand projections for each sector and overall makes a significant contribution to closing existing gaps, particularly by considering socioeconomic factors as drivers of future water demand alongside climate change. The additional analysis of seasonal and regional effects is helpful in identifying potential temporal supply bottlenecks and spatial hotspots in water-scarce regions.

Quantifying future water demands is subject to uncertainties resulting from derived assumptions, model structures, and simplifications. These uncertainties are exacerbated, among other things, by the current data situation regarding sectoral water withdrawals in Germany, particularly in the household, industrial, and agricultural sectors. Water withdrawals are currently recorded annually and published every three years by the state statistical offices. Scaling is also performed at the NUTS 3 level, unless the data pertains to use by a single individual (to protect anonymity). More detailed spatial and temporal water demand data could significantly improve the understanding of the processes and the predictive capabilities of the models used. Since water scarcity can also occur temporarily over days and weeks, the provision of weekly or monthly water usage data by water suppliers, chambers of agriculture, or businesses would be beneficial for such studies or research purposes. Furthermore, it should be noted that the modeling utilizes scenario inputs based on the available expert knowledge from specialist workshops. Due to a lack of expertise in individual sub-sectors, these model inputs exhibit a knowledge-based bias.

The study does not predict a single future, but rather outlines four plausible scenarios defined by key drivers and critical uncertainties (e.g., regarding climate, politics, and technology). These four scenarios and quantified model results define a range of possible future sectoral water demands. This framework is intended to serve as a tool for assessing the viability of strategies, identifying risks early on, and developing robust action plans for different developments, thus ensuring preparedness for various possible futures.

## **Beitragende**

Grundlage der Entwicklung der Wasserbedarfsszenarien für Deutschland war ein ko-kreativer Prozess mit Stakeholdern, welche im Austausch mit dem Projektteam die Bausteine für die Szenarien entwickelt, Input zur Quantifizierung geliefert, sowie ausführlich Rückmeldungen zu den Szenarien-Narrativen und Modellierungen gegeben haben.

Zudem haben einige Experten im Nachgang zum 2. Fachworkshop wichtige Einschätzungen geleistet, für die sich das Projektteam bedanken möchte.

Das Projektteam dankt dem BDEW für die freundliche Bereitstellung der Räumlichkeiten für den zweiten Fachworkshop.

## 1 Hintergrund

Die Nationale Wasserstrategie (BMUV, 2023) hat zum Ziel, den naturnahen Wasserhaushalt zu schützen, wiederherzustellen, langfristig und dauerhaft zu sichern sowie Wasserknappheit und Zielkonflikten vorzubeugen. Dazu soll unter anderem die Prognosefähigkeit der Wasserhaushaltsanalysen verbessert werden (Aktion 1) und es sind in „Kooperation von Ländern, Wasserver- und Abwasserentsorgern, Gewässerunterhaltungspflichtigen, Kommunen und den wesentlichen Wassernutzergruppen möglichst flächendeckend Wasserversorgungskonzepte zu erarbeiten. Diese enthalten die Analyse des aktuellen und zukünftigen Wasserangebotes sowie der Wasserbedarfe und führen diese ausgleichend zur langfristigen Sicherung der Wasserversorgung - innerhalb und außerhalb der öffentlichen Wasserversorgung - zusammen. Dabei sind die Wasserbedarfe der Ökosysteme und die öffentliche Trinkwasserversorgung sowie die Bereitstellung der für die Erzeugung von Nahrungs- und Futtermitteln (Grundversorgung) erforderlichen Wassermengen in ausreichend guter Qualität dauerhaft sicherzustellen“ (BMUV, 2023).

### **Die Notwendigkeit weiterer Wasserbedarfsszenarien wird aufgrund des Klimawandels steigen**

Wasserbedarfe werden sich in der Zukunft auf Grund des Klimawandels und sozio-ökonomischen Entwicklungen mengenmäßig, räumlich und zeitlich verändern. Wasserbedarfsszenarien sind entscheidend, um die zukünftige Nachfrage und im Kontext der Verfügbarkeit von Wasser zu bewerten und Maßnahmen zur Bewältigung der Knappheit zu planen. Der Klimawandel kann die Nachfrage nach Wasser für die Bewässerung, die Trinkwasserversorgung und die Industrie erhöhen. Häufigere und längere Dürreperioden treffen vor allem den landwirtschaftlichen Sektor. Obwohl momentan nur ca. 3,3 % der landwirtschaftlichen Fläche in Deutschland bewässert werden (BZL, 2024), ist der Bewässerungsverbrauch zwischen 2009 und 2022 um 47 % gestiegen (Bernhardt et al., 2025). Unter fortschreitendem Klimawandel wird eine weitere Zunahme des Bewässerungsbedarfs in Deutschland projiziert (McNamara & Herrmann, 2024). Eine deutliche Ausweitung der Bewässerung könnte zu regionalen Nutzungskonflikten und zum Rückgang lokaler Wasserressourcen führen. Das nutzbare Grundwasserangebot und eine mögliche Priorisierung der öffentlichen Wasserversorgung könnte zudem eine Grundwassernutzung für die landwirtschaftliche Bewässerung limitieren, was in der WADKlim-Studie (Stein et al., 2024) in mehreren Szenarien gezeigt wurde.

Nicht nur die Landwirtschaft ist von Trockenheit und Dürre betroffen, auch die Trinkwasserversorgung und die Wasserbedarfe für die industrielle Produktion und Kühlwasser sind zu berücksichtigen. Wasserbedarfsszenarien bieten eine Grundlage für die Planung und den Ausbau von Wasserinfrastruktur, wie z. B. (überregionale) Versorgungsleitungen und Speicher. Eine zuverlässige Wasserversorgung ist wiederum entscheidend für die wirtschaftliche Entwicklung und Aufbau (neuer) Industriestandorte. Wasserbedarfsszenarien unterstützen die Sicherstellung der Wasserversorgung für industrielle Prozesse und tragen dazu bei, die Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten. Im Zusammenhang mit Wasserknappheit helfen Wasserbedarfsszenarien bei der Identifizierung und Bewertung von Risiken und ermöglichen die Entwicklung von Anpassungsstrategien und Notfallplänen.

Insgesamt wird der Klimawandel sowie gesellschaftliche Entwicklungen die Komplexität und Unsicherheit im Zusammenhang mit der Wasserverfügbarkeit und -nachfrage erhöhen. Wassernutzungsszenarien werden daher ein immer wichtigeres Werkzeug für die Bewältigung dieser Herausforderungen sein. Sie ermöglichen es, verschiedene zukünftige Entwicklungen zu untersuchen und fundierte Entscheidungen für ein nachhaltiges Wassermanagement zu treffen.

Dies ist wichtig, um Wasserknappheit zu vermeiden und die verfügbaren Wasserressourcen für zukünftige Generationen zu gewährleisten. Mit dem Einsatz von Wasserbedarfsszenarien kann ein möglicher Nutzungsdruck auf Oberflächen- und Grundwasserressourcen abgeschätzt und das mögliche Auftreten nicht-nachhaltiger Wassernutzungen erkannt werden.

Die Durchführung statistischer Analysen des Wasserangebots und Indikatoren zur Identifizierung von Dürren und Wasserknappheit auf NUTS-3-Ebene (s. WADKlim-Studie) haben u. a. verdeutlicht, dass gegenwärtig regionale ernst zu nehmende klimatologische Gefahren für den mengenmäßigen Zustand der Grundwasserressourcen bestehen und diese sich in mittlerer und ferner Zukunft durchaus verschärfen können. Die Auswirkungen des Klimawandels durch vermehrt auftretende Hitzewellen und Dürren führen zudem zu Niedrigwasserständen in Flüssen und können somit zu regionaler Wasserknappheit und Wassernutzungskonkurrenzen oder sogar Wassernutzungskonflikten führen. Letztere werden je nach Ausprägung von den beteiligten Akteur\*innen unterschiedlich wahrgenommen. Erste Ergebnisse einer Medienrecherche und -analyse zum Auftreten wasserbezogener Nutzungskonflikte in Deutschland haben gezeigt, dass die Bandbreite der von Wassernutzungskonflikten betroffenen Akteur\*innen groß ist (s. WADKlim-Studie, Stein et al., 2024). Insbesondere in den trockenen Jahren 2018-2020 und 2022 waren die Sektoren Industrie, Landwirtschaft, Ökosysteme, Privatverbraucher\*innen, Schifffahrt und öffentliche Wasserversorgung in Nutzungskonflikte involviert. Die Quantifizierung möglicher Wasserbedarfsszenarien kann in Kombination mit Informationen zum zukünftigen Wasserangebot verwendet werden, um vorausschauend zu agieren und wasserbezogene Nutzungskonflikte zu vermeiden oder zu reduzieren. Flächendeckende Wasserversorgungskonzepte, die auf Länderebene erarbeitet werden, sollen u. a. die Nutzung der Wasserressourcen nachhaltig gestalten und eine Übernutzung verhindern. Zur Beurteilung der Wasserversorgungssicherheit in den Verwaltungseinheiten greifen viele Wasserversorgungskonzepte auf eine Bilanzbetrachtung aus Wasserangebot und Wasserbedarf zurück.

Der zukünftige Wasserbedarf wird dabei fast immer aus der demografischen Entwicklung und der Pro-Kopf-Wassernutzung der Bevölkerung abgeleitet. Da der zukünftige Wasserbedarf für Landwirtschaft, Industrie- und Gewerbebetriebe schwieriger zu prognostizieren ist, z. B. aufgrund von wachsenden Klimawandeleinflüssen und sich wandelnden sozioökonomischen und politischen Rahmenbedingungen, wird aus Mangel näherer Kenntnisse zu branchen- oder landesweiten Entwicklungen der Status quo für die Zukunft fortgeschrieben. Dies führt zu einer systematischen Unter- bzw. Überschätzung des sektoralen Wasserbedarfs. Während über zukünftige Entwicklungen der Wasserverfügbarkeit bereits eine Vielzahl von Studien und Modellierungsergebnisse vorliegen, fehlen umfassende Untersuchungen zu möglichen Entwicklungen von sektorspezifischen Wasserbedarfen. Derzeit existieren sektorübergreifende Analysen zu diesem Punkt aus dem Projekt WatDEMAND (Zaun et al., 2024). Hier wurde der Wasserbedarf in den Sektoren Haushalte, Industrie und Landwirtschaft bis zum Jahr 2100 räumlich aufgelöst für Deutschland prognostiziert.

### **Fehlende nutzbare und aussagekräftige qualitative Szenarien / Szenariennarrative für Deutschland**

In Deutschland werden standardmäßig quantitative Klimaszenarien für unterschiedliche Emissionspfade (*Representative Concentration Pathways*, RCPs) des Weltklimarates (IPCC) und darauf aufbauenden Modellierungen genutzt. Die dazugehörigen globalen qualitativen Szenarien (*Shared Socioeconomic Pathways*, SSPs) werden dagegen wenig bis gar nicht verwendet. Für die "Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland" (Kahlenborn et al., 2021) wurde ein eigener Szenario-Rahmen verwendet, der auf quantitativen Trends und Annahmen aus anderen nationalen Zukunftsstudien aufbaut und als anschlussfähig zu den SSPs bezeichnet wird. Die

darin enthaltenen drei sozioökonomischen Szenarien unterscheiden sich in zentralen Annahmen jedoch von den *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs) (Lutz et al. 2019), was eine Kompatibilität zum IPCC-Rahmen schwächt, andererseits eine nationale Kompatibilität stärkt. Es fehlen jedoch detaillierte qualitative und grundlegend SSP-kompatible Szenariennarrative für Deutschland, die insbesondere für die Abschätzung des zukünftigen Wasserbedarfs und die Entwicklung schlagkräftiger und zielführender Handlungsstrategien von elementarer Wichtigkeit sind.

### **Notwendigkeit von qualitativen Szenarien als Szenariennarrative für die zukünftige Wasserbedarfsabschätzung und -strategieentwicklung**

Für die Bestimmung zukünftiger Wasserbedarfe ist es von entscheidender Bedeutung, die für den Wasserbedarf relevanten Zeiträume, sich entwickelnde Unsicherheiten von Einflussfaktoren und deren potenzielle Konsequenzen abzudecken, um eine robuste Grundlage für die Entwicklung von Strategien auf multiplen Ebenen zu schaffen. Zukunftsszenarien im Sinne eines *Scenario Planning* bauen auf zentralen Unsicherheiten von Einflussfaktoren auf und zeigen das mögliche Zusammenspiel verschiedener Faktoren über zukünftige Zeiträume. Die Unsicherheiten werden dabei in mehreren, unterschiedlichen und sowohl plausiblen als auch relevanten Szenarien in ihren komplexen Konsequenzen erfasst (Kok et al 2019, Gramberger et al 2014). Das Ziel besteht darin, den Bereich der möglichen und relevanten Entwicklungen mit einer bestmöglichen Schätzung abzudecken.

Qualitative Szenarien zeigen als Narrative die Logik der temporären Dynamiken auf und ermöglichen es, mögliche Zukünfte in ihrer Komplexität zusammenfassend zu begreifen – was für die Strategieentwicklung zentral ist. So können sich Maßnahmen und Strategien, die aus quantitativen Szenarien abgeleitet werden, in qualitativen Szenarien, zum Beispiel, als nicht umsetzbar oder nicht zielführend erweisen. Für die Einschätzung von Erfolgsaussichten von Maßnahmen und Strategien und deren Entwicklung werden qualitative Szenarien deswegen weitgehend genutzt. Dies ist auch im Rahmen des Szenarien-Ansatzes des Weltklimarates der Fall.

Im Gegensatz zu qualitativen Szenarien bieten quantitative Szenarien unter anderem den Vorteil, dass sie numerische Werte und numerische Beziehungszusammenhänge exakt aufzeigen und ebenso Grundlagen für Planungsprozesse schaffen. Die quantitativen Szenarien basierend auf den zukünftigen Treibhausgaskonzentrationen zur Beschreibung des Klimasignals (RCPs) und den Annahmen aus den sozioökonomischen Entwicklungen (SSPs) wurden erarbeitet, um mögliche Klimaänderungen und deren Auswirkungen in *Impactstudien* zu untersuchen. Die SSPs basieren auf Narrativen, die verschiedene zukünftige gesellschaftliche Entwicklungen beschreiben (O'Neill et al., 2014 / 2025).<sup>19</sup> Die Kombination von qualitativen und quantitativen Szenarien kommt weltweit zum Einsatz (Gramberger et al 2014, Kok et al 2014, Kok et al 2019, Pedde et al 2020).

### **Weiterführender Hintergrund: Die Shared Socioeconomic Pathways,(SSPs)**

Die ursprünglichen *Shared Socioeconomic Pathways,(SSPs)* entstanden im Umfeld des Weltklimarates, beschreiben als Szenarien<sup>20</sup> mehrere unterschiedliche sozio-ökonomische Zukunftsentwicklungen der Welt bis 2100 (SSP1 bis SSP5). Die SSPs sind als kurze Narrative gefasst und von Beginn darauf angelegt, weiter spezifiziert zu werden (O'Neill et al., 2015). Die

---

<sup>19</sup> Das dritte Element, die sogenannten SPAs (Shared Policy Assumptions) ziehen wir nicht in die Betrachtung ein.

<sup>20</sup> Der Begriff „*pathways*“ ist dabei unglücklich gewählt und trägt zu einer gewissen Verwirrung bei: „*pathways*“ steht oft für bewusst gewählte Wege zu strategischen Zielen – stattdessen beschreiben Szenarien (was die SSPs sind) kontextuelle Entwicklungen – sind also selbst keine Strategien, sondern dienen als Grundlage für Strategieentwicklung.

SSPs sind für die Kombination mit unterschiedlichen RCPs entwickelt – *Representative Concentration Pathways* (RCPs), den möglichen Konzentrationen von Treibhausgasen in der Atmosphäre, auch als Klimasignal bezeichnet. Wichtig ist, dass die SSPs von möglichen politischen und anderen Maßnahmen getrennt werden - es sind kontextuelle qualitative Szenarien. Die SSPs sind mit modellierungsrelevanten Annahmen verbunden, was – in Kombination mit den RCPs – gerade bei der Modellierung und Quantifizierung zur globalen Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Studien beiträgt. Wichtig ist, dass die SSPs keine politischen oder anderen Maßnahmen mit Bezug auf das Klima enthalten. Die Grundidee ist, dass diese strategischen Maßnahmen auf Basis der spezifizierten SSP/RCP Kombinationen entwickelt oder getestet werden können.<sup>21</sup>

Die globalen SSPs sind in einem Szenariorahmen verortet, der mit zwei Achsen aufgezogen wurde: Den Herausforderungen für die Bekämpfung des Klimawandels (*challenges to mitigation*) einerseits und den Herausforderungen für die Anpassung an den Klimawandel (*challenges to adaptation*) andererseits. Bei diesen wird jeweils zwischen hoch und niedrig unterschieden. So ergeben sich vier Grund-Szenarien: SSP1 (*Sustainability – Taking the Green Road*), SSP3 (*Regional Rivalry – A Rocky Road*), SSP4 (*Inequality – A Road Divided*) und SSP5 (*Fossil-fueled Development -Taking the Highway*).<sup>22</sup> In nachfolgenden Studien wurden die Achsen des Szenariorahmens auf verschiedene Arten interpretiert und auf andere als Klimathemen angewendet. Dabei wurden auch auf den globalen SSPs aufbauende, weiter spezifizierte Szenarien-Narrative entwickelt, die auf Weltregionen, Ländergruppen, einzelne Länder bis hin zu Kommunen zugeschnitten wurden (siehe u. a. Gramberger et al 2014, Kok et al 2014, Kok et al 2019, Pedde et al 2020).

### **Story and Simulation Approach (SAS)**

Der Story and Simulation Approach (SAS) ist eine Methode zur Szenarioentwicklung, die qualitative und quantitative Ansätze kombiniert, um zukünftige Entwicklungen zu analysieren und zu visualisieren (Alcamo und Henrichs, 2008). Diese Methode wird häufig in der Umweltforschung und in der Politikgestaltung eingesetzt, um komplexe Systeme wie den Klimawandel zu verstehen und verschiedene Zukunftsszenarien zu erkunden. Der SAS-Ansatz beginnt mit der Entwicklung qualitativer Szenarien (Storylines). Diese Storylines sind narrative Beschreibungen möglicher zukünftiger Entwicklungen, die auf Expertenwissen, historischen Daten und Annahmen basieren. Die Storylines bieten einen Rahmen, der die wichtigsten Treiber, Trends und Unsicherheiten eines Systems beschreibt. Sie helfen, die Komplexität des Systems zu reduzieren und die wichtigsten Faktoren zu identifizieren, die die Zukunft beeinflussen könnten. Nach der Entwicklung der Storylines werden quantitative Simulationen durchgeführt. Diese Simulationen nutzen u. a. Computermodelle, um die in den Storylines beschriebenen Szenarien numerisch zu quantifizieren. Die Modelle können verschiedene Variablen und Parameter berücksichtigen, um die Auswirkungen der identifizierten Treiber und Trends zu simulieren. Dies ermöglicht eine detaillierte Analyse der möglichen zukünftigen Entwicklungen. Der SAS-Ansatz integriert die qualitativen Storylines mit den quantitativen Simulationen, um ein umfassendes Bild der möglichen zukünftigen Entwicklungen zu erstellen. Diese Integration ermöglicht es, die Ergebnisse der Simulationen in den Kontext der narrativen Beschreibungen zu stellen und die Ergebnisse besser zu interpretieren und zu kommunizieren (Alcamo, 2008).

---

<sup>21</sup> Konzeptionell wurden diese Maßnahmen ursprünglich als *Shared Policy Assumptions* (SPAs) beschrieben (O'Neill et al., 2014, O'Neill et al., 2015). Diese Begrifflichkeit hat sich jedoch international wenig durchgesetzt.

<sup>22</sup> Zusätzlich wurde noch ein fünftes Szenario (SSP2 – *Middle of the Road*) erstellt (O'Neill et al., 2014, O'Neill et al., 2015), das allerdings wenig Erkenntnisgewinn erbringt und durch die Mittellage Gefahr läuft, als Vorhersage missinterpretiert und als vermeintlich „realistisches“ Szenario über die anderen gestellt werden. Das liefe der Grundidee der Szenarien-Methode zuwider.

## 2 Methoden zur Bestimmung von Wasserbedarfen und Szenarien

### 2.1 Herangehensweise zur Informationssammlung zu Wasserbedarfen

#### 2.1.1 Schritt 1: Systematische Literaturrecherche verwendeter Methoden

Als erster Arbeitsschritt in AP2 erfolgte eine umfassende Recherche verwendeter Methoden zur Abschätzung der zukünftigen Entwicklung von Wasserbedarfen, auch regionale Entwicklungen. Als Grundlage für die Entwicklung des Wasserdargebots wurden die Ergebnisse des Vorhabens WADKlim (FKZ: 3720 48 278 0) verwendet. Hinsichtlich der Wasserbedarfe wurden in einer systematischen Literaturrecherche Online-Datenbanken, wie z. B. Web of Science, Science Direct, Google Scholar oder Research Gate, etc. nach deutschen und englischen Stich-/Schlagwörtern durchsucht. Die Suchbegriffe (Stich-/Schlagwörter) wurden thematisch und Sektor-spezifisch ausgewählt und zur elektronischen Suche durch Operatoren miteinander kombiniert oder verknüpft in einer Phrasensuche verwendet. Dabei beschränkte sich die Recherche nicht nur auf wissenschaftliche Veröffentlichungen, sondern bezog relevante graue Literatur mit ein. Dies sind insbesondere ausgewählte repräsentative Planungsunterlagen (z. B. Wasserversorgungskonzepte) und Veröffentlichungen relevanter Organisationen (z. B. DVGW, NGOs, Bauernverband, Behörden der Länder und der EU), die ebenfalls systematisch durchsucht wurden. Der aktuelle Stand der Literaturrecherche findet sich in Anlage A

Um die Literaturquellen analysieren und miteinander vergleichen zu können, wurden die verschiedenen Berichte, wissenschaftlichen Artikel und sonstige Beiträge katalogisiert. Dazu wurde folgende Kategorisierung vorgeschlagen, die eine Vergleichbarkeit der Studien ermöglicht und die verwendeten Methoden übersichtlich darstellt. Folgende Parameter bzw. Kriterien wurden erfasst und zugrunde gelegt:

- ▶ Name des Berichts
- ▶ Projektnummer
- ▶ Zitation
- ▶ Schlagwörter
- ▶ Sektor
- ▶ Räumlicher Bezug
- ▶ Methode / Modell
  - Räumliche Auflösung
  - Zeitliche Auflösung
  - Methodische Grenzen
  - Robustheit (Testung)
- ▶ Datengrundlage
  - Eingangsdaten
  - Szenarien
  - Zeitraum

► Ergebnisse

### 2.1.2 Schritt 2: Analyse verwendeter Methoden mit Methodenkatalog

Als zweiter Arbeitsschritt in AP2 erfolgt gerade eine umfassende Analyse der recherchierten Veröffentlichungen, Artikel, Planungsunterlagen und Berichte von F+E-Vorhaben. Eine erste kurze Analyse verdeutlicht bereits, dass es eine große Auswahl an methodischen Werkzeugen zur Abschätzung und Simulation zukünftiger sektor-spezifischer Wasserbedarfe gibt. Diese Werkzeuge variieren in ihrer Komplexität, werden meist im wissenschaftlichen Kontext entwickelt und kommen dann zur Anwendung in der Praxis. Dabei fällt bereits auf, dass nicht nur die Anzahl der Inputgrößen zur Abschätzung oder Simulation der zukünftigen Wasserbedarfe stark schwankt, sondern deren zukünftige Entwicklungen von einfachen Annahmen (z. B. in Wassernutzungskonzepten, s. o.) bis hin zur Szenarienanalyse reichen (z. B. Kemmler et al., 2021). Die in diesem Kontext berücksichtigten Szenarien sind zudem sehr heterogen und selten über Regionen und Sektoren vergleichbar.

Vorhandene und angewendete Methoden und Modelle zur Ermittlung und Darstellung des potenziellen zukünftigen Wasserbedarfs sowie die zugrunde liegenden Szenarien und Annahmen zur zukünftigen Entwicklung wichtiger Einflussgrößen (Treiberkräfte) wurden analysiert und katalogisiert. Die Katalogisierung erfolgte in einer Excel-Tabelle; die einzelnen Studien sind über thematische Kriterien suchbar (s. Anlage A). Nachfolgende Kriterien wurden für einen strukturierten Überblick und zur Analyse herangezogen:

- Sektor
- Methodik
- Methodische Grenzen
- Eingangsdaten/ Treiberkräfte (Datengrundlage)
- Geografischer Einzugsbereich (räumliche Betrachtungsebene)
- Zeithorizont
- Szenarien (welche Szenarien wurden verwendet? Tendenz?)

## 2.2 Ergebnisse der Literaturrecherche zu Wasserbedarfen

Die Excel-Tabelle umfasst derzeit über 90 Studien, welche nach den genannten Kriterien analysiert wurden. Die vorläufigen Ergebnisse auf Grundlage der recherchierten Studien sind in den folgenden Abschnitten für die verschiedenen Sektoren dargestellt.

### 2.2.1 Öffentliche Wasserversorgung, Wasserversorgung von Haushalten

Für die öffentliche Wasserversorgung werden jährlich etwa 5,4 Mrd. m<sup>3</sup> (2019) Wasser der Umwelt entnommen, wovon 2019 4,7 Mrd. m<sup>3</sup> an Letztverbraucher\*innen abgegeben wurden. Die Entnahme erfolgt zu 70 % aus Grundwasser und 30 % aus Oberflächenwasser. Der Sektor versorgt 99,5 % der Haushalte und Kleingewerbe sowie gewerbliche und sonstige Abnehmer\*innen, wie öffentliche Einrichtungen, mit Trinkwasser. Haushalte und Kleingewerbe beziehen mit 81,5 % (3,8 Mrd. m<sup>3</sup>/Jahr) den größten Teil des Sektors (Destatis, 2023a; Destatis, 2024). Hier wurden insgesamt 17 Studien, welche den Wasserbedarf der öffentlichen Wasserversorgung bzw. Haushalte in Deutschland betrachten, untersuchen sowie zusätzlich 5

internationale und 11 weitere Studien, in denen der Sektor Teil einer Multisektorenbetrachtung ist.

**Methoden:** Die Bestimmung des Wasserbedarfs für Haushalte erfolgt in den Studien mit unterschiedlicher Komplexität. In Wasserversorgungskonzepten (WVK) und bundes- oder weltweiten Untersuchungen wird der Bedarf anhand der Bevölkerungsentwicklung und spezifischer Wassernutzungsintensitäten ermittelt (Stadt Oberhausen, 2018; Keim & Müller, 2017; Bijl et al., 2016) und zudem werden vereinzelt konkrete Faktoren, wie Bauprojekte in Wohnungs- und Gewerbegebieten, berücksichtigt (Stadt Castrop-Rauxel, 2018; Stadt Herten, 2024). Auf kleinräumlicher Ebene wird der Bedarf über die Gebäude und Flächennutzung mithilfe des CityGLM-Modells bestimmt (Bao et al., 2020).

Regressionsanalysen, welche den Einfluss sozio-ökonomischer Faktoren ermitteln, werden ebenfalls zur Wasserbedarfsermittlung regional und bundesweit verwendet (Schleich & Hillenbrand, 2009; Liehr et al., 2016). Auch die WatDEMAND Studie des DVGW schätzt die Entwicklung des individuellen Pro-Kopf-Bedarfs anhand gesellschaftlicher und klimatischer Veränderungen ab (DVGW, 2024).

**Eingangsdaten/Treiberkräfte:** In den Studien werden insbesondere die Bevölkerungsanzahl und -entwicklung sowie vergangene Wasserverbräuche als Inputparameter verwendet (z. B. PfK Ansbach GmbH, 2019; Keim & Müller, 2017). In den Regressionsanalysen werden u. a. Daten über den Wasserpreis, Haushaltseinkommen, -größe und Altersstruktur sowie Gartenflächen zur Bewässerung als Eingangsdaten genutzt (Schleich & Hillenbrand, 2009; Liehr et al., 2016; DVGW, 2024).

**Geografischer Einzugsbereich:** Insgesamt zwölf Studien beziehen ihre Untersuchung auf die regionale Ebene in Deutschland, überwiegend das Wasserversorgungsgebiet (z. B. SenUMVK Berlin, 2024). International wird der Bedarf entweder auf regionaler Ebene oder weltweit betrachtet (Flörke et al., 2013; Choudhary et al., 2012; Babel et al., 2014). Aufgrund der teilweise stark unterschiedlichen Lebensumstände und Lebensstandards sind internationale Studien nur bedingt auf Deutschland übertragbar.

**Zeithorizont:** Weltweit wird der Wasserverbrauch für Haushalte ab 1950 simuliert (Flörke et al., 2013). Aktuelle Studien prognostizieren den Wasserbedarf überwiegend bis 2030 bzw. 2040, da diese in der Regel für konkrete Infrastrukturplanungen verwendet werden (z. B. Möller & Burgschweiger, 2008; PfK Ansbach GmbH, 2019). Teilweise erfolgt ein Ausblick auch bis 2050 (SenUMVK Berlin, 2024; Niedersachsen, 2022). Nur vereinzelt werden Prognosen bis 2100 erstellt (Mikat et al., 2010). Der Bedarf wird in der Regel für ein Jahr angesetzt und Tages- oder Spitzenbedarfe teilweise mit Spitzennutzenfaktoren abgeschätzt (PfK Ansbach GmbH, 2019).

**Szenarien:** Die Studien verwenden keine konkreten (Klima-)Szenarien für die Prognose, sondern verwenden – wenn Klimaveränderungen berücksichtigt werden – qualitative Aussagen über mögliche Auswirkungen (Bao et al., 2020; Liehr et al., 2016). Sozio-ökonomische Prognosen werden entweder spezifisch erstellt oder anhand vergangener Entwicklungen abgeleitet (z. B. Oberhausen, 2018). Die Bevölkerungsentwicklung wird aus den koordinierten Bevölkerungsvorausrechnungen des statistischen Bundesamtes (Wischhusen & Lippert, 2017) oder aus Prognosen der Länder (WAW, 2024) entnommen.

Durch den Klimawandel werden vermehrt heißere Tage und Dürren erwartet, welche den Tagesbedarf an Trinkwasser erhöht, insbesondere aufgrund der Verwendung zur Gartenbewässerung. Die Signifikanz dieser Effekte über das Jahr hinweg sind strittig (Schleich & Hillenbrand, 2009; Keim & Müller, 2017), werden aber teilweise verwendet, um klimatische Folgen auf den Pro-Kopf-Verbrauch abzuschätzen (DVGW, 2024). Einen größeren Einfluss auf

den Gesamtbedarf von Haushalten haben die angeschlossene Bevölkerungszahl und das Nutzverhalten. In Deutschland wird bis 2070 von einer Entwicklung der Bevölkerungszahl von etwa +/-10 % ausgegangen (Destatis, 2022); durch gesellschaftliche Trends wie zum Beispiel Homeoffice oder Urban Gardening sowie die Veralterung der Gesellschaft könnte der Bedarf unabhängig von der Bevölkerungsentwicklung ansteigen.

**Gaps/Methodische Grenzen:** Die Studien bestimmen in der Regel den Jahresbedarf an Trinkwasser und erfassen somit Extreme, wie Dürren, nur unzureichend. Die Auswirkungen des Klimawandels auf das Auftreten solcher Extremen und einhergehende Änderungen des Nutzungsverhaltens sind nicht eindeutig. So sank der tägliche Pro-Kopf-Bedarf nach einem Anstieg bis 2020 in den letzten Jahren wieder ab, trotz der bundesweit auftretenden Dürren insbesondere im Jahr 2022 (BDEW, 2024). Durch große regionale Unterschiede im Pro-Kopf-Bedarf in Deutschland ist eine Skalierung auf Bundesebene schwierig. Der Einfluss der sonstigen Abnehmer (z. B. auch städtische Bewässerung) auf den Gesamtbedarf der öffentlichen Wasserversorgung wird in den Studien nicht betrachtet oder als konstant angenommen.

### 2.2.2 Landwirtschaft

In 15 Studien wurde der landwirtschaftliche Bewässerungsbedarf in Deutschland untersucht. Fünf davon analysieren historische Daten, während die übrigen zukünftige Bewässerungsbedarfe unter verschiedenen Szenarien und Regionen projizieren, vorwiegend motiviert durch den Klimawandel. Die meisten Studien prognostizieren steigende Bedarfe, wobei die Ergebnisse je nach Region, Modell und Szenario variieren.

**Methoden:** Die Bestimmung des Bewässerungsbedarfs in der analysierten Literatur basiert überwiegend auf hydrologischen (z. B. mGROWA, WaterGAP3) und Landnutzungs-/Vegetationsmodellen (z. B. LPJmL, LandSHIFT, AgroHyd Farmmodel, SWAT, MAgPIE). Diese Modelle wurden bereits kalibriert und validiert und arbeiten auf unterschiedlichen räumlichen Ebenen, von kleinteiligen Rasterzellen (Riediger et al., 2014) zur Kreisebene (McNamara et al., 2024; NMUEBK, 2022; Zaun et al., 2024) bis zur Bundesebene (Drastig et al., 2016a; Drastig et al., 2016b).

**Eingangsdaten/Treiberkräfte:** 13 von 15 Studien nutzen meteorologische Daten (Temperatur, Niederschlag), einige auch Daten zu Evapotranspiration und Bodenfeuchte als Treiber der Projektionen (Maier & Dietrich, 2016). Komplexere Modelle berücksichtigen zusätzliche biophysische Daten, z. B. zur Topografie, Bodenarten und -profilen, nutzbare Feldkapazität, und vorhandenen Landnutzungsmustern (Riediger et al., 2014; Kreins et al., 2015). Nur drei Studien verwenden auch sozioökonomische Faktoren wie Bevölkerungsdichte und Nachfrage nach landwirtschaftlichen Produkten (aus der Beek et al., 2010; Schaldach et al., 2012; Sehn & Blesl 2020).

**Geographischer Einzugsbereich:** Sechs Studien beziehen sich explizit auf die bewässerungsintensive Region Nordost-Niedersachsen, jeweils eine Studie beschäftigt sich mit Nordrhein-Westfalen (Kreins et al. 2015), Bayern (Bernhardt et al., 2022) und Hessen (Potts et al., 2025). Fünf Studien modellieren den Bewässerungsbedarf für Deutschland und zwei Studien auf europäischer Ebene (aus der Beek et al., 2010; Schaldach et al., 2012).

**Zeithorizont:** Für die Vergangenheit reicht die Modellierung des Bewässerungsbedarfs zurück bis 1902 (Drastig et al., 2016a; Drastig et al., 2016b), die Mehrheit der Studien beschränkt sich jedoch auf die nähere Vergangenheit. Projektionen, die allein auf Klimasimulationen beruhen, reichen bis 2100 (Riediger et al., 2014; Kreins et al. 2015; Schulz & Scharun, 2023; Zaun et al., 2024). Projektionen, die auch sozioökonomische Treiber berücksichtigen, beschränken sich in

der Regel auf Zeiträume bis 2050, um den hohen Unsicherheiten zukünftiger Entwicklungen zu begegnen (aus der Beek et al., 2010; Schaldach et al., 2012; Sehn & Blesl 2020).

Mit Ausnahme von Drastig et al. (2016a, 2016b) und McNamara et al. (2024) konzentrieren sich die Studien auf den durchschnittlichen Bewässerungsbedarf unter mittleren klimatischen Bedingungen. McNamara et al. (2024), entstanden im Rahmen des WADKlim-Projekts, untersuchen jedoch auch den Bewässerungsbedarf für ein besonders trockenes Jahr, um Spitzenbedarfe in der landwirtschaftlichen Bewässerung zu ermitteln.

**Szenarien:** Die verwendeten Klimaszenarien basieren auf SRES- (bei früheren Studien, z. B. Riediger et al., 2014; Kreins et al. 2015) oder RCP-Szenarien. Einige Studien verwenden Ensemblesimulationen, um die Bandbreite möglicher klimatischer Veränderungen zu verdeutlichen (Egerer et al. 2023). Sozioökonomische Szenarien basieren auf spezifischen Annahmen oder Szenarienentwicklungsprozessen (Schaldach et al., 2012; Sehn & Blesl 2020). Auch für die Bedarfsprojektion des Wasserversorgungskonzepts Niedersachsen wurden Expert\*innen involviert, um die zukünftige Entwicklung des Bewässerungsbedarfs abzuschätzen (NMUEBK, 2022).

Alle auf Klimaprojektionen basierenden Studien prognostizieren unter Szenarien mit starkem Klimawandel einen steigenden Bewässerungsbedarf in Deutschland. Dieser Anstieg ist besonders in landwirtschaftlich intensiv genutzten Regionen ausgeprägt, die zukünftig stärker von Hitze und Dürre betroffen sein werden (Riediger et al., 2014, 2016; Bernhardt et al., 2022; Schulz und Scharun, 2023; Zaun et al., 2024). Sozioökonomische Faktoren können diesen Trend entweder verstärken oder abschwächen (aus der Beek et al., 2010; Schaldach et al., 2012). Alternativen zur Bewässerung, wie z. B. die Anpassung von Saat- und Erntezeiten, könnten den durch den Klimawandel bedingten Anstieg des Bewässerungsbedarfs mindern (Schaldach et al., 2012).

**Gaps/Methodische Grenzen:** Generell existieren Unsicherheiten, inwiefern die Bewässerungsnachfrage klimatisch getrieben ist, bzw. welche Rollen andere Faktoren spielen. Einfache Extrapolationsansätze haben deshalb nur eine bedingte Aussagekraft über den zukünftigen Berechnungsbedarf. Außerdem treffen die verwendeten Modelle oft Ceteris-Paribus-Annahmen über konstante Landnutzungsmuster, Erträge und bewässerbare Flächen, ohne adaptives Verhalten der Landwirt\*innen zu berücksichtigen, welches der entscheidende Faktor für die landwirtschaftliche Bewässerungsnachfrage ist.

### 2.2.3 Energie

Die Energieversorger haben in Deutschland mit 8,8 Mrd. m<sup>3</sup> (2019) die jährlich höchste Wasserentnahme, die vor allem für die Kühlung bei der Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen verwendet wird. Über 97 % des Wassers bezieht der Sektor dabei aus Oberflächengewässern (Destatis, 2023a). Es wurden insgesamt 18 Studien betrachtet, davon vier, die sich explizit auf Deutschland beziehen.

**Methoden:** Die Bestimmung des Wasserbedarfs des Energiesektors erfolgt weltweit, aber auch bundesweit messdatenbasiert über spezifische Wassernutzungsintensitäten (Flörke et al., 2013; Bormann & Vodegle, 2019). Zukünftige Wasserbedarfe werden über den Strombedarf und die Wassernutzungsintensitäten der verwendeten Energiequelle zur Stromproduktion abgeschätzt.

Im Rahmen des GLOWA-Elbe Projektes wurde am Research Centre Jülich das KASIM Modell entwickelt, welches den Wasserbedarf kurz- und langfristig auf regionaler Ebene simuliert. Das Modell wurde zum Beispiel in Verbindung mit einem Wassertemperatur-Modell für Berlin verwendet (Koch et al., 2012).

Ein weiteres Modell ist das für Alberta in Kanada validierte LEAP-Modell (Long-range Energy Alternatives Planning), welches in Verbindung mit dem WEAP-Modell (Water Evaluation and Planning) zukünftige Wasserbedarfe des Energiesektors abschätzt (Agrawal et al., 2018).

Für Deutschland existieren nur vereinzelt Studien, welche den Wasserbedarf der Wasserstoff-Erzeugung in Beziehung zu den geplanten Ausbauzielen der Bundesregierung setzen (DVGW, 2024). Die Intensitäten werden allerdings von unterschiedlichen Berichten bestätigt (Saravia et al., 2024; Fraunhofer Umsicht, 2024).

**Eingangsdaten/Treiberkräfte:** Für die Bestimmung des Wasserbedarfs wird die Wassernutzungsintensität insbesondere anhand des Kühlsystems und des Energiemixes abgeschätzt (Davies et al., 2013; Terrapon-Pfaff et al., 2020). Für kleinskalige Modelle werden auch Standort und Kapazität der einzelnen Kraftwerke betrachtet (Koch et al., 2012). In KASIM werden zusätzlich Veränderungen des Bruttoinlandproduktes (BIP) und der Bevölkerung berücksichtigt. Modelle, welche den Einfluss der Temperatur auf die Höhe des Wasserbedarfs einbeziehen, benötigen meteorologische Eingangsdaten, wie die Lufttemperatur (Koch et al., 2012; Wada et al., 2016). Der zukünftige Wasserbedarf des Energiesektors ist zum einen von der Entwicklung der Elektrizitätsnachfrage abhängig, zum anderen aber davon, wie die Struktur der Energieversorgung gestaltet wird. Die für die Stromerzeugung benötigte Wassermenge variiert je nach Erzeugungstechnologie und Kühlsystem stark und ist insbesondere von dem Anteil der erneuerbaren Energien und dem geplanten Ausbau der Wasserstoffproduktion abhängig. Bei der Produktion durch Wasser-Elektrolyse werden je nach Kühlsystem kein Wasser (Luftkühlung) oder 45 m<sup>3</sup>/MWh Wasser (Durchlaufkühlung) benötigt. Dazu kommen neun Liter Reinstwasser für die Elektrolyse, welches zur Herstellung weitere Wassermengen benötigt (Saravia et al., 2024; Fraunhofer Umsicht, 2024).

**Geografischer Einzugsbereich:** Der Großteil der Studien zum Wasserbedarf zur Stromproduktion bezieht sich auf die nationale Ebene oder Regionen außerhalb Deutschlands. Im WADKlim Projekt erfolgte die Abschätzung der Kühlwasserentnahme auf der räumlichen Gebietseinheit NUTS-3 (entspricht in Deutschland den Kreisen und kreisfreien Städten). Eine mögliche Übertragbarkeit internationaler großräumiger Studien auf die regionale Ebene in Deutschland muss aufgrund der Unterschiede in der Energieerzeugung und des Energiebedarfs geprüft werden.

**Zeithorizont:** Studien zum Strom- und Wasserbedarf in Deutschland prognostizieren diese bis 2030 und 2050 in Anlehnung an Klimaschutzprogramme bzw. -pläne des Bundes, wie zum Beispiel die Nationale Wasserstoffstrategie. International oder weltweit werden die Bedarfe teilweise bis 2100 abgeschätzt (Bijl et al., 2016; Davies et al., 2013).

**Szenarien:** Die verwendeten Szenarien basieren größtenteils auf politischen Zielen zur Reduktion von Treibhausgasen (Bormann & Vodegle, 2019; Kemmler et al., 2021) oder allgemeinen Aussagen zu Technologieanpassungen und Klimaschutz (Davies et al., 2013; Koch et al., 2012). Der Ausstieg aus der nuklearen Stromerzeugung sowie aus der Stromgewinnung durch die Verbrennung von Kohle bis 2030 bzw. 2038 hat auch Auswirkungen auf die Wassernutzung. Mit zunehmendem Anteil der Stromproduktion aus erneuerbaren Energiequellen ist eine Abnahme der Wasserentnahmen für Kühlzwecke zu erwarten. Wie stark die Abnahme für Kühlwasserbedarfe ausfällt, ist abhängig von den zukünftigen Stromerzeugungstechnologien und variiert mit dem Kühlsystem. Selbst wenn man von einer raschen Dekarbonisierung des Energiesektors ausgeht, bleibt die Entwicklung des zukünftigen Wasserbedarfs für die Stromerzeugung unklar, da unterschiedliche Technologien für erneuerbare Energien und Klimaschutz auch sehr unterschiedliche Wassernutzungsintensitäten aufweisen (Jin et al., 2019). So sollten nach der Fortschreibung der Nationalen

Wasserstoffstrategie aus 2023 bis 2030 Kapazitäten von 10 GW für die Wasser-Elektrolyse geschaffen werden und Gaskraftwerke gebaut werden, die langfristig auch Wasserstoff rückverstromen können (BMWK, 2023). Allein für die Produktion des Wasserstoffs werden so bis zu 1,7 Mrd. m<sup>3</sup> Wasser benötigt (DVGW, 2024).

**Gaps/Methodische Grenzen:** Die Studien betrachten den Wasserbedarf nur vereinzelt auf regionaler Ebene. Negative Auswirkungen und Einschränkungen infolge von Trockenheit und Dürre sind zu erwarten, jedoch wird in den meisten Studien darauf hingewiesen, dass es zu Engpässen bei der Wasserentnahme kommen kann, wenn die Oberflächengewässer aufgrund des Klimawandels nicht genügend Wasser führen. Neben einer eingeschränkten Wasserverfügbarkeit ist auch die Temperatur im Gewässer ein limitierender Faktor, wenn man den Wasserbedarf, der bei der Stromproduktion mit Kühlsystem benötigt wird, berücksichtigt.

Durch den Ausbau der Wasserstoffproduktion ist zudem an einigen Standorten mit vermehrter Wasserentnahme zu rechnen. Studien zu Standorten mit möglicher oder geplanter Wasserstoffgewinnung werden in mehreren Projekten bereits untersucht (Wasserstoff-Kompass, 2024; Fraunhofer Umsicht, 2024), jedoch sind die Kühlsysteme nicht bekannt. Ob und wie die Verstromung von Wasserstoff in den Studien berücksichtigt wird, ist unklar.

Allgemein sind Studien zur zukünftigen Wasserentnahme im Energiesektor kurzlebig, da sich die politischen Rahmenbedingungen schnell ändern können. So prognostiziert eine europäische Studie von 2018 in Deutschland noch eine Erweiterung der Kohleproduktion und -verstromung (Medarac, 2018). Auch die Ausbauziele zur Stromproduktion mit Wasserstoff, wie sie in der Nationalen Wasserstoffstrategie und deren Fortschreibung festgelegt sind, wurden durch das Maßnahmenpaket des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie im September 2025 abgeschwächt und zeitlich verschoben (BMWE, 2025).

#### 2.2.4 Wirtschaft

Der Wirtschaftssektor umfasst das verarbeitende Gewerbe sowie den Bergbau und die Gewinnung von Steinen und Erden. 2019 entnahm der Sektor 5,4 Mrd. m<sup>3</sup> Wasser der Umwelt und bezog zusätzlich 0,86 Mrd. m<sup>3</sup> über die öffentliche Wasserversorgung. Den größten Teil des Wassers wird von der chemischen Industrie verwendet (41,5 %), gefolgt vom Bergbau (24 %) und der Metallindustrie (7 %) (Destatis, 2023a). Während das verarbeitende Gewerbe vor allem Oberflächenwasser zu Kühlzwecken verwendet, leitet der Bergbausektor das zur Trockenlegung der Minen und Tagebaue geförderte Grundwasser ungenutzt in angrenzende Gewässer. Hier wurden 16 Studien untersucht, davon sechs in Deutschland und zusätzliche weitere Hintergrundpapiere. Die Studien betrachten die Wasserentnahme nur vereinzelt spezifisch für den Wirtschaftssektor.

**Methoden:** Für die öffentliche Wasserversorgung wird der Wasserbedarf des Wirtschaftssektors kleinräumig anhand spezifischer Verbräuche abhängig von der Größe der Betriebe (Beschäftigte und Fläche) und des Wirtschaftszweigs abgeschätzt (Pfk Ansbach GmbH, 2019; Liehr et al., 2016).

Der gesamte Bedarf (Eigen- und Fremdversorgung) kann für größere Skalen in Abhängigkeit der Produktionsleistung ermittelt werden, zum Teil differenziert nach Kühl- und Produktionswasser der Wirtschaftszweige (Büringer, 1995). In globalen Modellen wird der Bedarf anhand der Wirtschaftsleistung bzw. der Wertschöpfung der Industrien mit spezifischen Intensitäten simuliert (Bijl et al., 2016; Flörke et al., 2013). Auf Landesebene wurden mit Branchenvertreter\*innen in Arbeitsgruppen zukünftige Bedarfe in einzelnen Wirtschaftsbereichen qualitativ abgeschätzt (NMUEBK, 2022).

Die Wasserentnahme des Bergbausektors wird international anhand spezifischer Wassernutzungsintensitäten je abgebauter Rohstoffmenge am Minenstandort abgeschätzt (Meißner, 2021), eine Prognose zukünftiger Bedarfe erfolgt jedoch nicht. Zudem kann mit der Methode die Grundwasserhaltung nur bedingt berücksichtigt werden.

**Eingangsdaten/Treiberkräfte:** Als Eingangsdaten werden bei den kleinräumlichen Studien die Anzahl der Beschäftigten und/oder die Fläche des Betriebes sowie der Wirtschaftszweig verwendet. In DVWG-Arbeitsblättern finden sich dazu spezifische Bedarfswerte (PfK Ansbach GmbH, 2019). Auf größerer Skala werden die Bruttowertschöpfung des einzelnen Sektors für die Region bzw. das Land verwendet und Intensitäten anhand vergangener Wasserverwendung bestimmt (Bijl et al., 2016; Flörke et al., 2013).

**Geografischer Einzugsbereich:** Der Wasserbedarf wird in der Regel für ein ganzes Land abgeschätzt und nur teilweise auf die regionale Ebene, z. B. NUTS-3, disaggregiert. Die Disaggregation erfolgt über den Wasserbezug der nichtöffentlichen Wasserversorgung, welcher auf NUTS-3 Ebene verfügbar ist. Teilweise erfolgt nach der Modellierung eine individuelle Anpassung, um lokale Ansiedelungen von größeren Unternehmen zu berücksichtigen (z. B. in der WADKlim-Studie).

**Zeithorizont:** Der zukünftige Wasserbedarf des Wirtschaftssektors wird global bis 2050 oder 2100 abgeschätzt (Wada et al., 2016; Bijl et al., 2016). Für Deutschland existieren Studien überwiegend bis 2050 (Uhlmann et al., 2023; NMUEBK, 2022), sowie einige ältere Studien (Hillenbrand et al., 2008).

**Szenarien:** Die Szenarien der Studien sind in der Regel nicht an SSP-Pfade angelehnt, sondern basieren auf vergangenen Trends oder qualitativen Aussagen. Die Arbeitsgruppen im Rahmen des Wasserversorgungskonzepts in Niedersachsen konnten zumindest landesweit jedoch keine einheitlichen Trends ableiten und rechnen mit einem gleichbleibenden Wasserbedarf (NMUEBK, 2022). Das WADKlim-Projekt hingegen verwendete die SSP-Pfade (SSP1, SSP2, SSP3); die Ergebnisse reichen von einem leichten Anstieg (SSP1) bis zur Abnahme (SSP3) der zukünftigen Wasserbedarfe im verarbeitenden Gewerbe.

Durch die Reduktion des Kohlebergbaus und Schaffung von Tagebaurestseen entstehen geringere Abflüsse in den Oberflächengewässern, da geringere Mengen an Grundwasser abgepumpt werden und Wasser für die Füllung der Restlöcher verwendet wird (Uhlmann et al., 2023).

Tendenziell wird für den Wirtschaftssektor eine fortlaufende Reduktion des Wasserbedarfs prognostiziert, da Technologien zur Kreislaufnutzung des (Kühl-)/Produktionswassers verwendet bzw. weiterhin entwickelt werden (DVGW, 2024). Wie lange sich dieser Trend fortführt, ist ungewiss. So schreibt der Verband der Chemischen Industrie von einem Niveau des Wasserverbrauchs in Deutschland „der sich kaum mehr verbessern lässt“ (VCI, 2017, S. 1).

Zudem werden höhere Bedarfe bei der Kühlung von z. B. Rechenzentren erwartet. Bis 2030 wird von einer Rechenleistung in Deutschland von knapp 5000 MW ausgegangen, einer Zunahme um fast 100 %. Die Wassernutzungsintensität liegt in Deutschland größtenteils unter 0,1 L/kWh und bei großen Tech-Firmen weltweit zwischen 0,19 und 0,49 L/kWh (BMWK, 2025). Deutlich höher ist die indirekte Wassernutzung durch den Energiebedarf.

**Gaps/Methodische Grenzen:** Die Studien betrachten den Wasserbedarf der Industrie nur jährlich, sodass die Auswirkungen von Hitzeperioden auf die nötige Bedarfswassermenge nicht festgestellt werden können. Durch ansteigende Effizienz der Wasserverwendung korreliert die Gesamtmenge zudem nicht mit der Wirtschaftsleistung, was durch die Modelle nicht abgebildet

wird. Die Wassermenge, die durch die öffentliche Wasserversorgung abgedeckt wird, kann nicht mit der Wassermenge durch Eigenversorgung gleichgesetzt werden, da diese insbesondere für große Produktionseinheiten und Kühlzwecke verwendet wird.

### 2.2.5 Tourismus

Für den Tourismussektor wurden 10 Studien ausgewertet. Generell ist die Daten- und Studienlage zum Wasserbedarf des Tourismussektors noch recht lückenhaft und es fehlen offizielle Statistiken zum touristischen Wasserbedarf (Gössling et al., 2012), da der Tourismus als Querschnittssektor in Wasserbedarfsanalysen meist nicht explizit berücksichtigt wird. Die meisten der ausgewerteten Studien bilanzieren den Wasserbedarf des Tourismussektors daher basierend auf Schätzungen des Wasserbedarfs pro Gast/pro Übernachtung, und nur drei der Studien (Gössling et al., 2015, Soboll & Dingeldey, und Reintinger et al., 2016) fokussieren sich auf den zukünftigen Wasserbedarf bzw. die Entwicklung der Tourismusnachfrage als wichtigen Einflussfaktor auf den zukünftigen Wasserbedarf.

**Methoden:** Die Kalkulation des Wasserbedarfs erfolgt in den meisten Studien durch die Multiplikation des durchschnittlichen Wasserbedarfs pro Gast/pro Nacht mit der Gesamtzahl der touristischen Übernachtungen (bzw. der Anzahl der internationalen Tourismusankünfte und der durchschnittlichen Reisedauer). Becken (2014) und Gössling et al. (2012) bestimmen so den Wasserbedarf des Tourismus auf nationaler Ebene (zwischen 34,4 und 34,8 Mio. m<sup>3</sup> pro Jahr). Auf europäischer Ebene trägt der Tourismus zu ca. 9 % des jährlichen Wasserverbrauchs im Beherbergungs- und Gaststättengewerbe bei (EEA, 2021). Regional differenzierte Betrachtungen liegen für einige Regionen Deutschlands vor; so haben Klug et al. (2012) den Wasserbedarf des Tourismus und der lokalen Bevölkerung im Alpenraum quantifiziert und das GLOWA-Danube Projekt betrachtete insbesondere das Einzugsgebiet der oberen Donau. Beispielsweise analysieren Sax et al. (2016) den Wasserbedarf verschiedener Tourismusinfrastrukturen basierend auf einer Literaturanalyse und Experteninterviews.

Zur zukünftigen Entwicklung des Wasserbedarfs auf nationaler Ebene gibt es noch keine Studien. Auf globaler Ebene projizieren Gössling & Peeters (2015) unter Annahme eines Business-as-usual-Szenarios eine Verdoppelung des Wasserbedarfs zwischen 2010 und 2050, was vor allem auf den Anstieg des indirekten Wasserbedarfs zurückzuführen ist. Ein wichtiger Einflussfaktor auf den zukünftigen Wasserbedarf ist die Entwicklung der Tourismusankünfte. Hierzu liefern Reintinger et al. (2016) und Soboll & Dingeldey (2011) hilfreiche Beiträge. Beide Studien nutzen agentenbasierte Modellierung als Grundlage für die Analyse der zukünftigen Entwicklung der Tourismusnachfrage.

**Eingangsdaten/Treiberkräfte:** Die meisten Studien, die den Wasserbedarf quantitativ bestimmen, beruhen auf Tourismusstatistiken (Gästekünfte und Übernachtungen) und dem durchschnittlichen Wasserbedarf pro Gast/Nacht, wozu es abweichende Schätzungen in der Literatur gibt (zwischen 90 bis 900 l, durchschnittlich wird von einem Wasserbedarf von 200 l pro Gast pro Nacht ausgegangen (Gössling et al., 2012)). Dabei ist es auch entscheidend, ob der indirekte Wasserbedarf miteinbezogen wird oder nicht. Zur zukünftigen Entwicklung des Wasserbedarfs gibt es bislang keine spezifischen Studien, jedoch gibt es Studien zur zukünftigen Entwicklung der Tourismusnachfrage, die auf agentenbasierter Modellierung beruhen. Dabei wurden bei Reintinger et al. (2016) verschiedene Einflussfaktoren berücksichtigt, die durch eine Delphi-Studie ausgewählt wurden, während sich Soboll & Dingeldey (2011) primär auf den Einfluss des Klimawandels auf die Nachfrage konzentrierten.

**Geographischer Einzugsbereich:** Die meisten der analysierten Studien zum Wasserbedarf des Tourismus beziehen sich auf die nationale oder internationale Ebene, wodurch regionale

Unterschiede und Besonderheiten nicht berücksichtigt werden können. Einige Studien fokussieren sich auf den Wasserbedarf auf regionaler Ebene (z. B. Klug et al. (2012) für den Alpenraum oder Sax et al. (2016) für das Einzugsgebiet der oberen Donau).

**Zeithorizont:** Der Großteil der Studien nutzt statistische Daten zur Bestimmung des Wasserbedarfs, die je nach Aktualität der Studie bis ins Jahr 2000 zurückreichen. Zum Beispiel analysieren Klug et al. (2012) die Veränderung des Wasserbedarfs zwischen 2005 und 2010. Studien zur zukünftigen Entwicklung des Tourismus beziehen sich eher auf die nahe bis mittlere Zukunft, da die Entwicklungen in der fernen Zukunft aufgrund der multiplen Einflussfaktoren großen Unsicherheiten unterliegen. Daher modellieren Gössling & Peeters (2015) den zukünftigen Wasserbedarf bis 2050 und auch die Studie zur zukünftigen Nachfrageentwicklung im alpinen Wintertourismus von Soboll & Dingeldey (2011) beschränkt sich auf die Analyse der nächsten 50 Jahre, während sich Reintinger et al. (2016) auf den Zeitraum von 2011 bis 2030 fokussieren.

**Szenarien:** Reintinger et al. (2016) stützen die Modellierung der zukünftigen Tourismusedwicklung auf das A1B Szenario des IPCC und entwickeln darüber hinaus verschiedene Szenarien in einer Delphi-Studie, welche die gesellschaftlichen Rahmenbedingungen berücksichtigen. Bei Gössling & Peeters (2015) bilden ökonomische Faktoren sowie das Bevölkerungswachstum die Grundlage für die Modellierung des Ressourcenbedarfs des Tourismus, woraus drei verschiedene Szenarien abgeleitet wurden. Daten zur zukünftigen ökonomischen Entwicklung basieren auf den IPCC-SRES-Szenarios. In der Studie von Soboll & Dingeldey (2011) wurden verschiedene klimatische und gesellschaftliche Szenarien miteinander kombiniert.

**Gaps/Methodische Grenzen:** Die Studien beziehen sich meist auf den Bedarf pro Jahr, wodurch saisonale Schwankungen des Wasserbedarfs nicht erfasst werden (die meisten Tourismusaktivitäten konzentrieren sich auf den Sommer), was insbes. vor dem Hintergrund des erhöhten Wasserbedarfs für z. B. landwirtschaftliche Bewässerung relevant ist (EEA, 2021). Studien zum Wasserbedarf auf nationaler Ebene vernachlässigen die bestehenden räumlichen Unterschiede (die sogar innerhalb einer Region erheblich sein können, siehe z. B. Klug et al., 2012). Grundsätzlich mangelt es noch an disaggregierten statistischen Daten, um den Wasserverbrauch des Tourismus genau zu quantifizieren (Gössling et al., 2015a). Zudem unterscheiden sich die Annahmen zum Wasserbedarf des Tourismus, je nachdem, ob nur der direkte Wasserbedarf (z. B. Unterkunft) oder auch der indirekte Wasserbedarf (z. B. für Lebensmittelproduktion, Transport, etc.) berücksichtigt wird. Der durchschnittliche Wasserbedarf ist auch je nach Unterkunftstyp sehr unterschiedlich, was bei der Bestimmung des derzeitigen und zukünftigen Wasserbedarfs berücksichtigt werden sollte (Klug et al., 2012). Wichtig ist außerdem, wie Tourismus definiert wird. Studien wie Becken (2014) berücksichtigen beispielsweise nur internationale Tourismusankünfte, nicht jedoch den inländischen Tourismus.

## 2.2.6 Ökosysteme/ökologischer Mindestabfluss

Der ökologische Wasserbedarf beschreibt den notwendigen Mindestwasserabfluss für den Erhalt von Makrozoobenthos und Fischfauna in Gewässern. Insbesondere bei Dürren steht die Sicherstellung eines Mindestabflusses in Konflikt mit der Wasserentnahme für Gewerbe, Energieerzeugung, Bewässerung und Trinkwasserversorgung. Bei der Betrachtung des ökologischen Mindestabflusses muss ebenfalls der Grundwasserstand bzw. die Neubildung mit einbezogen werden. Oberflächennahe Grundwasservorkommen versorgen Pflanzen mit Wasser und bilden Feuchtbiotope wie z. B. Niedermoore. Zudem können Fließgewässer in regenarmen Phasen zu einem großen Teil aus ausgetretenem Grundwasser bestehen.

**Methoden:** Der Mindestabfluss kann hydrologisch als Anteil des mittleren Abflusses (MQ) geschätzt werden, wie es sowohl in globalen Studien (Smakhtin et al., 2004) als auch in Untersuchungen einzelner Gewässer (Sarzaeim et al., 2017) durchgeführt wurde. In Deutschland wurde anhand des Verhältnisses von dem mittleren Niedrigwasserabfluss (MNQ) und dem MQ, sowie dem Spendenwert des Einzugsgebietes für verschiedene Fallgruppen und Gewässertypen Empfehlungen zu ökologischen Mindestwasserorientierungswerten veröffentlicht (LAWA, 2019), welche von einigen Bundesländern zur Auslegung des Mindestabflusses verwendet werden (z. B. Land Brandenburg, 2019). In einzelnen Fällen wird der Basisabfluss als Grundlage für den ökologischen Mindestabfluss in anthropogen beeinflussten Einzugsgebieten verwendet, welcher anhand historischer Abflussganglinien vom Gesamtabfluss separiert wurde (Wenzel et al., 2021).

Eine ganzheitliche Betrachtung, welche zusätzlich die Habitatfunktion der Fließgewässer betrachtet, hat weitere Anforderungen an Durchgängigkeit, Wassertiefe und Leitströmung und kann nur in einer Einzelfallbetrachtung erfolgen (LUBW, 2019). Alternativ kann der Mindestabfluss auch über die hydraulischen Verhältnisse im Gewässer definiert werden, also der Fließgeschwindigkeit und den Flussquerschnitt (Pastor et al., 2014).

Der Grundwasserstand bzw. die Neubildungsrate wird mit Bodenwasserhaushaltsmodellen bzw. hydrologischen Modellen oder multipler linearer Regression bestimmt (Johannes et al., 2023; DVGW, 2024).

Die Auswirkungen von wiederhergestellten Feuchtgebieten auf den Abfluss wurden unter anderem im Rahmen des Wetlands-Projekts mit dem SWAT+-Modell simuliert. Die Modellergebnisse zeigen durch die Pufferwirkung der Moore einen Rückgang der Wahrscheinlichkeit von Hoch- und Niedrigwasserabflüssen (Waterloo et al., 2019).

**Eingangsdaten/Treiberkräfte:** Die hydrologische Betrachtung benötigt zur Abschätzung der Mindestwasserführung vergangene Abflusswerte und für die zukünftige Betrachtung meteorologische Daten wie Niederschlag und Temperatur in dem Einzugsgebiet (Smakhtin et al., 2004; Sarzaeim et al., 2017). Die Einzelfallbetrachtung mit Prüfung der Habitatfunktion erfolgt vor Ort (LUBW, 2019). Auch die Modelle bzw. Regression zur Simulation zukünftiger und aktueller Grundwasserneubildung verwenden meteorologische Daten, insbesondere Niederschlag und Verdunstung. Zur Kalibrierung und Validierung werden historische Grundwasserstände herangezogen (Johannes et al., 2023).

**Geographischer Einzugsbereich:** In den untersuchten Studien wird der ökologische Mindestabfluss in der Regel für ein Einzugsgebiet/Gewässer betrachtet. Die Bestimmung der Habitatfunktion oder Verwendung von hydraulischen Kennwerten für den Mindestabfluss unterliegen lokalen Anforderungen an den Gewässerabschnitt und sind dementsprechend nicht für großskalige Untersuchungen geeignet. Die Studie des Landes Niedersachsen ermittelt die zukünftigen Grundwasserstände für die vorhandenen Messstellen; eine Extrapolation auf das gesamte Land erfolgt nicht (Johannes et al., 2023).

**Zeithorizont:** Der größte Teil der Studien befasst sich mit den aktuellen ökologischen Wasserbedarfen, um die Anforderungen an den Abfluss darzustellen. International wurde der Bedarf zum Teil bis 2059 abgeschätzt (Sarzaeim et al., 2017). Abschätzungen über die Veränderungen im gesamten Wasserhaushalt erfolgen in Anlehnung an die Klimaprojektionen bis 2100 (Johannes et al., 2023; Riedel et al., 2021).

**Szenarien:** Die zukünftigen Bedarfe werden allgemein anhand der RCP-Szenarien oder – bei älteren Veröffentlichungen – der SRES-Szenarien abgeschätzt (Sarzaeim et al., 2017; Johannes, 2023; Riedel, 2021). Die Auswirkungen der Klimaveränderung in Deutschland auf die

Grundwasserneubildung zeigen keinen einheitlichen Trend. In Süddeutschland rechnen die Modelle mit einer Stagnation der jährlichen Neubildung, aber einer Verschiebung in die Wintermonate. Im Norden und Osten Deutschlands ist für einzelne Regionen eine deutliche Abnahme zu beobachten (Riedel et al., 2021).

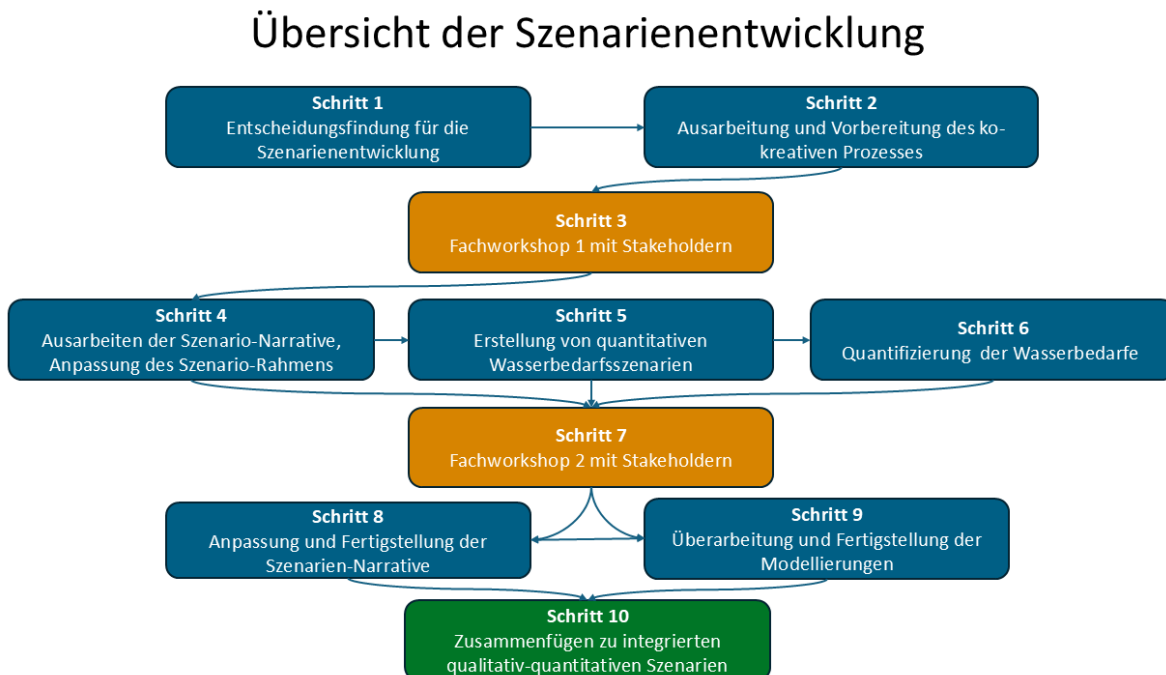
Die Neubildungsrate von Grundwasser kann langfristig durch den Erhalt und Entwicklung von Mischwäldern und Feuchtgebieten erhöht werden. Umgekehrt verringert sich diese bei Verlust von Waldflächen durch Dürre und Trockenheit (TMUEN, 2022).

**Gaps/Methodische Grenzen:** Die potenziellen Auswirkungen von langanhaltender Dürren, die im Zuge des Klimawandels an Häufigkeit und Intensität zunehmen können, werden in den Studien nicht ausreichend untersucht; schon in den letzten Jahren musste zum Beispiel der Ruhrverband den geforderten Mindestabfluss unterschreiten, um den Talsperrenbetrieb sicherzustellen (Ruhrverband, 2023). Die Folgen dieser zeitweisen Unterschreitung auf die lokale Flora und Fauna werden ebenfalls nicht hinreichend untersucht. Die Wiederherstellung von Feuchtgebieten hat Auswirkungen auf den Abfluss und die Grundwasserneubildung, welche in hohem Maße von den lokalen Gegebenheiten abhängen und daher eine regionale Betrachtung erfordern.

### 2.3 Herangehensweise zur Entwicklung der qualitativen Szenarien-Narrative

Das im Rahmen dieses Vorhabens angewendete methodische Vorgehen zur partizipatorischen Entwicklung von qualitativen Wasserbedarfsszenarien / Szenarien-Narrativen wurde wie folgt aufgebaut.

Abbildung 3: Übersicht der Szenarientwicklung



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

### 2.3.1 Schritt 1: Entscheidungsfindung für die Szenarioentwicklung

Zunächst wurden verschiedene Optionen für eine Szenarioentwicklung zusammengefasst und mit dem Auftraggeber erörtert. Zu den Optionen zählten, die allgemeinen weltweiten SSP-Szenarien (*Shared Socioeconomic Pathways*, SSPs) für Deutschland zu entwickeln („*downscaling*“) bzw. auf die drei nationalen Szenarien zurückzugreifen, die von Lutz et al. (2019) entwickelt wurden. Die SSP-Szenarien müssen dann für Deutschland entwickelt und für die sektoralen Wasserbedarfe spezifiziert werden, da die weltweiten SSPs auf den Klimawandel und nicht auf „Wasser“ fokussieren. Eine weitere Option war es, IPCC-kompatibel qualitative Szenariennarrative zu nutzen, die für Deutschland in anderen Projekten entwickelt worden sind.

Hier wurden die im Rahmen des Projekts STEPSEC 2022-2023 für Deutschland entwickelten SSP-Narrative zur CO<sub>2</sub>-Entnahme aus der Atmosphäre betrachtet. Im STEPSEC Projekt zeigte sich, dass die nun mehr als 10 Jahre alten SSPs inzwischen Defizite aufweisen, da sie einige in der Zukunftsabschätzung auf heutiger Basis wichtige Unsicherheiten unzureichend abdecken. Im STEPSEC-Prozess konnte dies für die auf Deutschland bezogenen Szenarien durch den Entwicklungsprozess auf Basis der SSPs behoben werden. Neue weltweite SSPs sind derzeit nicht in Sichtweite. Andere bestehende Szenariorahmen, wie der des IPBES (*Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Service*), sind als alternative strategische Handlungsstränge (*target-seeking*) angelegt und eignen sich nicht als Grundlage für explorativ-kontextuelle qualitative Szenarien.

Als beste Option stellte sich die Entwicklung von qualitativen Wasserbedarf- und deutschlandbezogenen Szenariennarrativen heraus, da diese die komplexen Unsicherheitsdynamiken von heute mit Zwischenschritt(en) bis 2100 abdecken und direkten Anschluss an den RCP/SSP-Szenario-Rahmen haben. Der Prozess des *Downscalings* der weltweiten SSPs und deren Verbindung mit der Modellierung ist wissenschaftlich unterbaut und beschrieben siehe: Gramberger et al 2014, Kok et al 2014, Kok et al 2019, Pedde et al 2020. Die Integration eines ko-kreativen Prozesses mit Stakeholdern ist Teil dieses Ansatzes. Methodisch verstärkt dies die Erfassung wichtiger Faktoren und Dynamiken in der qualitativen und quantitativen Szenariomentwicklung. Die Einbeziehung der Stakeholder erhöht die Relevanz der entwickelten Szenarien und katalysiert die Bereitschaft zu deren späteren Nutzung. Der ko-kreative Ansatz folgt dabei dem Prinzip der *Stakeholder-Integrierten Forschung* (Stakeholder-Integrated Research, STIR; Gramberger et al 2014).

Wichtig ist hierbei zudem, dass mit dem IPCC-Szenario-Rahmen eine Entscheidung für explorative Szenarien getroffen wurde – und nicht für Strategiebeschreibungen. Die explorativen Szenarien beschreiben mögliche kontextuelle Entwicklungen mit Auswirkungen auf den Wasserbedarf – nicht jedoch, wie auf diese mit Maßnahmen reagiert werden könnte. Letzteres ist ein wichtiger, gesonderter Schritt, der nicht in diesem Projekt abgedeckt werden kann und außerhalb des hier beschriebenen Projektes genommen werden sollte.

Die Entscheidung wurde in zahlreichen Diskussionen mit dem Auftraggeber getroffen und gilt als Ausgangsbasis für die nächsten Schritte.

### 2.3.2 Schritt 2: Ausarbeitung und Vorbereitung des ko-kreativen Prozesses

Nach der Entscheidungsfindung wurde der ko-kreative Prozess in Abstimmung mit dem Auftraggeber ausgearbeitet und vorbereitet. Die Stakeholderbeteiligung sollte durch zwei Fachworkshops erfolgen. Die Prozessentwicklung umfasste die Vorbereitung eines detaillierten Ablaufs der Fachworkshops, der professionellen Moderation und der inhaltlichen Eingaben.

Grundlage waren hierzu ferner umfangreiche Abstimmungen zwischen den Partnern im Team zwecks Verzahnung der qualitativen und quantitativen Szenarientwicklung.

**Wichtig ist zu beachten, dass Szenarien keine Politikstrategien und/oder keine Zuordnung von Wünschbarkeit sind, stattdessen kontextuelle Beschreibung möglicher Zukünfte als Grundlage für die Strategieplanung.**

Als Basis für die Szenarientwicklung dienten die kurzen weltweiten SSP-Szenario-Narrative (O'Neill et al 2015), und der dazugehörige SSP-Szenario-Rahmen, jeweils ins Deutsche übersetzt. Dabei konzentrierte sich die Vorbereitung auf die SSPs 1, 3, 4 und 5 (siehe Hintergrund-Kapitel). Zusätzlich wurden eine Reihe von veröffentlichten Zukunftsstudien im Hinblick auf identifizierte Einflussfaktoren für die zukünftige Entwicklung ausgewertet und als Eingabe für den Fachworkshop vorbereitet.

Für die ko-kreativen Fachworkshops<sup>23</sup> wurden Teilnehmende aus folgenden Sektoren eingeladen:

- ▶ Wasserwirtschaft und Sektoren der Wassernutzung mit thematischem Bezug zum Vorhaben.
- ▶ Haushalte
- ▶ Landwirtschaft
- ▶ Energie
- ▶ Industrie
- ▶ Tourismus
- ▶ Ökologie

In folgenden Einrichtungen wurden jeweils Expert\*Innen mit wasserwirtschaftlichem Bezug adressiert:

- ▶ UBA
- ▶ Ministerien und anderer Fachagenturen auf Bundesebene
- ▶ Länderübergreifende Gremien, Ministerien und Fachagenturen der Länder
- ▶ Zivilgesellschaftliche Organisationen
- ▶ Wissenschaft
- ▶ Verbände

Die Auswahl einzelner Teilnehmer\*innen erfolgte im direkten Austausch mit dem UBA. Eine Liste mit teilnehmenden Organisationen findet sich in Anlage C. Trotz Einladungen war die Anzahl von Vertreter\*innen der Industrie, der Landwirtschaft und des Naturschutzes in den Fachworkshops begrenzt; Tourismus war nicht vertreten.

---

<sup>23</sup> <https://workshop-wasserbedarfe-2.fresh-thoughts.eu/materials/>

### 2.3.3 Schritt 3: Fachworkshop 1 mit Stakeholdern

Beim ersten Fachworkshop am 1. und 2. April 2025 in Berlin erarbeiteten die 40 Teilnehmenden in einem professionell moderierten ko-kreativen Prozessablauf schrittweise erste Ansätze zu qualitativen Zukunfts-Szenarien für Wasserbedarf in Deutschland - dies in Verbindung mit dem RCP/SSP-Szenario-Rahmen. Hierbei gingen die Teilnehmenden von der derzeitigen Wasserbedarfssituation in Deutschland aus und identifizierten Unsicherheiten und deren Ausprägungen für die zukünftige Entwicklung. Diese Ergebnisse wurden mit dem SSP-Rahmen zusammengebracht und darin verortet. Der Abgleich mit den in anderen Zukunftsstudien identifizierten Einflussfaktoren (siehe Vorbereitung in Schritt 2) führte zu keinen daraus folgenden Ergänzungen.

In weiteren Arbeitsschritten im Plenum und Kleingruppen wurden Narrativ-Elemente für die Entwicklung des zukünftigen Wasserbedarfs in Deutschland gemeinsam erarbeitet. Dabei wurden die globalen SSP-Narrative auf Deutschland skaliert und für wasserbedarfsrelevante Entwicklungen spezifiziert. Ein zentraler Teil des Fachworkshops war zudem das Erstellen spezifischer Eingaben für die Quantifizierung des Wasserbedarfs auf Basis der entwickelten Szenarien-Ansätze. Die Teilnehmenden interpretierten die nun in Rohform vorliegenden, auf Deutschland skalierten Narrative und beschrieben die Wasserbedarfsentwicklungen für verschiedene Sektoren. Hierbei stand der Austausch mit dem Modellierungsteam des Projektes im Mittelpunkt.

### 2.3.4 Schritt 4: Ausarbeiten der Szenario-Narrative, Anpassung des Szenario-Rahmens

Im Anschluss an den ersten Fachworkshop wurden die Szenario-Narrative entlang der im ko-kreativen Prozess entwickelten Elemente ausgearbeitet. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Elemente Szenario-kompatibel waren. Um Plausibilität und Verständnis der Narrative zu unterstützen, wurde den Szenarien eine zusammenfassende Entwicklungslogik des Szenarios beigefügt und vorangestellt und diese im Narrativ genutzt. Die Wasserbedarfsannahmen, die die Teilnehmenden den Szenario-Narrativen zugeordnet hatten, wurden dem Modellierungsteam mit den Narrativen zur Verfügung gestellt.

Bei den Szenario-Narrativen handelt es sich, wie erläutert, um explorative, kontextuelle Beschreibungen zum Wasserbedarf in möglichen Zukünften. Darum wurden Politikmaßnahmen nur dann aufgenommen, wenn sie den Wasserbedarf nicht direkt, sondern nur indirekt/kontextuell betreffen (Beispiel: *Eindämmung Fleischkonsum, Aufrüstung Deutschlands*) und nicht selbst strategische Maßnahmen zum Wasserbedarf sind (Beispiel: *Staat führt bundesweite Wasserhandelsplattform ein*). Letztere Maßnahmen sind außerordentlich wichtig – die Szenarien bieten nach Fertigstellung eine ausgezeichnete Grundlage zur Entwicklung und Einschätzung der Wirksamkeit dieser strategischen Maßnahmen.

In Anlehnung an O'Neill et al. (2014, 2015) wurde mit der Ausarbeitung der Szenarien-Narrative auch der SSP-Szenario-Rahmen für die deutschen Wasserbedarfsszenarien neu betrachtet. Dabei wurden zwei Arten von Änderungen vorgenommen: Erstens wurden die Szenarien von A23 mit neuen Namen versehen, die zugleich mit den weltweiten SSPs kompatibel sind. Diese neuen Namen sind auf Deutschland und Wasserbedarf bezogen und resultieren aus den jeweiligen entwickelten Szenario-Narrativen. Dies erleichtert somit den Zugang zu und die Verständlichkeit der beschriebenen Wasserbedarfs-Zukünfte. Zweitens wurden die Achsen des SSP-Szenario-Rahmens mit neuen Bezeichnungen versehen, die zugleich mit dem weltweiten SSP-Szenario-Rahmen kompatibel sind. Diese neuen Achsenbezeichnungen sind auf Wasserbedarf bezogen und resultieren ebenso aus den jeweiligen entwickelten Szenario-Narrativen. Auch hier wird

durch die Neubezeichnung der Zugang zu und die Verständlichkeit der beschriebenen Wasserbedarfs-Zukünfte erleichtert.

Die weiter ausgearbeiteten Narrative sowie Anpassungen wurden den Stakeholdern im 2. Fachworkshop vorgestellt und zur Diskussion gestellt (siehe Schritt 7).

### **2.3.5 Schritt 5: Erstellung von quantitativen Wasserbedarfsszenarien**

Nach dem ersten Fachworkshop wurden in einer ersten Modellierungsrunde die zukünftigen Wasserbedarfe in Deutschland und pro Sektor für die erstellten Szenarien projiziert. Dazu wurden verschiedene Methoden und Modelle genutzt, die im folgenden Kapitel 2.3.6 genauer beschrieben werden. Die Wasserbedarfsprojektionen basieren zum einen auf bereits quantifizierten und herunterskalierten globalen SSP-Szenariotreibern wie z. B. die Bevölkerungsentwicklung, zum anderen flossen zusätzliche Annahmen aus den Fachworkshops ein. Zur Berücksichtigung von Klimawandeleffekten wurde jedes SSP mit einem RCP-Szenario verknüpft, welches dem jeweiligen Narrativ entspricht (O'Neill et al., 2020):

- ▶ SSP1 mit RCP2.6;
- ▶ SSP3 mit RCP8.5;
- ▶ SSP4 mit RCP4.5; und
- ▶ SSP5 mit RCP8.5.

### **2.3.6 Schritt 6: Quantifizierung der Wasserbedarfe**

Die Vorgehensweise im Schritt 6 wird ausführlich weiter unten im Kapitel 3 dargelegt. Die zwischenzeitlichen Ergebnisse wurden den Teilnehmenden im Fachworkshop 2 (Schritt 7) vorgelegt und ihnen erörtert.

#### **2.3.6.1 Haushalte (inkl. Kleingewerbe und Tourismus)**

Der Wasserbedarf des Haushaltssektors beinhaltet sowohl Kleingewerbe als auch Tourismus und wird durch die öffentliche Wasserversorgung abgedeckt. Die Quantifizierung des Wasserbedarfs erfolgt jährlich auf der NUTS-3-Ebene und ist insbesondere von zwei Faktoren abhängig: der Bevölkerungsentwicklung und der Wassernutzungsintensität, also dem Wasserbedarf pro Tag und Einwohner. Die zukünftige Entwicklung der Intensität wird durch die im partizipatorischen Prozess entwickelten Szenario-Narrative als prozentuale Änderungen quantifiziert. So können unter anderem Effizienzsteigerungen durch mögliche technologische Fortschritte, Verluste und Verhaltensänderungen berücksichtigt werden. An Tagen mit höheren Temperaturen besteht zudem ein erhöhter Wasserbedarf (Simon et al., 2019), welcher auch auf die Jahressumme einen Einfluss haben kann. Sommertage mit Temperaturen über 25 °C und heiße Tage mit Temperaturen über 30 °C haben einen signifikanten Einfluss auf die häusliche Wassernutzung. Bei höheren Tagestemperaturen steigt der Flüssigkeitsbedarf, was zu einer erhöhten Trinkwassernutzung führt. Zudem wird häufiger geduscht oder gebadet, um sich abzukühlen. Vermehrte Poolnutzungen und Poolbefüllungen, aber auch die Bewässerung von Gartenpflanzen und Rasenflächen führen zu steigenden Wasserbedarfen. Anhand täglicher Trinkwasserproduktionsmengen eines Wasserversorgungsunternehmens in Nordrhein-Westfalen, das sowohl urbane als auch rurale Versorgungsgebiete versorgt, wurden Mehrbedarfe an Sommertagen (Tageshöchsttemperatur > 25 °C) und heißen Tagen (> 30 °C) von 15 % bzw. 30 % abgeschätzt (Abbildung 5). Als Ausgangspunkt für die Änderungen wurden die Wasserbedarfe für das Jahr 2022 auf NUTS3-Ebene verwendet (Statistisches Bundesamt,

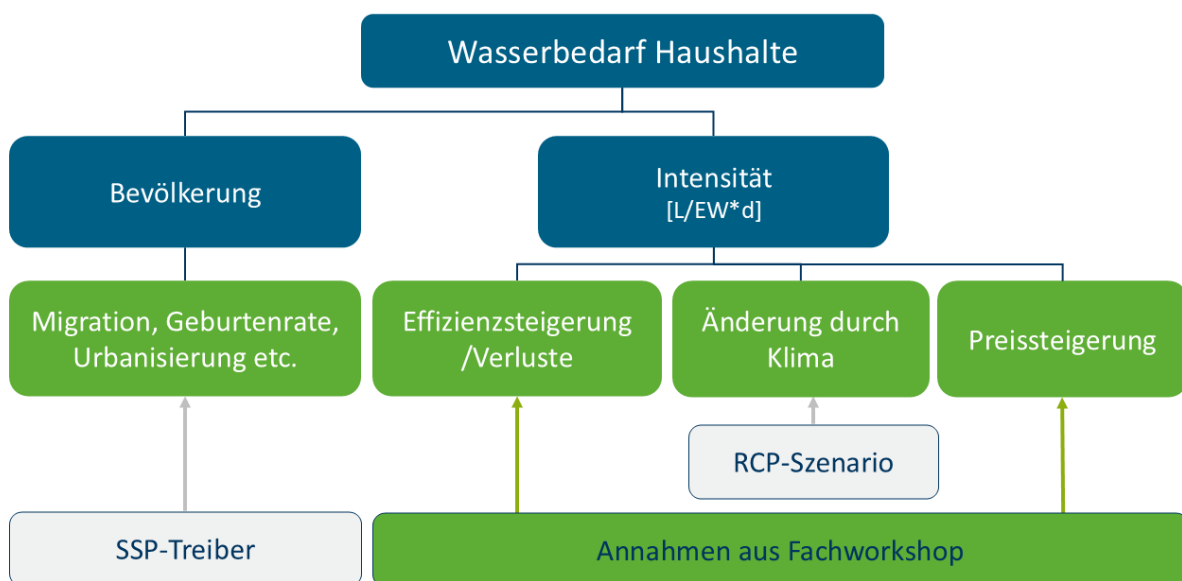
2025b). Die Auswertung der historischen Daten über 20 Jahre zeigt, dass die Verbrauchsniveaus der einzelnen Kreise trotz großer Unterschiede (80–170 L/EW·d) langfristig stabil sind und keine Angleichung an einen gemeinsamen Mittelwert stattfindet.

Steigerungen der Wasserpreise sind bedingt durch höhere Kosten für Infrastruktur, Aufbereitung (z. B. durch Klimawandelanforderungen) und Personal, was zu regional unterschiedlichen Erhöhungen bei Grund- und Mengenpreisen führt. Historische Entwicklungen zeigen für Deutschland eine geringe negative Preiselastizität (-0,34 bis -0,23), wodurch die Nachfragereaktion entsprechend marginal ausfällt (Förster, 2014).

Abbildung 4 gibt einen Überblick über die Methode zur Quantifizierung des Wasserbedarfs im Haushaltssektor. Die Bevölkerungsanzahl wurde aus gerasterten Projektionen (Jones und O’Neill, 2016; Gao, 2017, 2020) für die einzelnen Szenarien auf NUTS3-Ebene aggregiert. Die Projektionen basieren auf den globalen SSP-Szenarien und berücksichtigen unter anderem Migrationsbewegungen, Urbanisierung, Fertilität und Lebenserwartung. Um zu Beginn des Modellierungszeitraums Unterschiede zwischen den erhobenen Daten des Statistischen Bundesamtes und den Szenarien zu vermeiden, wurden die Szenarien angepasst. Dadurch wurde sichergestellt, dass die Bevölkerungszahlen aus den Szenarien für das Jahr 2022 mit den Zahlen des Statistischen Bundesamtes übereinstimmen.

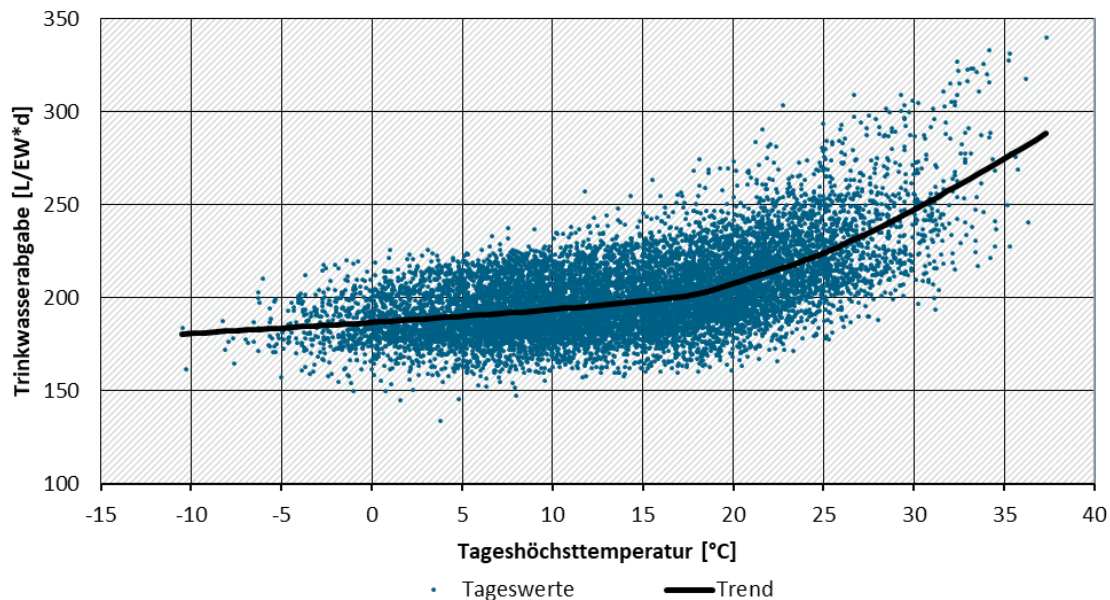
Änderungen in der zukünftigen Wasserbedarfsintensität (in Liter pro Einwohner und Tag) ergeben sich aus Effizienzsteigerungen oder Verlusten, klimatischen Änderungen und Preissteigerungen. Die Teilnehmenden der Fachworkshops haben Annahmen zu zukünftigen Effizienzsteigerungen bzw. -verlusten sowie zu Preissteigerungen erarbeitet. Während die Annahmen zu den Effizienzsteigerungen bzw. -verlusten quantifiziert wurden, wurden die Preissteigerungen lediglich qualitativ im Narrativ berücksichtigt. Die Anzahl zukünftiger Sommer- und heißer Tage wurde dem jeweiligen verknüpften Klimamodellensemble (2.3.5) aus Heilemann et al. (2024) entnommen.

**Abbildung 4: Methodik zur Quantifizierung der Wasserbedarfe im Haushaltssektor**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

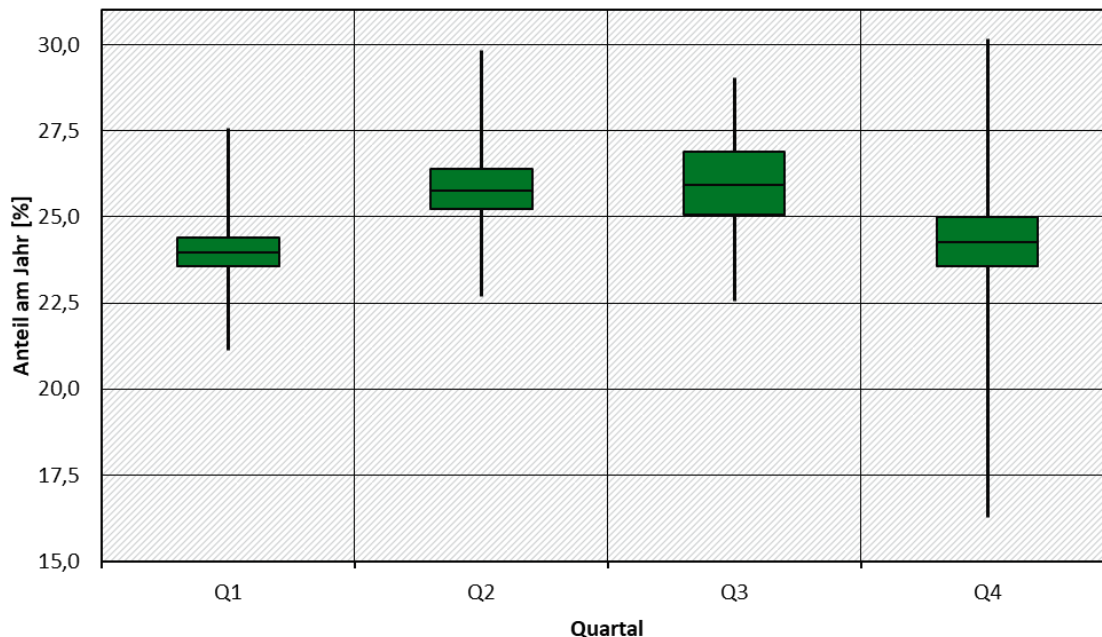
**Abbildung 5: Trinkwasserabgabe in Abhängigkeit der Tageshöchsttemperatur (eigene Darstellung, Daten aus Diemel, 2024)**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

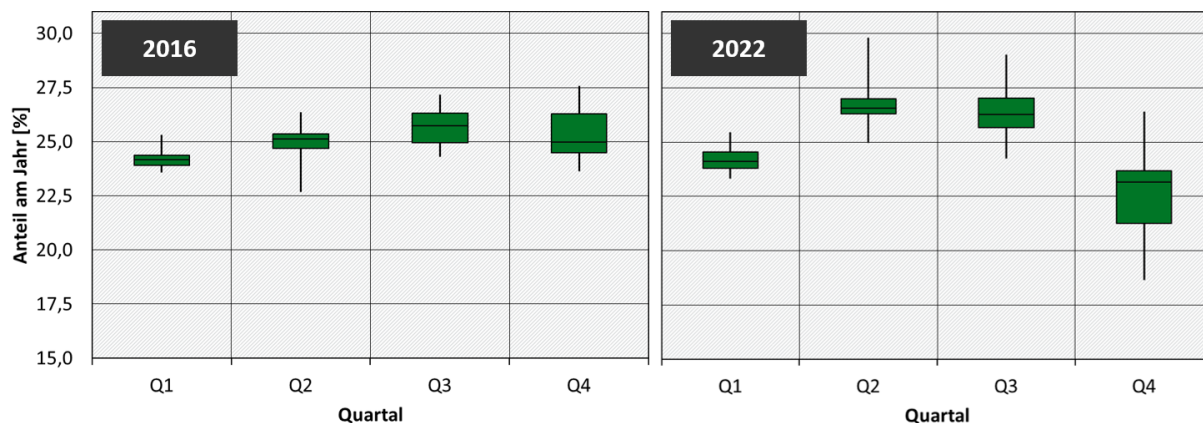
Aufgrund der verfügbaren Datengrundlage wurde der zukünftige Wasserbedarf des Haushaltssektors pro Jahr quantifiziert. Die Abschätzung unterjähriger Wasserbedarfe (d.h. pro Quartal), die insbesondere in trockenen und Dürreperioden von Bedeutung ist, erfolgt auf Basis statistischer Auswertungen des Bundesverbands der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW). Mit diesem Ansatz können für Deutschland erste Abschätzungen für saisonale Änderungen zukünftiger Wasserbedarfe im Haushaltssektor beschrieben werden (Abbildung 6). Die vom BDEW zur Verfügung gestellten Daten erfassen die Wasserabgabe der Bundesländer (außer Stadtstaaten) in den Jahren 2016 bis 2024 und wurden quartalsweise bereitgestellt. Die Darstellung der Wasserbedarfe zeigt einen deutlichen Trend über das Jahr hinweg (Abbildung 7). Es wird deutlich, dass die Wasserabgabe im Sommerhalbjahr (Q2 und Q3) im Median jeweils etwa 8% (2 Prozentpunkte) höher ist als im Winterhalbjahr (Q4 und Q1). In sehr warmen Jahren mit geringem Niederschlag (z.B. im Jahr 2022) wird der Unterschied noch größer, während dieser in eher durchschnittlichen Jahren sinkt (z.B. im Jahr 2016, Abbildung 7). Die einzelnen Ausreißer können durch fehlerhafte Werte und regional unterschiedliche (Wetter-)Bedingungen erklärt werden.

**Abbildung 6: Wasserabgabe an Haushalte je Quartal als Anteil am jeweiligen Jahreswert für alle Bundesländer (außer Stadtstaaten) für die Jahre 2016 bis 2024 (eigene Darstellung, Daten des BDEW)**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

**Abbildung 7: Vergleich der quartalsweisen Wasserabgabe an Haushalte 2016 und 2022 für alle Bundesländer (außer Stadtstaaten) (eigene Darstellung, Daten des BDEW)**



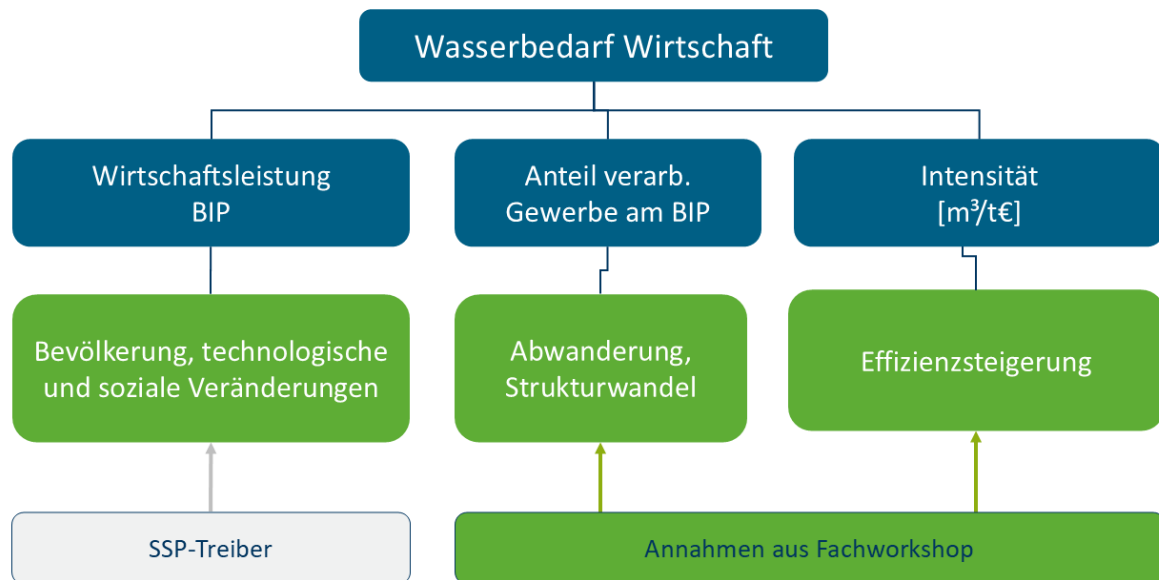
Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

### 2.3.6.2 Wirtschaft

Für den Wirtschaftssektor wird der Wasserbedarf des verarbeitenden Gewerbes in Betracht gezogen, da dieser den maßgeblichen Anteil an der Wassernutzung hat. Die Berechnung des Wasserbedarfs erfolgt jährlich auf NUTS-3-Ebene anhand der spezifischen Wassernutzungsintensität und der Wirtschaftsleistung des verarbeiteten Gewerbes (Abbildung 8). Die Wirtschaftsleistung, gemessen am Bruttoinlandsprodukt (BIP), wurde aus rasterbasierten SSP-Projektionen (Wang & Sun, 2022, 2023) auf NUTS-3-Ebene aggregiert und mit Daten des statistischen Bundesamtes (Statistisches Bundesamt, 2025c) auf das Ausgangsjahr 2022 angepasst. Der Anteil des verarbeiteten Gewerbes am gesamten BIP der jeweiligen NUTS-

3-Region stammt vom Statistischen Bundesamt. Die Intensität [ $\text{m}^3/1000$  Euro Bruttowertschöpfung] des Wasserbedarfs liegt nur als bundesweiter Wert vor (Statistisches Bundesamt, 2025d). Mögliche zukünftige Änderungen des Anteils des verarbeitenden Gewerbes am BIP und der Intensität wurden in den entwickelten Narrativen bzw. den Fachworkshops diskutiert, quantifiziert und als prozentuale Anpassungen auf die einzelnen NUTS-3-Regionen übertragen. Dadurch können Entwicklungen wie Strukturwandel (z.B. Veränderungen der Wirtschaftsleistung im verarbeitenden Gewerbe) und Änderungen der Intensität, etwa durch Effizienzsteigerungen, abgebildet werden.

**Abbildung 8: Methodik zur Quantifizierung der Wasserbedarfe im Wirtschaftssektor**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

### 2.3.6.3 Rechenzentren

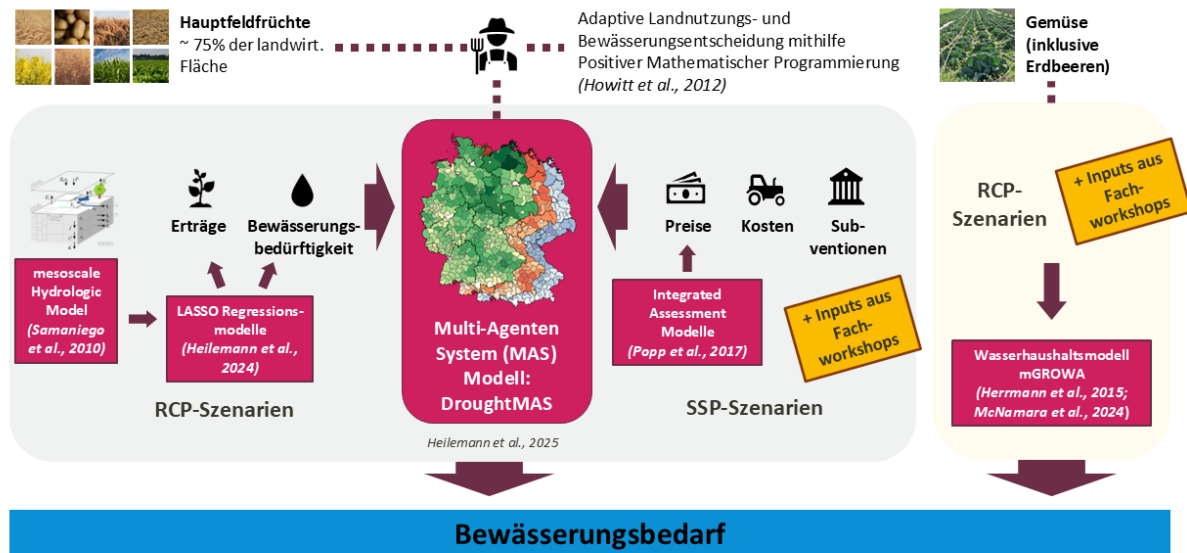
Ein Zweig der Wirtschaft, der immer mehr an Bedeutung gewinnt, ist der Betrieb von Rechenzentren. An den jeweiligen Standorten wird Wasser zum Kühlen der Anlagen verwendet. Die Intensität ist abhängig von den klimatischen Bedingungen, der eingesetzten Kühlsysteme sowie der Art des Datenzentrums und wird mit  $0,05$  bis  $0,4 \text{ m}^3/\text{MWh}$  angegeben (Li et al., 2025, European Commission, 2025). Die derzeitige Ausbauleistung von  $3 \text{ GW}$  wird nach Schätzungen des Branchenverbands der deutschen Informations- und Telekommunikationsbranche bis 2030 auf  $5 \text{ GW}$  anwachsen (bitkom, 2025). Bei einem dauerhaften Betrieb würden 2030 somit deutschlandweit zwischen  $2$  und  $18 \text{ Mio. m}^3$  Wasser auf die Kühlung von Rechenzentren anfallen. Aufgrund von fehlendem Fachwissen in den Workshops konnten zukünftige Kapazitäten von Rechenzentren jedoch nicht quantifiziert werden.

### 2.3.6.4 Landwirtschaft

Aufgrund zunehmender Dürreperioden und veränderter ökonomischer Rahmenbedingungen ist die Projektion des zukünftigen Wasserbedarfs im landwirtschaftlichen Sektor eine zentrale Aufgabe, um den Gesamtwasserbedarf realistisch vorhersagen zu können. Dabei ist die Berücksichtigung von Landnutzungs-, Bewässerungs- und Investitionsentscheidungen von Landwirt\*innen zentral. Um diese Entscheidungen abzubilden, wird ein integriertes hydro-ökonomisches Multiagentensystem (MAS)-Modell benutzt (Heilemann et al., 2025). Die Modellkalibrierung basiert auf dem Ansatz der Positiven Mathematischen Programmierung

(Howitt, 1995; Howitt et al., 2012) und schließt acht Hauptfeldfrüchte ein, die ca. 75% der landwirtschaftlichen Anbaufläche in Deutschland abdecken (Abbildung 9). Die individuell kalibrierten Agenten repräsentieren Landwirt\*innen, die unter den jeweiligen biophysischen und sozioökonomischen Restriktionen eine Anbauentscheidung, Investitionsentscheidung (um Bewässerungsinfrastruktur auszuweiten) und Bewässerungsentscheidung pro Feldfrucht treffen, woraus die benötigte Bewässerungsmenge ableitbar ist. Der Bewässerungsbedarf von Gemüse (inklusive Erdbeeren) wird zusätzlich mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA (Herrmann et al., 2015; McNamara et al., 2024) bestimmt und zusammenaddiert.

**Abbildung 9: Modellierungsansatz für den Sektor Landwirtschaft**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

Zur Projektion des landwirtschaftlichen Wasserbedarfs werden die entwickelten SSP-Szenarien aus den Fachworkshops, zusätzliche globale SSP-Treiber und Klimawandeleffekte aus dem jeweiligen RCP-Szenario genutzt. Dazu wurde das MAS-Modell mit einem statistischen Ertragsmodell integriert, das die zukünftigen Erträge unter den verschiedenen RCPs auf Kreisebene für die acht Hauptfeldfrüchte projiziert (Heilemann et al., 2024). Das verwendete Klimamodellensemble für RCP2.6, RCP4.5, und RCP8.5 wird detailliert in Heilemann et al. (2024) beschrieben. Die Ertragsprojektionen wurden dann für jedes RCP jährlich gemittelt. Die jeweiligen Bewässerungsmengen, die benötigt werden, um die Erträge unter Bewässerung aufrechtzuerhalten, wurden daraus abgeleitet (Heilemann et al., 2025).

Als globale SSP-Szenariotreiber werden die bereits quantifizierten Agrarpreisindexprojektionen (Popp et al., 2017; Abbildung 47) genutzt, die u.a. auf den SSP-Projektionen des Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstums beruhen. Weitere Annahmen aus dem Szenarienentwicklungsprozess, z.B. zu Wasserpreisen, technologischem Fortschritt oder Agrarsubventionen, wurden als zusätzliche Modelltreiber genutzt. Die Projektionen erfolgten jährlich auf Kreisebene (NUTS-3-Ebene) und wurden national aggregiert. Regionale Aspekte werden darüber hinaus in Kapitel 3.2 diskutiert.

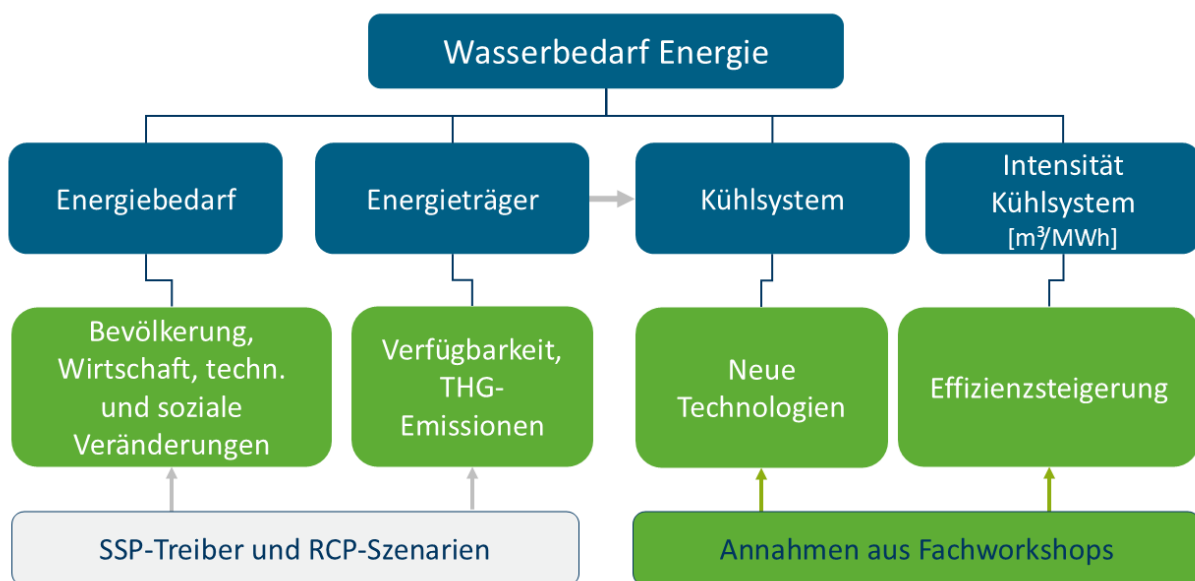
### 2.3.6.5 Energie

Die Bestimmung des Wasserbedarfs bei der thermischen Stromerzeugung (Kühlwasser) erfolgt bundesweit mit jährlichen Zeitreihen und anschließendem downscaling auf NUTS-3-Ebene

mittels Kraftwerkstandorten (BNetzA, 2025). Die Projektionen der Energieerzeugung und der verwendeten Energieträger stammen aus regionalisierten globalen Studien für die jeweiligen SSP-RCP Szenariokombinationen (IIASA: Riahi et al., 2017). Die Szenario-Zeitreihen wurden so skaliert, dass der Startwert 2020 der tatsächlichen Stromproduktion mit dem entsprechenden Energieträger (AGEB, 2025) entspricht, der Endwert für das Jahr 2100 jedoch den Werten aus den Projektionen.

Der Wasserbedarf der Kraftwerke wird mit Wassernutzungsintensitäten [ $\text{m}^3/\text{MWh}$ ] berechnet, welche sich je nach Energieträger und Kühlsystem unterscheiden (Abbildung 10). Bei den Kühlsystemen wird zwischen Kreislaufsystemen (z. B. Turmkühlung), Durchlaufsystemen und Speicherbecken unterschieden. Kreislaufsysteme haben einen geringeren Wasserbedarf als Durchlaufsysteme, dafür einen höheren Wasserverbrauch. Für die aktuelle Aufteilung der Kühlsysteme wurde die Datenbank von Lohrmann (2019) ausgewertet und auf die gesamte Stromproduktion in Deutschland extrapoliert. Im partizipativen Ansatz mit den Teilnehmenden der Fachworkshops wurden mögliche neue Energieträger für Deutschland (z.B. Kernfusion) identifiziert sowie Änderungen der Kühlsysteme und deren Intensität infolge technologischer Entwicklungen festgelegt und anschließend modelliert.

**Abbildung 10: Methodik zur Quantifizierung der Wasserbedarfe im Energiesektor**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

### 2.3.6.6 Wasserstoff

Die Wasserstoffelektrolyse hat in Deutschland derzeit nur geringe Kapazitäten, diese soll aber in Zukunft deutlich ausgebaut werden. Für die Elektrolyse wird Wasser stofflich, bei der Umwandlung zu Wasserstoff, und zur Kühlung verwendet. Die zur Kühlung und Elektrolyse notwendige Wassermenge ist stark von dem Kühlsystem abhängig und variiert zwischen 0,4 und 45  $\text{m}^3/\text{MWh}$  (Saravia et al., 2024). Unter der Annahme von 4000 Volllaststunden werden bei einer Elektrolysekapazität von 1 GW somit bis zu 180 Mio.  $\text{m}^3$  Wasser pro Jahr benötigt. Welche Kühlsysteme derzeit und in Zukunft für die Elektrolyse verwendet werden, ist nicht hinreichend bekannt, sodass bei der Berechnung des Wasserbedarfs ein sehr großer Schwankungs- und Unsicherheitsbereich besteht. Das Projekt NachH2 „Untersuchung von umweltrelevanten Wirkkategorien der Wasserstoffwirtschaft (inklusive Derivate) zur Verankerung von Nachhaltigkeitsanforderungen“ (vom Umweltbundesamt gefördert, FKZ 3724437040) widmet

sich u.a. der Frage, welche Menge an Frischwasser zur Wasserstoffherstellung in Abhängigkeit von der Elektrolyseleistung benötigt wird. Dafür werden alle Schritte von der Entnahme bis zur Entsorgung hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen untersucht, um Kriterien für einen nachhaltigen Umgang mit Wasserressourcen zu entwickeln und somit Wassernutzungskonflikte zu vermeiden. Erste Erkenntnisse verdeutlichen die große Schwankungsbreite für Wasserbedarfe in Abhängigkeit vom Kühlsystem bei der Elektrolyse. Möglicherweise muss noch der Wasserbedarf zur Stromproduktion hinzugerechnet werden. Darüber hinaus zeigt die NachH2 Studie, dass alle möglichen Wasserressourcen (Frischwasser, Abwasser) und deren zukünftige Entwicklung bedeutsam für die Standortwahl zur Produktion sind. Hier müssen insbesondere mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserressourcen in Betracht gezogen werden (s. WHY-Projekt, Produktionsstandorte von grünem Wasserstoff in Deutschland<sup>24</sup>). Die für die Elektrolyse notwendige elektrische Energie soll aber v.a. aus erneuerbaren Energien stammen (Grüner Wasserstoff). Dadurch entstehen keine zusätzlichen Wasserbedarfe in der Energieproduktion. Ob und inwiefern durch die Nutzung von Wasserstoff weiterer Wasserbedarf entsteht, ist unklar und wird hier nicht berücksichtigt. In den Fachworkshops wurde von den Teilnehmenden diskutiert, welche Kapazitäten für die Wasser-Elektrolyse aufgebaut werden.

#### **2.3.6.7 Ökologischer Wasserbedarf/Mindestabfluss**

Mindestwasserführungen sind entscheidend, um die ökologische Funktionsfähigkeit von Gewässern zu erhalten. Für Deutschland wurden von der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA, 2019) Mindestwasserorientierungswerte für verschiedene Fallgruppen und Gewässertypen veröffentlicht. Neben ganzjährig festgelegten Mindestabflüssen werden auch saisonal angepasste Abflusswerte beschrieben, um beispielsweise Fischwanderungen zu ermöglichen. Die Mindestabflüsse werden anhand hydrologischer Kennwerte wie dem mittleren Niedrigwasserabfluss (MNQ) und dem mittleren Abfluss (MQ), ermittelt. Besonders in Dürreperioden steht die Sicherstellung des ökologischen Mindestabflusses häufig im Konflikt mit den Interessen anderer Wasserentnehmenden, etwa aus der Wirtschaft oder dem Energiesektor.

Eine quantitative Abschätzung der Veränderungen ökologischer Mindestabflüsse kann im Rahmen der Workshops bzw. des Projekts nicht vorgenommen werden, da hierfür hydrologische Modellierungen unter Einbeziehung von Klimaprojektionen erforderlich sind. Qualitativ wurden jedoch mögliche Entwicklungen der Ökosysteme und Gewässer in den erarbeiteten Narrativen beschrieben.

#### **2.3.6.8 Limitationen der Modellierung**

Die vorgestellten Modellergebnisse bieten eine umfassende Darstellung der sektoralen Wasserbedarfe für Deutschland. Dabei liegt der Fokus auf einer nationalen Perspektive, die eine breite Übersicht ermöglicht. Um ein breites Spektrum möglicher Zukünfte abzubilden, wurden vier SSP-Szenarien auf nationaler Ebene weiterentwickelt. Diese Szenarien berücksichtigen unterschiedliche Entwicklungswege und Herausforderungen und sind auf Deutschland und jährliche Schwankungen ausgerichtet. Entsprechend wurden auch die abgeleiteten Inputs für die Modelle auf nationaler Ebene entwickelt. Die Modellierung nutzt Modellinput, der auf dem verfügbaren Expert\*innenwissen der Fachworkshops beruht. Einzelne Teilspektoren können ein kenntnisbasiertes Bias aufweisen. Saisonale Schwankungen und regionale Besonderheiten

---

<sup>24</sup> <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/projekte/why.html>

konnten über klimawandelgetriebene Annahmen, z.B. Anzahl der Hitzetage oder meteorologischen Modellinput, mitberücksichtigt werden. Daraus resultiert, dass die Darstellungen der Wasserbedarfe für Deutschland nur begrenzt regionale Entwicklungen und saisonale Spitzen (z.B. Hitzetage) widerspiegeln. Solche Betrachtungen sind regional gesondert zu entwickeln und können nicht in diesem Vorhaben abgedeckt werden. Ein Vorteil des hier gewählten Ansatzes ist, dass die gewählte Methodik auch auf regionale Projekte übertragbar ist. Damit werden eine flexible Anwendung und Anpassung an spezifische Anforderungen verschiedener Regionen möglich. Somit bieten die Ergebnisse dieses Projektes eine solide Grundlage für weitere, detailliertere Analysen auf regionaler Ebene.

Wie alle Modelle haben auch die hier verwendeten Modellierungsansätze Limitationen, die es zu berücksichtigen gilt.

Aufgrund nicht vorhandener Daten und Modellgrenzen umfasst die Modellierung des **landwirtschaftlichen Wasserbedarfs** keine Frostschutzbewässerung oder den Bewässerungsbedarf von bestimmten Sonderkulturen wie Wein. Außerdem wurde der Wasserbedarf der Tierhaltung in diesem Ansatz nicht explizit modelliert.

Um trotzdem eine Einschätzung des Effekts von Frostschutzbewässerung und Tierhaltung auf den zukünftigen landwirtschaftlichen Wasserbedarf zu treffen, wurden zwei Studien herangezogen, die auch in AP2 genannt werden: Für das Bundesland Hessen wurde der Bewässerungsbedarf für Frostschutzbewässerung unter zukünftigem Klimawandel modelliert, wobei ein starker Rückgang des potenziellen Wasserbedarfs von bis zu 94% bis zum Ende des Jahrhunderts projiziert wurde (Potts et al., 2025). Dieser Ansatz berücksichtigt allerdings nicht die Verschiebung der Vegetationsperiode mit früheren Austriebsphasen und damit verbundener größerer Exposition gegenüber Spätfrost (Pulatov et al., 2015; Pfeleiderer et al., 2019). Im Wasserversorgungskonzept Niedersachsen (2022) wurde außerdem der Wasserbedarf der Tierhaltung explizit berücksichtigt und für Niedersachsen projiziert. Während durch einen zunehmenden Anschlussgrad der tierhaltenden Betriebe an die öffentliche Wasserversorgung ein Rückgang des Wasserbedarfs in Betrieben mit Eigenversorgung projiziert wird, steigt regional der Wasserbedarf für die Tierhaltung über die öffentliche Wasserversorgung, was zu einem ungefähr gleichbleibenden Wasserbedarf für die Tierhaltung führt, wobei klimatische Veränderungen hier nicht betrachtet wurden.

Die Modellierung der Wasserbedarfe der Sektoren Haushalte, Wirtschaft und Energie erfolgte auf jährlicher Basis. Die Erfassung unterjähriger Daten erfolgt in Deutschland betriebspezifisch, diese Daten sind jedoch nicht frei zugänglich. Nur wenige Wasserversorger stellen ihre Daten zur Verfügung. Auf dieser Basis konnten Auswirkungen von Sommertagen und heißen Tagen auf den häuslichen Wasserbedarf abgeleitet werden. Die vom BDEW zur Verfügung gestellten Daten erlauben Rückschlüsse auf die Saisonalität des Wasserbedarfs im Haushaltssektor, d.h. der jährliche Wasserbedarf kann nach Quartalen aufgeschlüsselt werden; für zukünftige Abschätzungen werden diese Werte jedoch statisch bleiben. Aufgrund der starken Aggregation auf Ebene der Bundesländer können jedoch keine räumlich differenzierten Aussagen getroffen werden (z. B. für NUTS-3-Regionen). Die Wasserbedarfe der Sektoren Wirtschaft und Industrie wurden auf NUTS-3-Ebene simuliert, sofern bereits Standorte vorhanden waren.

Neuansiedelungen von Industrieanlagen, Kraftwerken oder Anlagen zur Wasserstoffhydrolyse konnten mit den Simulationsmodellen jedoch nicht erfasst werden. Da unterjährige Wasserbedarfe des Wirtschafts- und Energiesektors nicht öffentlich zugänglich sind, können weder Saisonalitäten noch Zeiten für Spitzenbedarfe abgeleitet werden. Im Energiesektor ist davon auszugehen, dass eine erhöhte Stromproduktion im Sommer auftritt, wenn der Strombedarf z.B. für den Betrieb von Klimaanlagen zur Kühlung steigt. Da Strom ein

wesentlicher Kostenfaktor bei der Elektrolyse zur Wasserstoffproduktion ist, werden Elektrolyseure vornehmlich dann betrieben, wenn Strom preiswert verfügbar ist. Dies ist in Phasen mit hohem Angebot an erneuerbarem Strom der Fall, insbesondere bei viel Wind und tagsüber im Sommerhalbjahr (Photovoltaik). Darüber hinaus ist anzumerken, dass der Wirtschaftssektor hinsichtlich der erfassten Industrien und Betriebe sehr heterogen aufgestellt ist: Chemische Industrie, Papierindustrie, Stahl- und metallverarbeitende Betriebe, Halbleiterproduktion, Rechenzentren etc. haben jeweils unterschiedlich hohe Wasserbedarfe bzw. sind unterschiedlich wasserintensiv. Die gesamte Bandbreite möglicher Wasserbedarfe im Wirtschaftssektor konnte modellbasiert nicht abgebildet werden.

Für die Sektoren Tourismus und Ökologie war keine spezifische Modellierung und Quantifizierung im Rahmen des Projekts möglich. Wasserbedarfe im Tourismussektor werden implizit im Sektor "Haushalte" sowohl qualitativ (im Narrativ) als auch quantitativ miteinbezogen. Im Narrativ werden mögliche zukünftige „Tourismus-Hotspots“ aufgezeigt, die für eine regionale Bewertung des Einflusses des Wasserbedarfs von Bedeutung sind. Für den Sektor „Ökologie“ werden beispielhafte Studien herangezogen (s. Kap. 2.3.6.7), um auf den Wasserbedarf aufmerksam zu machen. In den Narrativen werden mögliche Zustände von Gewässern oder ökologische Auswirkungen adressiert.

### **2.3.7 Schritt 7: Fachworkshop 2 mit Stakeholdern**

Der zweite Fachworkshop fand am 23. und 24. September 2025 in Berlin statt. Im Fachworkshop 2 explorierten die Teilnehmenden zunächst die im Schritt 4 ausgearbeiteten Szenarien-Narrative, die vorgeschlagenen Szenario-Namen und mit neuen Bezeichnungen versehenen Szenario-Rahmen. Die vorgeschlagenen Anpassungen der Szenario-Namen und Bezeichnungen wurden begrüßt und angenommen.

Ein zentraler Fokus des Fachworkshops 2 lag darin, den Teilnehmenden ausführliche Informationen zu den vorgenommenen Modellierungen und den Ergebnissen dieser für die verschiedenen SSPs darzulegen (siehe Schritt 6 und Unterkapitel 2.3). Die Teilnehmenden diskutierten die Ergebnisse ausführlich und gaben spezifisches Feedback zu den Modellierungsergebnissen für die Szenario-Narrative. Dabei wurden die Annahmen in der Modellierung und den Narrativen sowie deren Ergebnissen abgeglichen. Die Teilnehmenden gaben Input für weitere Detailanpassungen der Narrative als auch der Modellierung. Zudem wurden die Auswirkungen der kombinierten qualitativ-quantitativen Wasserbedarfsszenarien besprochen, und die aktive Nutzung der Ergebnisse durch Stakeholder wurde eruiert.

### **2.3.8 Schritt 8: Anpassung und Fertigstellung der Szenarien-Narrative**

Entsprechend der Rückmeldungen der Teilnehmenden im Fachworkshop 2 wurden die jeweiligen Szenarien-Narrative angepasst. Die überarbeiteten Szenario-Narrative wurden mit dem Auftraggeber abgestimmt.

### **2.3.9 Schritt 9: Überarbeitung und Fertigstellung der Modellierungen**

Die Ergebnisse der Modellierung zur Wasserbedarfsprojektion pro Sektor und SSP wurden anhand des Feedbacks des zweiten Fachworkshops überprüft. Basierend auf dem Feedback der Teilnehmenden wurden die jeweiligen Szenarioannahmen weiter angepasst und verfeinert (z.B. bezogen auf den Anstieg des Wasserpreises, der von den Teilnehmenden als geringer eingeschätzt wurde als vorher in der Modellierung angenommen). Die Wasserbedarfe wurden dann in einer zweiten Modellierungsrunde erneut quantifiziert. Diese Ergebnisse werden im Folgenden in diesem Bericht dargestellt, wobei die Effekte von einzelnen Annahmen auf den

modellierten Wasserbedarf visualisiert wurden, um so eine Unsicherheits- und Sensitivitätsbetrachtung der Ergebnisse im Rahmen des Szenarioraums abzubilden.

#### **2.3.10 Schritt 10: Zusammenfügen zu integrierten qualitativ-quantitativen Szenarien zu Wasserbedarf in Deutschland**

Aufbauend auf den Schritten 8 und 9 wurden die aufeinander abgestimmten Szenarien-Narrative und die Modellierungsergebnisse in ein kombiniertes Ergebnis zusammengefügt. Zusätzlich zu den zwei Iterationen zwischen qualitativen Narrativen und quantitativer Modellierung mit den Teilnehmenden bei den zwei Fachworkshops, wurden innerhalb des Projektteams weitere Durchläufe vorgenommen.

## 3 Wasserbedarfsszenarien für Deutschland

### 3.1 Wasserbedarfsszenarien

#### 3.1.1 Szenario-Rahmen für die deutschen Wasserbedarfsszenarien

In Schritt 4 wurde dargelegt, dass der Szenario-Rahmen der SSPs für den Kontext der Wasserbedarfe in Deutschland angepasst wurde.

Der Szenario-Rahmen für die deutschen Wasserbedarfsszenarien unterscheidet daher zwei wichtige Unsicherheiten mit jeweils zwei unterschiedlichen Ausprägungen. Die erste, im Schaubild vertikal ausgerichtete Unsicherheit ist der *Druck auf Wasserressourcen*.<sup>25</sup> Die zweite, im Schaubild horizontal ausgerichtete Unsicherheit ist *Ungleichheit*.<sup>26</sup> Die Ausprägungen sind jeweils als *hoch* oder *gering* bezeichnet. So ergibt sich eine Matrix aus vier Quadranten (siehe Abbildung 11) welche die **vier Szenario-Narrative** verorten<sup>27</sup>:

- ▶ Links unten: Geringe Ungleichheit kombiniert mit geringem Druck auf Wasserressourcen: das Szenario mit dem Titel „**Aufklärung 2.0**“ (Referenz zu den globalen sozio-ökonomischen Szenarien: SSP1 – Sustainability / Nachhaltigkeit)
- ▶ Rechts oben: Hohe Ungleichheit kombiniert mit hohem Druck auf Wasserressourcen: das Szenario mit dem Titel „**Rückzugskampf**“ (Referenz zu den globalen sozio-ökonomischen Szenarien: SSP3 – Regional Rivalry / Regionale Rivalität)
- ▶ Rechts unten: Hohe Ungleichheit kombiniert mit geringem Druck auf Wasserressourcen: das Szenario mit dem Titel „**Privatisierung des Lebens**“ (Referenz zu den globalen sozio-ökonomischen Szenarien: SSP4 – Inequality / Ungleichheit)
- ▶ Links oben: Geringe Ungleichheit kombiniert mit hohem Druck auf Wasserressourcen: das Szenario mit dem Titel „**Wirtschaftswunder 2.0**“ (Referenz zu den globalen sozio-ökonomischen Szenarien: SSP5 – Fossil-fueled Development / Fossil-befeuerte Entwicklung)

Nachfolgend werden alle vier entwickelten Szenarien-Narrative nacheinander wiedergegeben. Dabei wird zudem die jeweilige Verbindung mit dem korrespondierenden Klimasignal (Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre, RCPs) aufgeführt und die mit den Szenario-Narrativen abgestimmte Quantifizierung der Wasserbedarfe aufgezeigt und erläutert. Dies ergibt somit vier kombinierte qualitative / quantitative Szenarien zum Wasserbedarf in Deutschland.

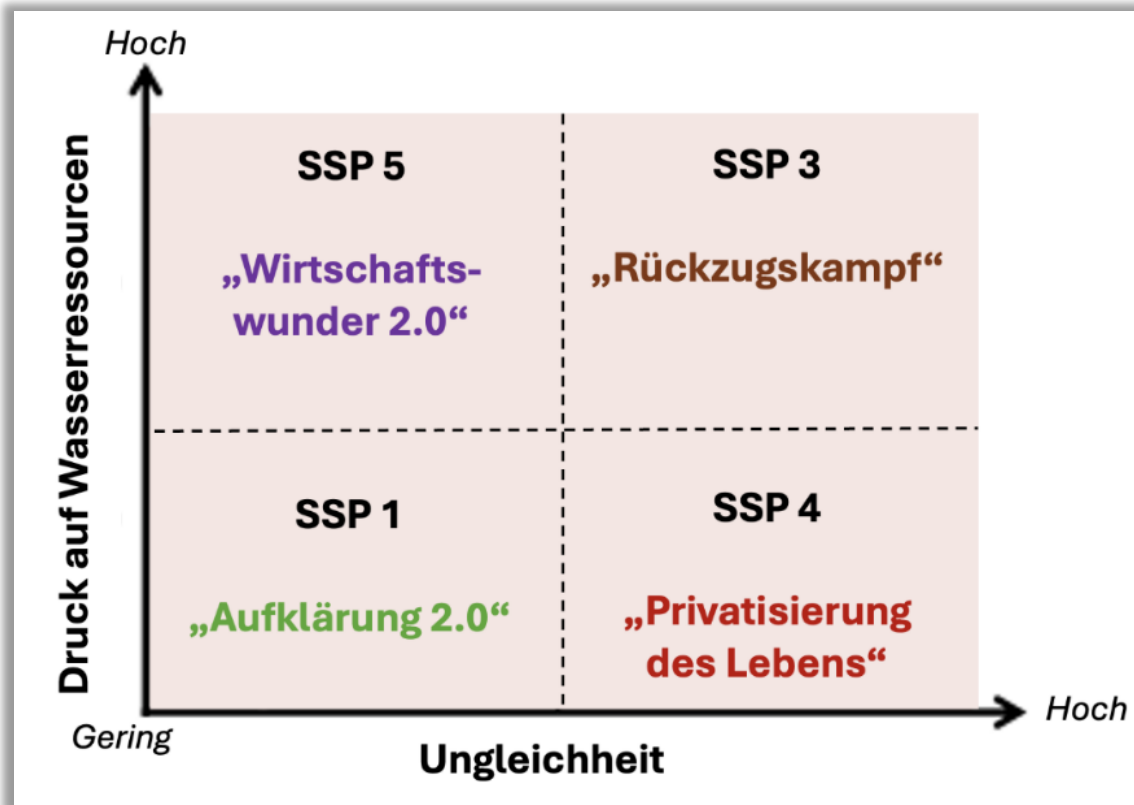
---

<sup>25</sup> In den globalen SSPs ist diese Matrixachse als *sozio-ökonomische Herausforderung für den Klimaschutz (socio-economic challenges for mitigation)* bezeichnet, mit den gleich bezeichneten Ausprägungen (jeweils relativ *hoch/gering*).

<sup>26</sup> In den globalen SSPs ist diese Matrixachse als *sozio-ökonomische Herausforderung für Anpassung an den Klimawandel (socio-economic challenges for adaptation)* bezeichnet, mit den gleich bezeichneten Ausprägungen (jeweils relativ *hoch/gering*).

<sup>27</sup> Die fünfte SSP (SSP 2), im Zentrum der Matrix angelagert, wurde wie oben beschrieben, nicht weiterverwendet, da sie für den Szenario-Rahmen nicht konstituierend ist und zudem in der Nutzung zur Regression in die Mitte verleitet, was dem Prinzip des Szenario-Ansatzes (Planen für unterschiedliche Zukünfte) zuwiderläuft.

Abbildung 11: Die im Rahmen des Projektes für Wasserbedarfe in Deutschland entwickelten Szenarien/SSPs (eigene Darstellung)



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

### 3.1.2 Aufklärung 2.0 (Szenario SSP 1)

Druck auf Wasserressourcen: **Gering**; Ungleichheit: **Gering**.

#### 3.1.2.1 Aufklärung 2.0: Szenario-Narrativ

##### Umweltkatastrophen und ihre Auswirkungen treffen Deutschland bis ins Mark

In den späten 2020er-Jahren verstärken sich Dürren und katastrophale Extremereignisse weltweit, ebenso in Europa und in Deutschland. Nordamerika erlebt eine ungesehene Serie von vernichtenden Hurrikans, die weite Teile Texas und Floridas verwüsten. Langanhaltende Dürren führen zu Hungersnöten in Afrika mit extremen Todesraten. Sie trocknen auch Südeuropa weitgehend aus und reduzieren den landwirtschaftlichen Ertrag erheblich. Im Sommerhalbjahr wird Wasser zunehmend auch in Deutschland knapp. Flüsse leiden unter hoher Wärmelast, mit negativen Auswirkungen auf die Ökosysteme. Bei der Bekämpfung der vermehrt auftretenden Waldbrände bestehen Engpässe bei der Verfügbarkeit von Löschwasser. Diese Ereignisse und ihre Folgen bereiten das Feld nicht nur für Konflikte, sondern auch für Betrug und Korruption vor. Die Umweltkatastrophen reißen zunehmend größere Löcher in Firmenbudgets und öffentliche Haushalte. Deutschland wird zudem mit in die Höhe schnellender Migration aus dem Süden konfrontiert.

##### Bis 2050: Umdenken und entschlossenes Handeln

Die Mehrzahl der Menschen in Deutschland nehmen die Umweltkatastrophen und zunehmenden Dürren als existenzielle Bedrohung wahr. Unter dem Druck der Ereignisse wachsen die

praktische und moralische Einsicht und Bereitschaft für grundlegende Veränderung der Lebens- und Wirtschaftsweise. Ernsthafte Nachhaltigkeit erscheint als Notwendigkeit, nicht als nachgeordneter Luxus. Die Politik in Deutschland reagiert mit einschneidenden staatlichen Eingriffen. Zum einen kommt es zu schnellen Maßnahmen wie dem gezielten Ausbau der Energienetze insbesondere zwischen Nord- und Süddeutschland, dem verstärkten Umbau zu erneuerbaren Energien und dem Abschalten der letzten Kohlekraftwerke sowie dem Ausbau der direkten Kohlendioxidabscheidung und -speicherung (CCS). Etwas später kommt es auch zu einer nachhaltigen Reform der gemeinsamen EU-Agrarpolitik. Zum anderen werden die gesetzlichen Rahmenbedingungen für Transformation geschaffen, allen voran eine Reform des Steuersystems mit der Abschaffung klimaschädlicher Subventionen und der Einbeziehung von Umweltressourcenkosten.

Künstliche Intelligenz (KI) wird weitreichend zur Effizienzsteigerung genutzt – befördert zugleich aber auch die menschliche Moral- und Verhaltensänderung zur Nachhaltigkeit. Im Reiseverhalten bedeutet dies eine Hinwendung zu Inlandstourismus; Mittelstrecken verlaufen zunehmend an Land. Virtuelles Reisen nimmt deutlich zu. Pro-aktives Steuern von Besucherströmen verhindert auch für den Wasserbedarf ökologische Überlastungen. So wie im Fremdenverkehr setzt sich auch gesamtgesellschaftlich die Überzeugung durch, dass der Umbau der Wirtschaft und des persönlichen Handelns ernsthafte Überwachung verlangt.

In dieser, von Politik und Gesellschaft getragenen Transformation, kämpfen viele Firmen mit Anpassungs- und einige mit Überlebensschwierigkeiten. Allerdings nimmt die staatliche Investitionsbereitschaft im Zuge der bedrohlichen Umweltkatastrophen zu, die private Investitionsbereitschaft wird durch staatliche Förderprogramme und steuerliche Anreize angeschoben. Es kommt zu einer Phase ökologisch angetriebener schöpferischer Zerstörung in der deutschen Wirtschaft hin zu einem ökologischen Umbau. Der negative Teil der Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt wird durch staatliche Mittel sowie durch die Effizienz- und Anwendungsrevolution von KI-Technologien weitgehend abgefedert. Die Wohlstandseinbußen in Deutschland sind im Vergleich zu denen in anderen Ländern u. a. in Europa gering. Deutschlands Attraktivität führt zu starkem Migrationsdruck, dem nach intensiven gesellschaftlichen Debatten mit schrittweise stärkerer kontrollierter Zuwanderung begegnet wird. So bleiben insgesamt auch gesellschaftliche Gegenbewegungen weitgehend in der Minderheit, wobei wechselnde Regierungsmehrheiten auf Bundesebene und in einigen Bundesländern zeitweilig für ein Abbremsen sorgen.

### **Bis 2075: Klimaziele erreicht, Ressourcenkreisläufe im Blick**

Gegen Mitte des Jahrhunderts, mit der Abschaltung des letzten Gaskraftwerks, ist Deutschland klimaneutral. Dies wird 2054 landesweit mit großen Veranstaltungen gefeiert. Die Pariser Klimaziele sind erreicht. Der Bundeshaushalt ist kurzfristig wieder ausgeglichen. Dann erfolgen finanzintensive, nachhaltige Innovationen etwa in die Kreislaufwirtschaft und gerade auch im Energiebereich, beispielsweise in der Tiefengeothermie, die zu günstigeren Energiepreisen führen und die Wirtschaft florieren lassen. Durch die frühe Umstellung auf grüne Technologien gehört Deutschland in diesem Bereich zu einer der führenden Nationen. Dies gilt auch für Technologien zur Anpassung von Anbausystemen in der Landwirtschaft und für die Wasserwirtschaft. Deutschland führt umfassende und verbindliche Ressourcenkreisläufe für Nährstoffe in der Landwirtschaft ein. Einher geht damit die Internalisierung der Umweltressourcenkosten in den deutschen Wirtschaftsunternehmen. In Deutschland leben 2075 rund 75 Millionen Menschen.

### **Bis 2100: Nachhaltigkeitsziele erreicht, neue gesellschaftliche Fragen kommen auf**

Gegen Ende des Jahrhunderts erreicht die Energierevolution einen weiteren Höhepunkt mit dem industriellen Einsatz strahlungsarmer Kernfusion als Energieträger. Die Nutzung von Wasserstoff sinkt, der Einsatz von Bioenergie geht zurück und auch CCS wird weniger gebraucht. Der Deutsche Bundestag stellt 2090 fest, dass die Nachhaltigkeitsziele erreicht sind – zur Erinnerung an den langen Weg hierhin werden vermehrt Bildungsorte geschaffen, die einer Katastrophendemenz entgegenwirken. Deutschland hat zum Ende des Jahrhunderts eine Bevölkerung von rund 68 Millionen Menschen, gekennzeichnet von einem noch nie gesehenen hohen Bildungsniveau, dem starken Rückgang von bzw. einer hohen Resilienz gegen Umweltkatastrophen sowie mit örtlich nahezu unbeschränkter Mobilität durch kostenlosen öffentlichen Nahverkehr. Sie sind umgeben von funktionierenden Ökosystemen. Mit dem hohen und weiter zunehmenden Grad an Nachhaltigkeit verlagert sich der Fokus in Deutschland gegen Ende des Jahrhunderts auf andere gesellschaftliche Herausforderungen.

**Abbildung 12: Illustration Aufklärung 2.0 im Jahre 2100 (Quelle KI Gemini)**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

#### **3.1.2.2 Aufklärung 2.0: Modellierter Wasserbedarf**

##### **Ergebnisse modellierter Wasserbedarf**

**Haushalte:**

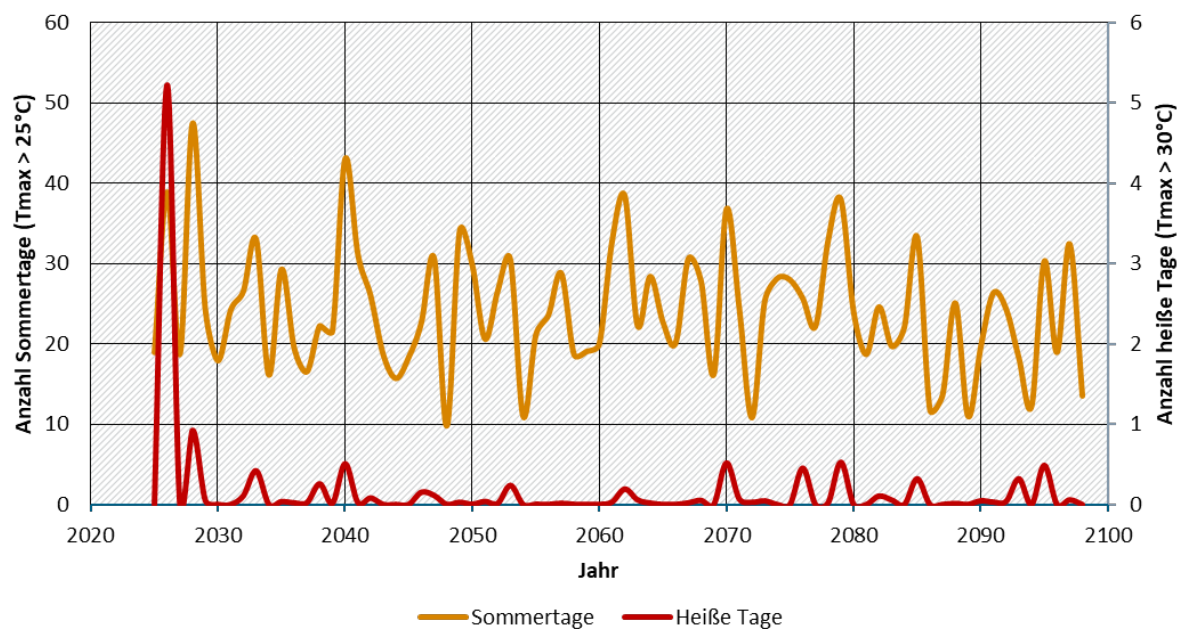
##### ***Inputs zur Modellierung***

##### **RCP-Szenario: RCP 2.6**

Das Szenario „Aufklärung 2.0“ wurde mit dem Klimawandelszenario RCP2.6 verknüpft. Die durchschnittliche Anzahl der zukünftigen Sommertage (>25 °C) und heißer Tage (>30 °C) wurde dem entsprechenden Klimamodellensemble (s. Kap. 2.3.5) aus der Studie von Heilemann et al.

(2024) entnommen. In Abbildung 13 ist der Verlauf der Anzahl der Tage pro Jahr und NUTS-3-Region als Medianwert des Modellensembles für Deutschland dargestellt (in Deutschland gibt es 401 NUTS-3-Regionen). Die Anzahl der Sommertage variiert dabei zwischen 10 und 48 Tagen. Bis in die 2080er-Jahre ist eine leichte Zunahme erkennbar. In der letzten Dekade des 21. Jahrhunderts reduziert sich die Anzahl leicht. Die Anzahl heißer Tage bleibt dauerhaft unter einem Tag pro Jahr und NUTS-3-Region. Es gibt jedoch Anzeichen für eine Erhöhung der Anzahl heißer Tage gegen Ende des Jahrhunderts. Regional variiert die Anzahl der Sommer- und heißen Tage und es können deutlich höhere Werte auftreten.

**Abbildung 13: Durchschnittliche Anzahl an Tagen mit einer Tageshöchsttemperatur von über 25 °C (Sommertage) und 30 °C (heiße Tage) pro NUTS-3-Region im RCP-Szenario 2.6 (eigene Darstellung, Daten aus Heilemann, 2024)**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

### Globale SSP-Treiber

Die Entwicklung der Bevölkerung ist der relevante SSP-Treiber in der Quantifizierung der häuslichen Wasserbedarfe (s. Kap. 2.3.6.1). Im Szenario „Aufklärung 2.0“ werden die Bevölkerungszahlen aus dem globalen SSP1-Szenario verwendet (Jones & O’Neill, 2016; Gao, 2017, 2020). Für Deutschland wird eine Bevölkerungsentwicklung prognostiziert, die durch sinkende Geburtenraten und eine steigende Lebenserwartung zu einer Alterung der Gesellschaft führt. Die Bevölkerungsentwicklung verläuft regional unterschiedlich; mit zunehmender Urbanisierung kommt es zu Verschiebungen zwischen städtischen und ländlichen Gebieten. Es wird erwartet, dass die Einwohner\*innenzahl zunächst bis zum Jahr 2070 moderat um 4,2 % sinken wird und einen Wert von unter 80 Millionen (79,7 Millionen) erreicht. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts wird ein weiterer, stärker ausgeprägter Rückgang erfolgen, der insgesamt zu einer Reduktion der Bevölkerung von ca. 19 % im Vergleich zum Referenzjahr 2022 führen wird. Die Bevölkerung wird dann bei 67,7 Millionen im Jahr 2100 liegen. (Die Darstellung der zukünftigen Bevölkerungsentwicklung Deutschlands im SSP1-Szenario ist im Anlage B zu finden.)

### **Annahmen aus Fachworkshops:**

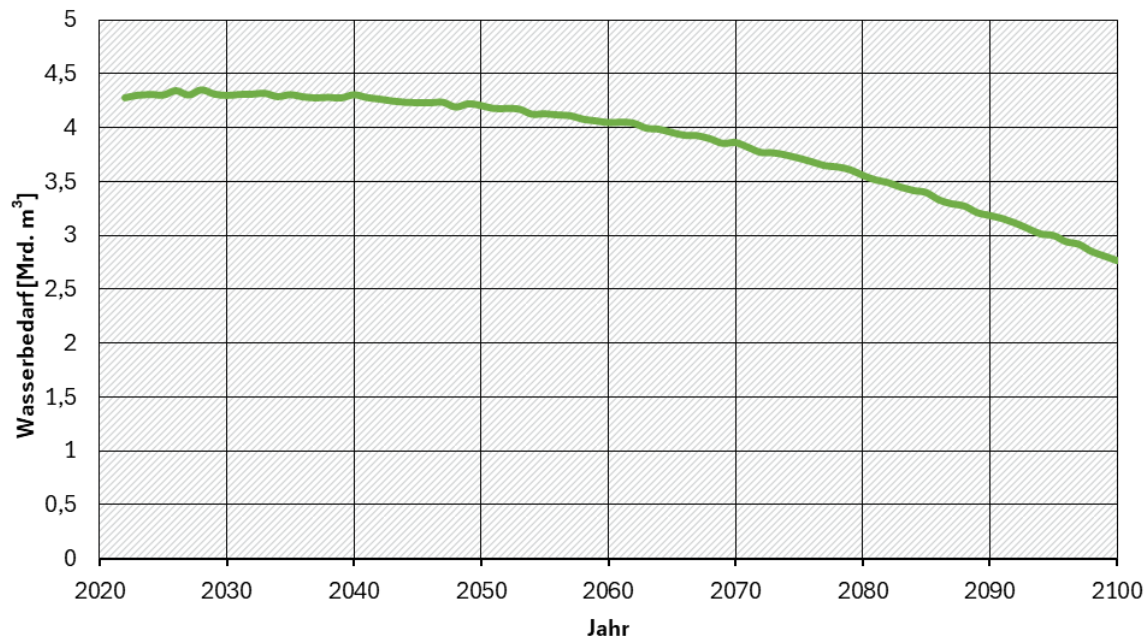
Zwischen 2050 und 2075 wird sich die Wassernutzungsintensität voraussichtlich um 10 % reduzieren, gefolgt von einer weiteren Abnahme um 20 % zwischen 2075 und 2100. Trotz dieser Effizienzsteigerungen werden die Verluste im Wassersystem konstant bei 12 % über die gesamte Zeitperiode liegen. Insbesondere in ländlichen Regionen werden private Brunnen genutzt, um Gärten zu bewässern. Die Gartenbewässerung, häufiges Duschen und die Befüllung von Pools an Hitzetagen werden zu Nachfragespitzen führen.

Der Wasserbedarf für den Tourismus ist Teil des Haushaltssektors. Regionale Entwicklungen werden qualitativ beschrieben. Der Tourismus wird ebenfalls einen bedeutenden Beitrag zum Wasserbedarf leisten. Bis zum Jahr 2050 wird ein leichter, linearer Anstieg des Wasserverbrauchs im Tourismussektor um etwa 10 % erwartet. Zwischen 2050 und 2075 wird eine Zunahme des Wasserbedarfs im Tourismus um 20 % im Vergleich zum Referenzwert (2025: 34,4–34,8 Mio. m<sup>3</sup>/a) angenommen. Der Wasserbedarf wird dann bis zum Jahr 2100 weiter ansteigen und deutlich über dem Referenzwert liegen (+30 %). Erhöhte Wasserbedarfe im Tourismus können zu Hotspot-Problemen und zusätzlichen Wassernachfragespitzen führen. Besonders in beliebten Urlaubsregionen könnte dies zu einer erhöhten Belastung der lokalen Wasserversorgung führen. Gleichzeitig wird der Skitourismus aufgrund höherer Temperaturen wahrscheinlich abnehmen, was zu einer Verschiebung der touristischen Aktivitäten hin zu anderen Bereichen wie Wellness, Spaßanlagen, Schneekanonen und Golfplätzen führen könnte.

### ***Modellierter Wasserbedarf für Haushalte***

Abbildung 14 zeigt den Verlauf des zukünftigen Wasserbedarfs im Haushaltssektor in Deutschland für das Szenario „Aufklärung 2.0“. Im Referenzjahr 2022 betrug der Wasserbedarf im Haushaltssektor 4,28 Milliarden m<sup>3</sup> inklusive Verluste von ca. 12 %. Auf diesem Niveau verharrt der Wasserbedarf zunächst bis 2040, bevor er sukzessive bis 2100 auf 2,77 Milliarden m<sup>3</sup> sinkt. Diese Reduzierung resultiert aus den sinkenden Bevölkerungszahlen und Effizienzsteigerungen. Letztere nehmen nach 2075 deutlich zu, was zu einer Beschleunigung des Rückgangs führen. Im Vergleich zum Referenzjahr 2022 sinkt der Wasserbedarf im Haushaltssektor bis zum Ende des Jahrhunderts um 35 %. Die geringfügigen Änderungen zwischen den Jahren sind auf klimatische Einflüsse zurückzuführen.

**Abbildung 14: Modellierter Wasserbedarf des Haushaltssektors im Szenario „Aufklärung 2.0“ von 2022 bis 2100.**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

## **Wirtschaft:**

### ***Inputs zur Modellierung***

#### **Globale SSP-Treiber**

Die Entwicklung des Bruttoinlandproduktes (BIP) ist der relevante SSP-Treiber bei der Quantifizierung des zukünftigen Wasserbedarfs des Wirtschaftssektors (s. Kap. 2.3.6.2). Im Szenario „Aufklärung 2.0“ wird die BIP-Projektion aus dem globalen SSP1-Szenario verwendet (Wang & Sun, 2023; Wang & Sun, 2022; Dellink et al., 2017; Leimbach et al., 2017; Riahi et al., 2017). Für Deutschland zeichnet sich ein optimistischer Weg in die Zukunft ab, bei dem die deutsche Wirtschaftsstruktur durch internationale Zusammenarbeit und Nachhaltigkeit gestützt werden. Dadurch wird eine wirksame Anpassung an den Klimawandel ermöglicht, die zu einem relativ stabilen, wenn auch langsameren langfristigen BIP-Wachstum führt. Bis zum Jahr 2100 wird mit einem Anstieg des BIP um 115 % (im Vergleich zum Referenzwert 2022: 3,88 Billionen Euro) auf 8,36 Billionen Euro gerechnet. (Die Darstellung der zukünftigen BIP-Entwicklung Deutschlands im SSP1-Szenario ist in Anlage B zu finden.)

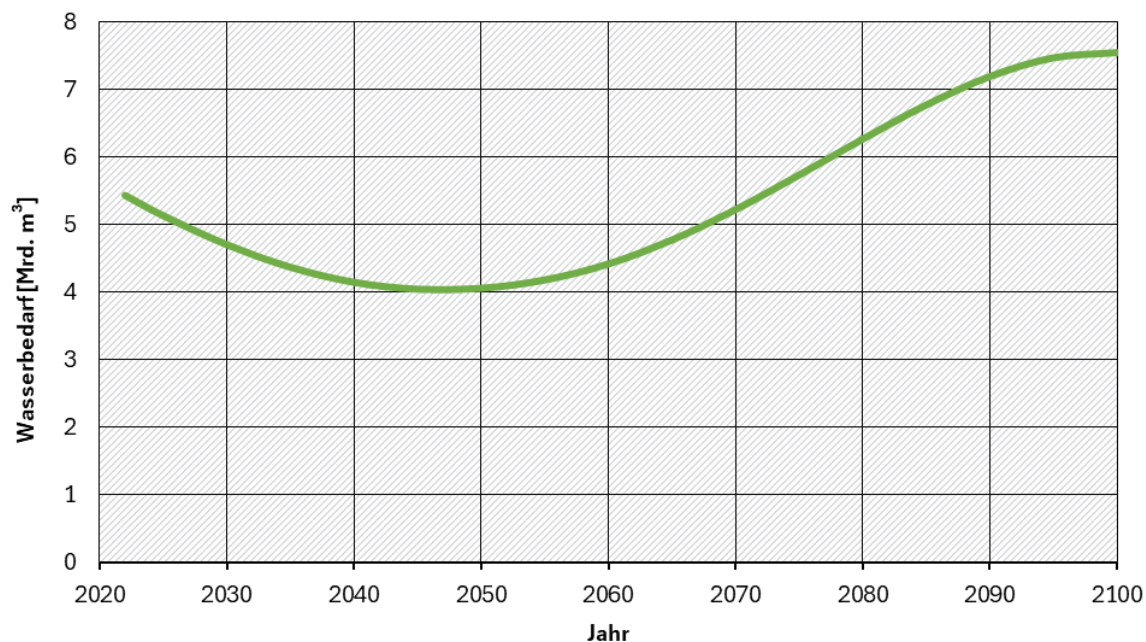
#### **Annahmen aus Fachworkshops**

Die Wassernutzungsintensität des Wirtschaftssektors folgt dem historischen Trend und halbiert sich bis 2050 auf 3,8 m<sup>3</sup> je 1.000 Euro Bruttowertschöpfung. Ursache dafür sind eine effizientere Wassernutzung sowie der verstärkte Einsatz von Kreislaufführung. In den darauffolgenden Jahren bleibt die Wassernutzungsintensität konstant, das verarbeitende Gewerbe gewinnt jedoch an Bedeutung. Durch eine frühzeitige Umstellung auf grüne Technologien siedelt sich ab 2050 wieder vermehrt Fertigungsindustrie in Deutschland an. Der Anteil der Bruttowertschöpfung am BIP steigt bis 2050 um 10 % an, danach erhöht sich dieser bis auf 25 % im Jahr 2100. Ausschlaggebend ist die Halbleiter- und Chipproduktion, was jedoch mit einer Zunahme wasserintensiver Industrie verbunden ist.

### Modellierter Wasserbedarf für den Wirtschaftssektor

Abbildung 15 zeigt den Verlauf des zukünftigen Wasserbedarfs für den Wirtschaftssektor (ohne Energie und Bergbau) in Deutschland für das Szenario „Aufklärung 2.0“. Im Referenzjahr 2022 betrug der Wasserbedarf in diesem Sektor 5,44 Milliarden m<sup>3</sup>. Aus Basis der Szenario-Annahmen wird der Wasserbedarf der Wirtschaft aufgrund des technischen Fortschritts (z. B. Kreislaufführung) und der damit einhergehenden Halbierung der Wassernutzungsintensität bis zum Jahr 2050 auf 3,8 m<sup>3</sup> pro 1.000 € Bruttowertschöpfung sinken. In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts stabilisiert sich die Wassernutzungsintensität zwar auf dem Niveau des Jahres 2050. Doch ab 2050 erhöht sich der Anteil der wasserintensiven Industrie, z. B. durch Ansiedelung von Halbleiter- und Chipproduktion, was wiederum in einem Anstieg des Wasserbedarfs resultiert. Dies führt insgesamt zu einer Zunahme des Wasserbedarfs im Wirtschaftssektor um 39 % bis zum Jahr 2100 im Vergleich zum Referenzwert 2022 .

**Abbildung 15: Modellierter Wasserbedarf des Wirtschaftssektors im Szenario „Aufklärung 2.0“ von 2022 bis 2100.**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

### Energie:

Im Energiesektor werden die Wasserbedarfe für die Kühlung in der thermischen Stromproduktion sowie für die Wasserstoffherstellung berücksichtigt.

### Globale SSP-Treiber

Zur Quantifizierung der zukünftigen Kühlwasserbedarfe in Wärmekraftwerken sind die Entwicklung der thermischen Elektrizitätsproduktion und der Energieträger die relevanten SSP-Treiber (s. Kap. 2.3.6.5). Im Szenario „Aufklärung 2.0“ wird die Energieprojektion für die Stromerzeugung aus dem globalen SSP1-Szenario verwendet (Bauer et al., 2017; van Vuuren et al., 2017). SSP1 geht von einer nachhaltigen Entwicklung aus, bei der der Gesamtenergiebedarf durch Verhaltensänderungen gesenkt wird. Dies hat erhebliche Auswirkungen auf den künftigen Bedarf an erneuerbaren Brennstoffen (z. B. ein Anteil von 10–20 % am gesamten Energiebedarf bis 2050 weltweit bzw. in Europa). Deutschlands Energieprognosen unter dem SSP1-Szenario

zielen auf Nachhaltigkeit und die Ziele des Pariser Abkommens ab und konzentrieren sich stark auf den raschen Ausbau erneuerbarer Energien (Solar, Wind), eine tiefgreifende Elektrifizierung, grünen Wasserstoff sowie den Ausstieg aus Kohle und Atomkraft. Im Referenzjahr 2020 lag die thermische Stromerzeugung bei ca. 279,2 TWh. Die zukünftige Entwicklung der thermischen Elektrizitätsproduktion in Deutschland ist gekennzeichnet durch einen deutlichen Rückgang bis 2100 (-52 %) im Vergleich zum Referenzjahr. Fossile Energieträger verlieren zunehmend an Bedeutung; lediglich Erdgas kommt bis zum Ende des Jahrhunderts zum Einsatz (rückläufig im Vergleich zum Referenzjahr). Neben Erdgas trägt die Verbrennung von Biomasse (Abfälle und landwirtschaftliche Reststoffe; Mensah et al., 2025) zunehmend, wenn auch begrenzt, zur thermischen Elektrizitätsproduktion bis 2100 bei. (Die Darstellung der zukünftigen Entwicklung der thermischen Stromerzeugung Deutschlands im SSP1-Szenario ist in Anlage B zu finden.)

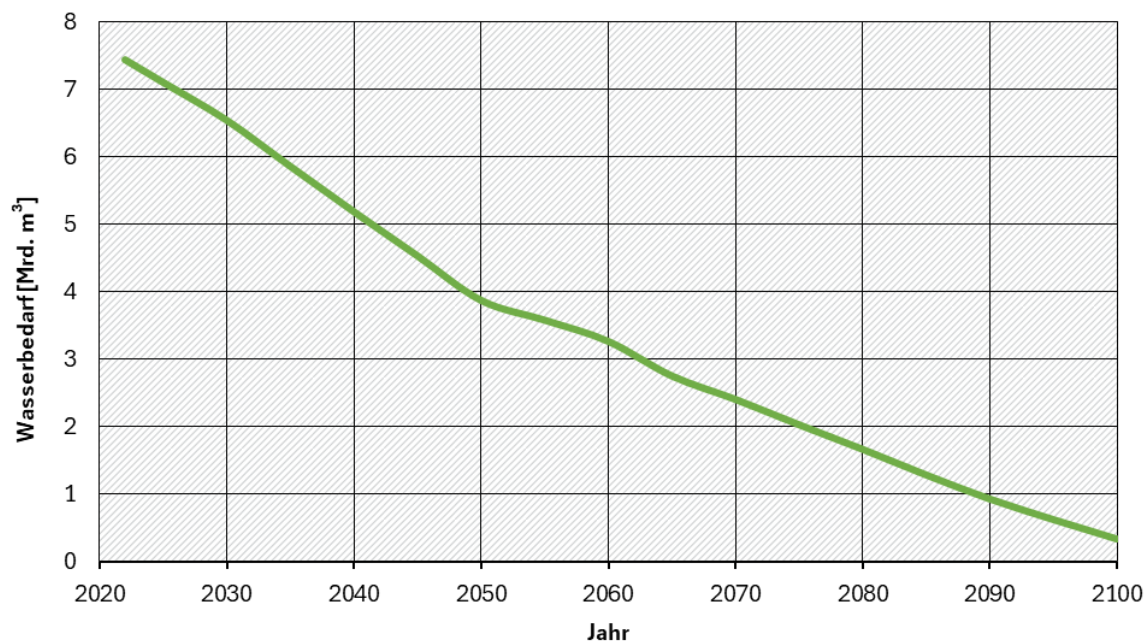
### **Annahmen aus Fachworkshop**

Durch Investitionen in die Kühlsysteme reduziert sich die Wassernutzungsintensität der Kraftwerke und sinkt bis 2075 um 10 %. Weitere Effizienzgewinne tragen dazu bei, dass die Intensitäten 2100 nur noch 85 % des Ausgangswertes entsprechen. Die verbliebenen Anlagen zur thermoelektrischen Energieerzeugung werden schrittweise auf Kühlsysteme mit geringem Wasserbedarf (Kühltürme) umgerüstet, sodass 2100 keine andere Kühlmethode mehr genutzt wird.

### ***Modellierter Wasserbedarf für thermische Stromerzeugung***

Der Wasserbedarf des Energiesektors zur Kühlung thermischer Kraftwerke sinkt ab 2022 im Szenario „Aufklärung 2.0“ rapide (Abbildung 16). Durch die Abkehr von fossilen Energieträgern wie Kohle und Gas sowie den Fokus auf erneuerbare Energien muss deutlich weniger Wasser zur Kühlung aus der Umwelt entnommen werden. Von 7,69 Mrd. m<sup>3</sup> im Referenzjahr 2020 sinkt der Wasserbedarf beinahe linear auf etwa 0,35 Mrd. m<sup>3</sup> am Ende des Jahrhunderts. Somit werden durch den Fokus auf erneuerbare Energien und Investitionen zur Anpassung der Kühlsysteme sowie Effizienzgewinne etwa 95 % der Wasserbedarfe im Energiesektor (ohne Wasserstoffproduktion) eingespart. Da die Kernfusion in diesem Szenario erst gegen Ende des 21. Jahrhunderts relevant wird und keine Angaben zur Art der Stromerzeugung und zu den Kühlsystemen vorliegen, wird der mögliche Wasserbedarf nicht quantifiziert.

**Abbildung 16: Modellierter Wasserbedarf (Kühlwasser) des Energiesektors im Szenario „Aufklärung 2.0“ von 2020 bis 2100.**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

### **Wasserstoff:**

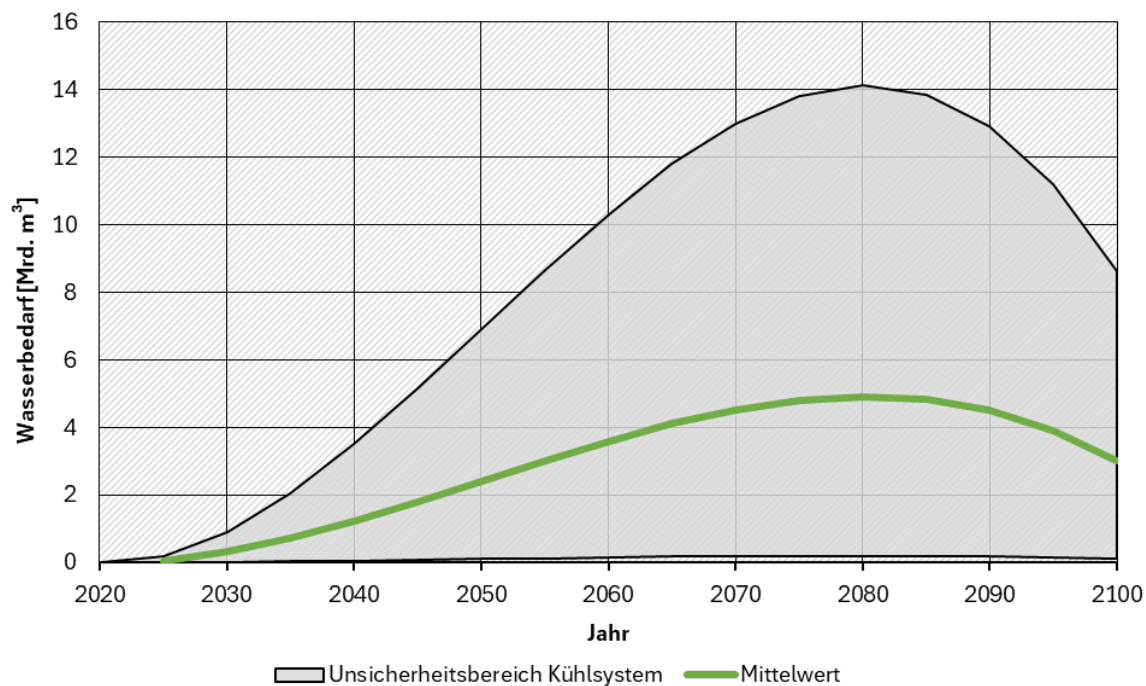
#### **Annahmen aus Fachworkshop**

Der Ausbau der Wasser-Elektrolyse für die Wasserstoff-Produktion folgt im Szenario „Aufklärung 2.0“ der Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie des Bundes, die bis 2030 einen Ausbau von 10 GW angibt. In den folgenden Jahren steigt die Kapazität mit der gleichen Geschwindigkeit, sodass bis 2050 Anlagen mit 40 GW installiert sind. Wasserstoff wird ein wichtiger Energieträger, um die Umstellung auf erneuerbare Energien erfolgreich zu gestalten. Bis 2075 steigt die Kapazität weiter auf 80 GW an und erreicht dort den Hochpunkt. Die Umstellung ist erfolgreich verlaufen und weitere Kapazitäten werden nicht mehr benötigt. Alte Anlagen werden zudem aus dem Betrieb genommen, sodass die Kapazität 2100 wieder auf 50 GW absinkt.

#### **Modellierter Wasserbedarf für Wasserstoff**

Der Wasserbedarf durch die Produktion von Wasserstoff und der Kühlung der Elektrolyse-Anlagen kann nur als Wertebereich modelliert werden (Abbildung 17), da nicht bekannt ist, welche Kühlsysteme derzeit und zukünftig verwendet werden (s. Kap. 2.3.6.6) und welche Standortbedingungen für die jeweiligen Systeme gegebenenfalls vorliegen müssen. Mit der Annahme einer Laufzeit von 4000 Stunden im Jahr steigt der Bedarf analog zum Ausbau der Kapazitäten ab dem Referenzwert von < 100 Mio. m<sup>3</sup> (2025) stark an und erreicht im Jahr 2080 den höchsten Wert. Je nach Kühlsystem wird der Wasserbedarf dort zwischen 14 Mrd. m<sup>3</sup> und 0,2 Mrd. m<sup>3</sup> liegen, im Mittel der verschiedenen Systeme bei 5 Mrd. m<sup>3</sup>. Bis 2100 fällt der Wasserbedarf wieder auf 3 Mrd. m<sup>3</sup> ab (max. 8,6 Mrd. m<sup>3</sup>; min. 0,13 Mrd. m<sup>3</sup>). In der weiteren Betrachtung wurde der mittlere Wert gewählt.

**Abbildung 17: Modellierter Wasserbedarf der Wasserstoff-Produktion durch Wasser-Elektrolyse im Szenario „Aufklärung 2.0“ von 2025 bis 2100.**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

#### **Landwirtschaft:**

##### ***Annahmen zur Modellierung***

##### **RCP-Szenario: RCP2.6**

Das Szenario „Aufklärung 2.0“ wurde mit dem Klimawandelszenario RCP2.6 verknüpft, das eine erfolgreiche Bekämpfung des Klimawandels bis zum Ende des 21. Jahrhunderts annimmt. Bis zur Mitte des Jahrhunderts treten dabei noch verstärkte Extremwetterereignisse auf, die in der Landwirtschaft vor allem die Erträge von Sommerfeldfrüchten wie Mais und Kartoffeln reduzieren und gleichzeitig den potenziellen Bewässerungsbedarf heben. Bis zum Ende des Jahrhunderts gehen diese Effekte aufgrund erfolgreichen Klimaschutzes wieder zurück (Heilemann et al., 2024).

##### **Globale SSP-Treiber:**

Für die Projektion des landwirtschaftlichen Wasserbedarfs werden globale Agrarpreisindexprojektionen aus Popp et al. (2017) genutzt. Hier wurden Agrarpreisveränderungen mithilfe von fünf Integrated Assessment Modellen (IAM) für alle SSPs projiziert, wobei jeweils ein IAM als Referenzmodell („Marker-Modell“) pro SSP ausgewählt wurde.

Für SSP1 ist dies das Modell IMAGE-MAGNET. Dieses Modell projiziert für OECD-Länder wie Deutschland in SSP1-RCP2.6 aufgrund der in diesem Szenario vorherrschenden geringeren Nachfrage nach Agrarrohstoffen, einem schnellen Wachstum der landwirtschaftlichen Produktivität und einem globalisierten Handel leicht fallende Agrarpreise bis zum Ende des Jahrhunderts. Dennoch existiert in diesem Szenario eine hohe Unsicherheit über die zukünftigen Agrarpreise. Die anderen vier IAMs projizieren teilweise auch Agrarpreisanstiege, da jedes IAM

andere Annahmen z. B. über Klimaschutzmaßnahmen trifft, die die Agrarpreise erheblich beeinflussen.

### Annahmen aus Fachworkshops:

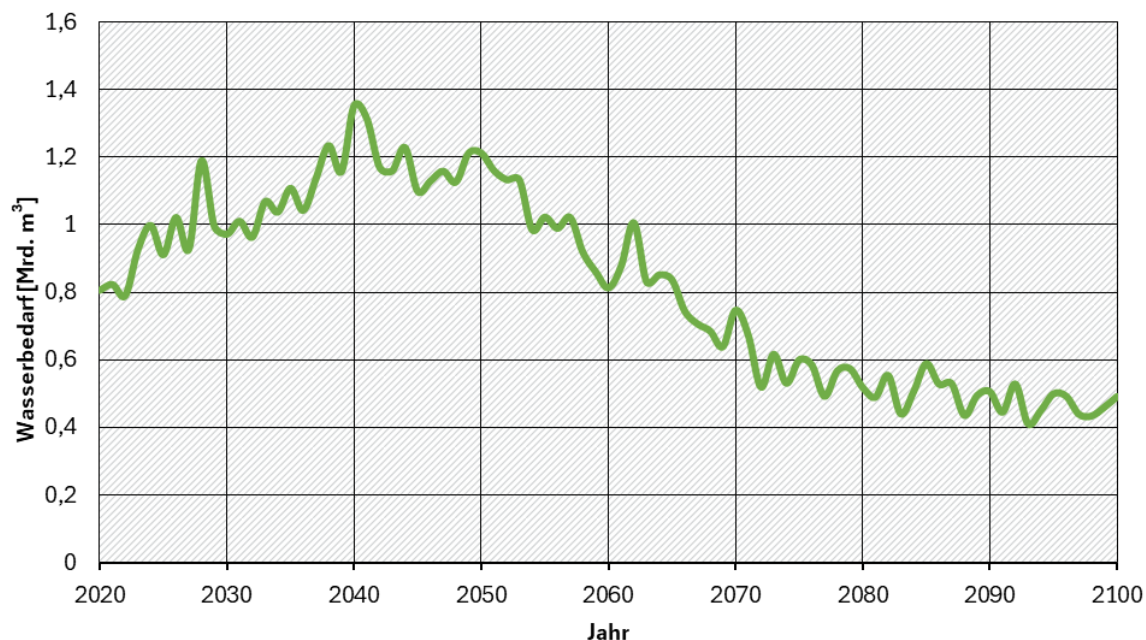
Zusätzlich zu den globalen Agrarpreisprojektionen wurden bestimmte Annahmen aus den Fachworkshops in die Modellierung integriert. Für das Szenario „Aufklärung 2.0“ wurden im Szenarienentwicklungsprozess einige Aspekte genannt, die sich bereits mit vorhandenen Modellannahmen decken, z. B. auftretende Dürrejahre im Zeitraum 2025-2050, die zu einem Umdenken in der Gesellschaft führen (diese sind Teil des Klimawandelszenarios RCP2.6).

Als zusätzliche Annahmen wurden in die Modellierung aufgenommen:

- ▶ **Auslaufen der pauschalen flächenbezogenen Subventionen** ab 2035, umgesetzt über eine Verringerung der Subventionszahlungen pro Hektar für den Feldfruchtanbau.
- ▶ **technischer Fortschritt und grüne Technologien zur Anpassung landwirtschaftlicher Anbausysteme**, umgesetzt über die Integration einer günstigen Tröpfchenbewässerungstechnologie für den Feldfruchtanbau.

Bestimmte Inputs aus der Szenarienentwicklung konnten aufgrund der Modellgrenzen nicht direkt aufgenommen werden. Beim Szenario „Aufklärung 2.0“ handelt es sich dabei um landwirtschaftliche „Carbon Dioxide Removal“ (CDR) Maßnahmen und Maßnahmen zur Schließung von Ressourcenkreisläufen, die hier eine Rolle spielen, deren Wasserbedarf aufgrund von fehlenden Daten momentan aber noch nicht modelliert werden kann.

**Abbildung 18: Modellierter Wasserbedarf für die Landwirtschaft**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

Der projizierte Wasserbedarf der Landwirtschaft (Abbildung 18) steigt erst bis 2040 an (bis zu 67 % Steigerung im Vergleich des Ausgangswertes von 0,81 Mrd. m<sup>3</sup> im Jahr 2020<sup>28</sup> und 1,35 Mrd. m<sup>3</sup> im Jahr 2040) und entwickelt sich dann rückläufig. Ab ca. dem Jahr 2060 sinkt der landwirtschaftliche Wasserbedarf unter das heutige Niveau, und erreicht zum Ende des Jahrhunderts (2080-2098) durchschnittlich 60 % des Ausgangsniveaus von 2020. Hierbei bleibt der Wasserbedarf von Gemüse relativ konstant. Das leichte Wachstum des Wasserbedarfs bis zur Mitte des Jahrhunderts wird verstärkt durch die Annahme der Option zur günstigen Bewässerung von Feldfrüchten mit Tröpfchenbewässerungssystemen. Entgegengesetzt zur Erwartung, dass die höhere Wassernutzungseffizienz direkt zu einem geringeren Wasserbedarf führt, wird dadurch die Bewässerungsfläche erst weiter ausgeweitet, da die Einführung dieser günstigen Bewässerungsoption für mehr Flächen profitabel wird. Die rückläufige Entwicklung ab 2040 ist außerdem eng mit den leicht sinkenden globalen Agrarpreisen in SSP1 und dem damit verbundenen Rückgang der Investitionen in Bewässerungssysteme für Feldfruchtabbau verknüpft. Die Annahme zum Subventionsabbau wirkt sich wiederum nicht merklich auf den modellierten landwirtschaftlichen Wasserbedarf aus.

Bei diesem Ergebnis gilt zu berücksichtigen, dass die Agrarpreisprojektionen hohe Unsicherheiten aufweisen und einen großen Einfluss auf die projizierte Bewässerungsnachfrage für Feldfrüchte haben. Außerdem wurde im Modellierungsansatz nicht direkt berücksichtigt, dass ein geringerer Fleischkonsum in SSP1 eine große Rolle spielt. Diese Entwicklung könnte auch den zukünftigen Wasserbedarf in diesem Szenario beeinflussen.

### **Gesamtwasserbedarf**

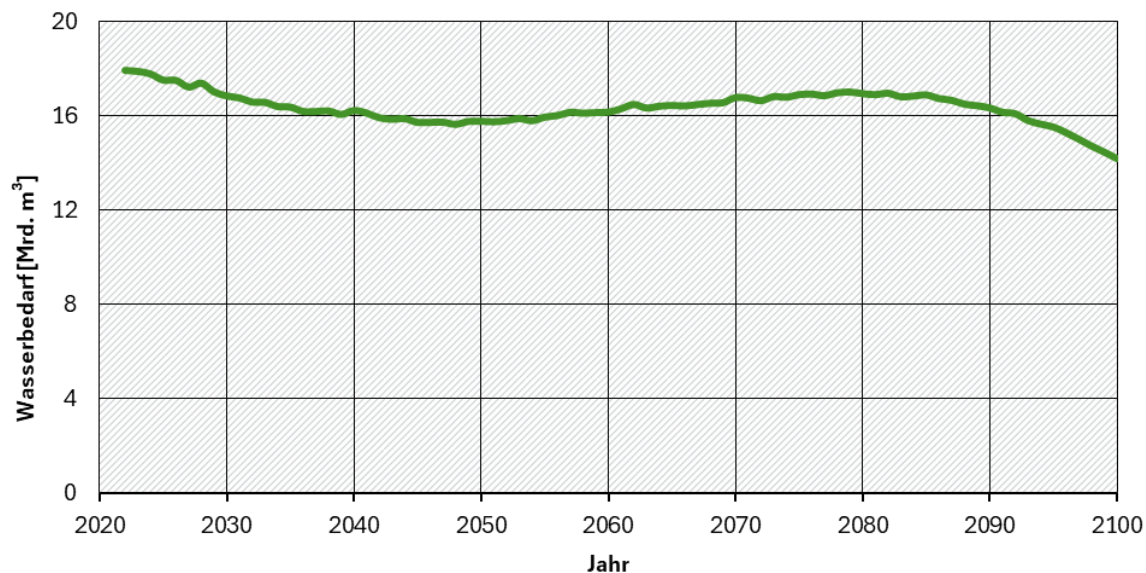
Unter Berücksichtigung der globalen SSP-Treiber und ergänzenden Annahmen aus dem entwickelten Narrativ oben lässt sich eine Entwicklung des Gesamtwasserbedarfs (zusammengesetzt aus den Sektoren Wirtschaft, Landwirtschaft, Haushalte und Energie) für Deutschland abschätzen.

Der Wasserbedarf im Szenario „Aufklärung 2.0“ sinkt im modellierten Zeitraum von 18 Mrd. m<sup>3</sup> auf 14 Mrd. m<sup>3</sup> (Abbildung 19). Die Landwirtschaft hat dabei kaum Einfluss auf die Gesamtentwicklung: der Bewässerungsbedarf ist im Vergleich zum Gesamtbedarf gering und geht ab 2050 aufgrund leicht sinkender globaler Agrarpreise sogar zurück. Im Energiesektor ist ein deutlicher Rückgang des Wasserbedarfs für Kühlzwecke in der thermischen Elektrizitätsproduktion zu verzeichnen, was vor allem auf den verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien zurückzuführen ist; allerdings steigt der Wasserbedarf durch den Ausbau der Wasserstoffproduktion an und gleicht so den Rückgang teilweise aus. Im Wirtschaftssektor ist hingegen ein Anstieg des Wasserbedarfs zu erwarten, da sich die wasserintensive Industrie ausweitet und ein moderates Wirtschaftswachstum stattfindet. Der Wasserbedarf der Haushalte nimmt ab, was sowohl auf sinkende Bevölkerungszahlen als auch auf Effizienzsteigerungen und einen rückläufigen Pro-Kopf-Verbrauch zurückzuführen ist. Insgesamt gleichen sich die gegenläufigen Entwicklungen der einzelnen Sektoren weitgehend aus, trotzdem sinkt der Gesamtwasserbedarf im Vergleich zum Referenzwert um 22 %.

---

<sup>28</sup> Referenz bezieht sich auf die modellierte Bewässerungsmenge für Feldfrüchte und Gemüse im Jahr 2020 (Ansatz beschrieben in Kapitel 2.3.6.4).

Abbildung 19: Prognostizierter Wasserbedarf im Szenario „Aufklärung 2.0“ (eigene Darstellung)



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

### 3.1.3 Rückzugskampf (Szenario SSP3)

Druck auf Wasserressourcen: **Hoch**; Ungleichheit: **Hoch**.

#### 3.1.3.1 Rückzugskampf: Szenario-Narrativ

##### Die globale Umwälzung erreicht Deutschland

Ab Mitte der 2010er-Jahre beginnt mit der Annexion der Krim, dem Brexit und den US-Präsidentenwahlen international ein Weg, weg von Globalisierung und hin zu nationaler Orientierung. Mitte der 20er-Jahre wird Deutschland Zeuge einer durch die USA betriebenen Umwälzung der internationalen Beziehungen, welche zu einer Schwächung internationaler Organisationen und zum Zusammenbruch des globalisierten weltweiten Handelssystems führt. Unter dem dadurch noch gestiegenen Exportdruck Chinas und dessen disruptiven Technologie-Innovationen sieht sich die EU gezwungen, selbst auch hohe Zölle gegen viele Staaten zu verhängen, um die eigene Wirtschaft und Wohlfahrt zu schützen. Dies geht einher mit einer stetigen Bedrohung der Sicherheit durch Russland, welche hohe Rüstungsausgaben in den Staaten der EU zur Folge haben. Der drohende Wohlfahrtsverlust bei weiterhin hohem Migrationsdruck führt zu Unzufriedenheit und Ängsten unter den Bürger\*Innen, die sich in vielen Mitgliedstaaten der EU in Wahlsiegen national-orientierter Kräfte zeigen. Die EU wird damit zunehmend handlungsunfähig, was Bündnisse einzelner europäischer Staaten untereinander hervorbringt. Gegen Ende der 2020er-Jahre kommt in Deutschland auf Bundesebene eine nationalstaatlich-orientierte Regierung an die Macht.

##### Bis 2050: Der Rückzug auf das eigene Land

Deutschland schottet Zuwanderung ab und setzt auf Eigenständigkeit in einem Europa der Nationalstaaten. Eine Abwanderung aus Deutschland gestaltet sich angesichts der weltweiten Abschottungstendenzen schwierig. Staat und Gesellschaft werden zunehmend autoritär. Dabei bleibt internationaler und europäischer Handel zwar erhalten, aber bedingt durch die Zollstrukturen auf wesentlich geringerem Niveau, austariert zwischen nationalen Regierungen. Der globale Transport nimmt ab. In Deutschland wird die Kohle-, Gas und Ölförderung verstärkt (u. a. auch durch Fracking) und der Bergbau wiederbelebt (wie zum Beispiel zur Förderung von

Rohstoffen wie Kupfer und Lithium). Durch hohe internationale Zölle wird dies ebenso wie eine verstärkte Industrieproduktion im eigenen Land ökonomisch vergleichsweise attraktiv. Dies gilt auch für wassergekühlte Atomtechnologie. Die wasserintensive Wirtschaft kehrt ins Land zurück.

In der Landwirtschaft werden weniger Lebensmittel importiert und exportiert – es kommt dadurch in Deutschland einerseits zu einer geringeren Nutztierhaltung, andererseits zu einer Intensivierung der Landwirtschaft, in der auch begünstigt durch höhere Temperaturen vermehrt wasserintensive Nahrungsmittelpflanzen wie Paprika und Avocados angebaut werden. Die Flächennutzung für Produktion erhöht sich stark. Die Bevölkerung nimmt bis 2050 durch die verminderte Migration leicht ab. Es werden Anreize gegeben, um die Geburtenrate zu erhöhen. Arbeitskräftemangel ist eine große Herausforderung in der Wirtschaft. Sie wird durch weitgehende Automatisierung, einen durch Verringerung sozialer Leistungen erhöhten Beschäftigungsgrad und Erhöhung der Arbeitszeit teilweise ausgeglichen. Günstiger Urlaub im eigenen Land hat Konjunktur. Das Interesse an Auslandsreisen und anderen Kulturen geht massiv zurück. Regionale Produkte gewinnen an Bedeutung als Unterscheidungsmerkmal zwischen Destinationen. In Deutschland nehmen Tagesreisen, Kurzurlaubsreisen und Binnentourismus in den Segmenten Camping, Ferienhausurlaub und großflächige Indoor-Badelandschaften mit Strand und Wärme stark zu - solange das Wasser dafür nicht zu teuer wird.

Der Wasserbedarf insgesamt steigt in Deutschland und ist zum Teil nicht mehr durch die vorhandenen Ressourcen gedeckt. Steigende Wasserpreise sind die Folge; zugleich wird Trinkwasser vermehrt aus der Leitung statt aus der Flasche konsumiert. In Regionen mit abnehmender Bevölkerung drohen Effizienzprobleme in der Trinkwasserversorgung. Die Bewässerung in der Landwirtschaft steht vor Herausforderungen saisonaler Bedarfsspitzen. Sinkende Grundwasserstände und Dürren treten regional sehr unterschiedlich auf. Diese Gemengelage führt zu sozialen Konflikten um Wasser. Auch kommt es immer wieder zu Wasserkonflikten in und zwischen deutschen Regionen. Insbesondere die Metropolregionen mit ihrem hohen Wasserbedarf sind betroffen. Die Fernwasserversorgung gerät unter Druck. Auch international und europäisch gewinnt die Ressource Wasser an Bedeutung und Wert. Der Ruf nach technischem Rückhalt von Wasser wird innerhalb Deutschlands lauter – aber auch international, wo unter anderem ein Projekt des Staudammbaus für die Elbe durch Tschechien als Faustpfand in den Verhandlungen der beiden Staaten gebraucht wird. Konflikt droht auch durch französische Wasserentnahmen aus dem Rhein. Der Wasserbedarf der Ökosysteme nimmt zu. Gleichsam verringert sich der Rückhalt in den Ökosystemen als Folge verminderten Naturschutzes, steigender Temperaturen und höherer Wasserentnahmen.

### **Bis 2075: Konflikte und Klimawandel spielen dem Rückzug in die Hände**

Die Umwälzung der internationalen Systeme ist von Dauer. Mit den zerstörten internationalen und abgebauten europäischen Strukturen sowie den Investierungsprozessen auf allen Ebenen sind weltweit und in Deutschland Fakten geschaffen, die nicht einfach wieder verändert werden können. Der Innovationsgrad in der Wirtschaft leidet, geschwächt durch den stark reglementierten internationalen Austausch. Der individuelle Wohlstand geht zurück. Die Verteilungskämpfe führen auch international zu einer Normalität der Spannungen zwischen den Staaten, die zu gewaltsamen Auseinandersetzungen führen.

Paradoxerweise spielt dabei auch der verstärkte Klimawandel einem verstärkten Rückzug auf das eigene Land in die Hände: es fehlt die Zuversicht, den Klimawandel international wirksam bekämpfen zu können und somit geht der Blick auf die Anpassung – wenigstens soll es einem selbst besser gehen als den anderen. In den Jahren ab 2050 gibt es in Deutschland bis zu 35

Hitzetage pro Jahr. Es gibt mehr und mehr Hochwasserereignisse. Der Druck zu rigorosen Anpassungsmaßnahmen wird größer, insbesondere für Landbau und Schifffahrt. In der Landwirtschaft wird zunehmend Wasser wiederverwendet und es werden Feldfrüchte mit weniger Wasserbedarf angepflanzt. Aufbereitungen und Kreislaufführungen für wirtschaftlich wichtige Ressourcen werden auferlegt. Mit Knappheit und Wert des Wassers steigen die Wasserpreise weiter.

### **Bis 2100: Alltägliche Anpassung an Katastrophen**

Bereits zu Anfang der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts wurden kriegerische Auseinandersetzungen zwischen den Ländern häufiger. Mit sich mehr und mehr verknappenden natürlichen Ressourcen verstärkt sich dies noch im letzten Vierteljahrhundert. Vorsprung in Technologie und militärische Macht verleiten dazu, Zugang zu Ressourcen durch Erpressung und gewalttätige Aneignung zu erlangen – auch für Wasser. Verminderte Biodiversität führt zu einem stillen Frühling (Silent Spring), wodurch Bestäubung in der Landwirtschaft durch Drohnen oder per Hand durchgeführt werden muss. Gegen Ende des 21. Jahrhunderts hat die Welt keine Gletscher mehr. In Deutschland gibt es regional über 50 heiße Tage pro Jahr. Anpassung an Katastrophen ist alltäglich geworden. Die Bevölkerung Deutschlands ist auf ca. 40 Millionen Personen gesunken.

### **Abbildung 20: Illustration Rückzugskampf im Jahre 2100 (Quelle KI Gemini)**

---



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

### 3.1.3.2 Rückzugskampf: Modellierter Wasserbedarf

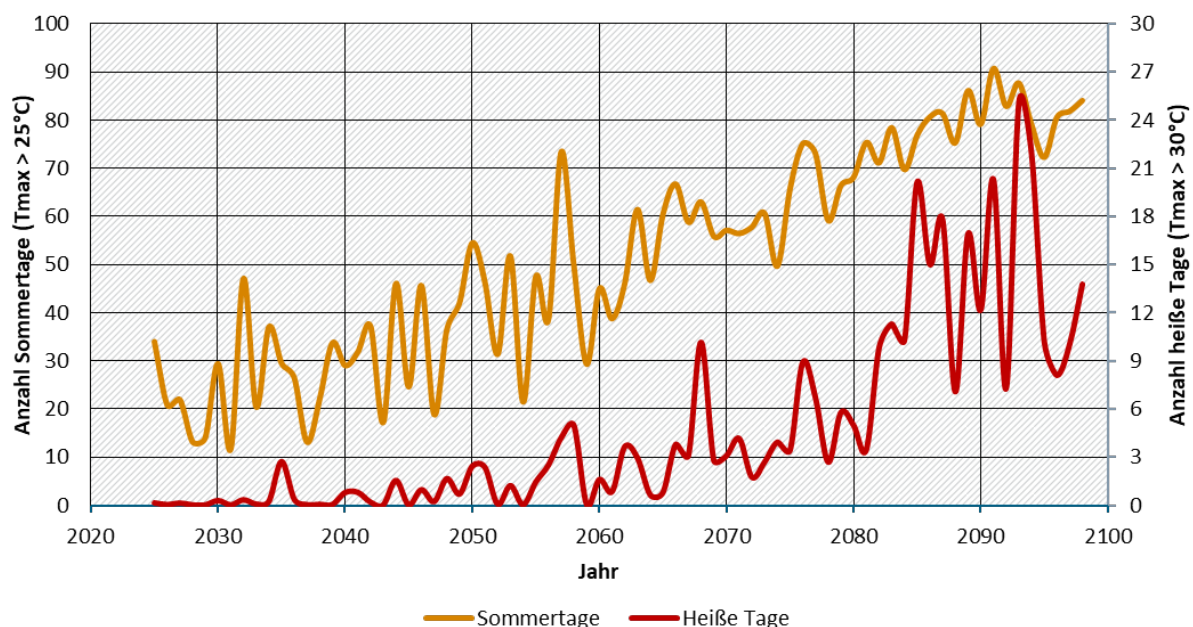
Haushalte:

#### Inputs zur Modellierung

#### RCP-Szenario: RCP8.5

Das Szenario „Rückzugskampf“ wurde mit dem Klimawandelszenario RCP8.5 verknüpft. Die Anzahl der zukünftigen Sommertage ( $>25\text{ °C}$ ) und heißen Tage ( $>30\text{ °C}$ ) wurde dem entsprechenden Klimamodellensemble (s. Kap. 2.3.5) aus der Studie von Heilemann et al. (2024) entnommen. In Abbildung 21 ist der Verlauf der Anzahl der Tage pro Jahr und NUTS-3-Region als Medianwert des Modellensembles für Deutschland dargestellt. Die Anzahl der Sommertage variiert stark und liegt zwischen 10 und 90 Tagen. Bis Ende der 2040er-Jahre liegen die meisten Werte zwischen 20 und 40 Tagen. Anschließend nimmt die Anzahl der Sommertage kontinuierlich zu. Ab dem Jahr 2060 ist ein steiler Anstieg zu beobachten. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts gibt es über 80 Sommertage. Das Niveau der Anzahl heißer Tage erhöht sich bis zum Jahr 2050, d. h., es gibt in einigen Jahren ca. drei heiße Tage (je NUTS-3-Region). Ab dem Jahr 2060 ist ebenfalls bei der Anzahl der heißen Tage ein deutlicher Anstieg zu erkennen. In den letzten beiden Jahrzehnten des 21. Jahrhunderts liegt die Anzahl der heißen Sommertage bei über 10 Tagen und erreicht einen Maximalwert von 25 Tagen. Regional kann die Anzahl der Sommertage und heißen Tage variieren und deutlich höhere Werte erreichen.

**Abbildung 21: Durchschnittliche Anzahl an Tagen mit einer Tageshöchsttemperatur von über  $25\text{ °C}$  (Sommertage) und  $30\text{ °C}$  (heiße Tage) pro NUTS-3-Region im RCP-Szenario 8.5 (eigene Darstellung, Daten aus Heilemann, 2024)**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

#### Globale SSP-Treiber

Im Szenario „Rückzugskampf“ werden die Bevölkerungszahlen aus dem globalen SSP3-Szenario verwendet (Jones & O’Neill, 2016; Gao, 2017, 2020). Für Deutschland wird ein deutlicher Rückgang der Gesamtbevölkerung erwartet, verbunden mit einer Zunahme der älteren Bevölkerung. Die Projektion geht davon aus, dass die Bevölkerung in Deutschland zwischen

2030 und 2040 aufgrund geringer Fertilität möglicherweise unter 80 Millionen liegen wird. Die Migration ist begrenzt und es kommt in städtischen Gebieten zu einem Rückgang oder einer Stagnation. Es wird erwartet, dass die Einwohner\*innenzahl in Deutschland bis zum Jahr 2100 auf ca. 39,9 Millionen Einwohner\*innen sinken wird (-52 %). Im Jahr 2022 lag die Einwohner\*innenzahl bei ca. 84 Millionen. (Die Darstellung der zukünftigen Bevölkerungsentwicklung Deutschlands im SSP3-Szenario ist im Anlage B zu finden.)

### **Annahmen aus den Fachworkshops:**

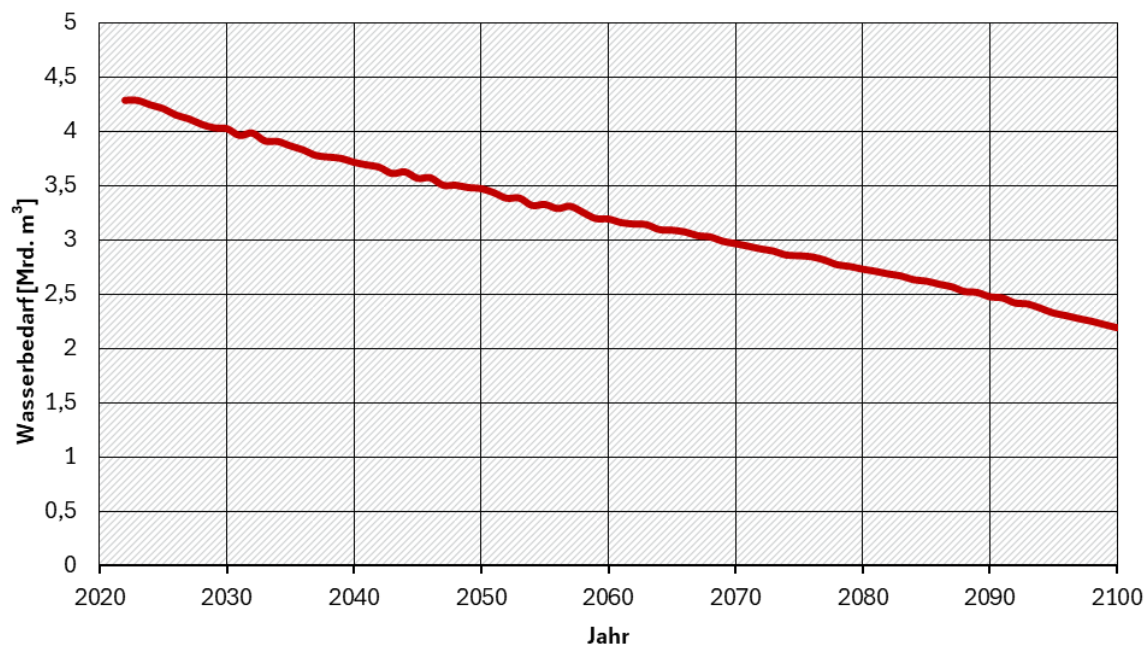
Zwischen 2025 und 2050 wird eine leichte Verringerung des Pro-Kopf-Wasserbedarfs um 5 % erwartet, der durchschnittliche Bedarf in den NUTS-3-Regionen sinkt somit von 126 auf 120 Liter Wasser pro Kopf und Tag. Diese Reduktion ist hauptsächlich auf Effizienzsteigerungen zurückzuführen, die jedoch aufgrund geringer Einkommen und verringerter Nutzung wasserintensiver Aktivitäten begrenzt ist. Fixe Infrastrukturkosten sind auf weniger Einwohner verteilt, was zu Preissteigerungen einerseits und Wassereinsparung andererseits führt. Von 2050 bis 2075 wird der Pro-Kopf-Bedarf voraussichtlich wieder auf den Ausgangswert von 2025 zurückkehren, also 126 Liter pro Kopf und Tag. Dieser Anstieg ist hauptsächlich auf stärkere und häufigere Hitzeereignisse zurückzuführen, die den Wasserbedarf für Kühlung und Bewässerung erhöhen. Trotz der anfänglichen Effizienzsteigerungen und der verringerten Nutzung wasserintensiver Aktivitäten wird der erhöhte Bedarf durch die Hitzeereignisse ausgeglichen. Zwischen 2075 und 2100 wird eine weitere leichte Steigerung des Pro-Kopf-Bedarfs um 3 % gegenüber dem Wert von 2025 erwartet, im Mittel also auf 130 Liter pro Kopf und Tag. Auch dieser Anstieg ist auf die zunehmende Häufigkeit und Intensität von Hitzeereignissen zurückzuführen.

Der Wasserbedarf für den Tourismus ist im Haushaltssektor enthalten. In den Fachworkshops wurden sowohl quantitative als auch qualitative Information zur Entwicklung der Branche genannt. Zwischen 2025 und 2050 bleibt der Tourismus auf dem Niveau des Referenzwerts im Jahr 2025, also bei 100 % (ca. 34,4-34,8 Mio. m<sup>3</sup> pro Jahr). Obwohl in diesem Szenario weniger ausländische Touristen nach Deutschland kommen, wird dieser Rückgang durch eine Zunahme des Inlandstourismus ausgeglichen. Von 2050 bis 2075 wird der Tourismus jedoch auf 80 % des Referenzwerts zurückgehen. Dieser Rückgang ist auf sinkende Einkommen zurückzuführen, die sowohl den Inlandstourismus als auch den ausländischen Tourismus beeinträchtigen. In dieser Phase kann der Inlandstourismus den Rückgang ausländischer Touristen nicht mehr ausgleichen, was zu einer insgesamt geringeren touristischen Aktivität führt. Zwischen 2075 und 2100 wird der Tourismus weiter sinken (70 % des Referenzwerts). Sinkende Einkommen führen dazu, dass der Inlandstourismus weiter nachlässt und den Rückgang ausländischer Touristen noch weniger ausgleichen kann.

### **Modellierter Wasserbedarf für Haushalte**

Abbildung 22 zeigt den Verlauf des zukünftigen Wasserbedarfs im Haushaltssektor in Deutschland für das Szenario „Rückzugskampf“. Im Referenzjahr 2022 betrug der Wasserbedarf im Haushaltssektor 4,28 Milliarden m<sup>3</sup>. Getrieben von fallenden Bevölkerungszahlen und Wassereinsparungen reduziert sich der Wasserbedarf im Haushaltssektor um nahezu 50 % auf 2,19 Milliarden m<sup>3</sup> im Jahr 2100. Die geringfügigen Änderungen zwischen den Jahren sind auf klimatische Einflüsse zurückzuführen.

**Abbildung 22: Modellierter Wasserbedarf des Haushaltssektors im Szenario „Rückzugskampf“ von 2022 bis 2100.**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

#### **Wirtschaft:**

##### ***Inputs zur Modellierung***

##### **Globale SSP-Treiber**

Im Szenario „Rückzugskampf“ wird die BIP-Projektion aus dem globalen SSP3-Szenario verwendet (Wang & Sun, 2023; Wang & Sun, 2022; Dellink et al., 2017; Leimbach et al., 2017; Riahi et al., 2017). Für Deutschland zeichnet sich eine herausfordernde Zukunft ab: Regionale Konflikte und eine langsamere Anpassung an den Klimawandel werden zu wirtschaftlichen Belastungen und einem geringeren BIP führen. Klimabedingte Verluste bei der Arbeitsproduktivität tragen zu diesem Rückgang bei. Handelsverschiebungen durch stärkere Fokussierung auf Exporte innerhalb der EU-Region und weniger auf global integrierte Wertschöpfungsketten führen zu Verlusten. Im Jahr 2100 wird mit einem um -8 % geringeren BIP (3,57 Billionen Euro) im Vergleich zum Referenzwert 2022 gerechnet. (Die Darstellung der zukünftigen BIP-Entwicklung Deutschlands im SSP3-Szenario ist in Anlage B zu finden.)

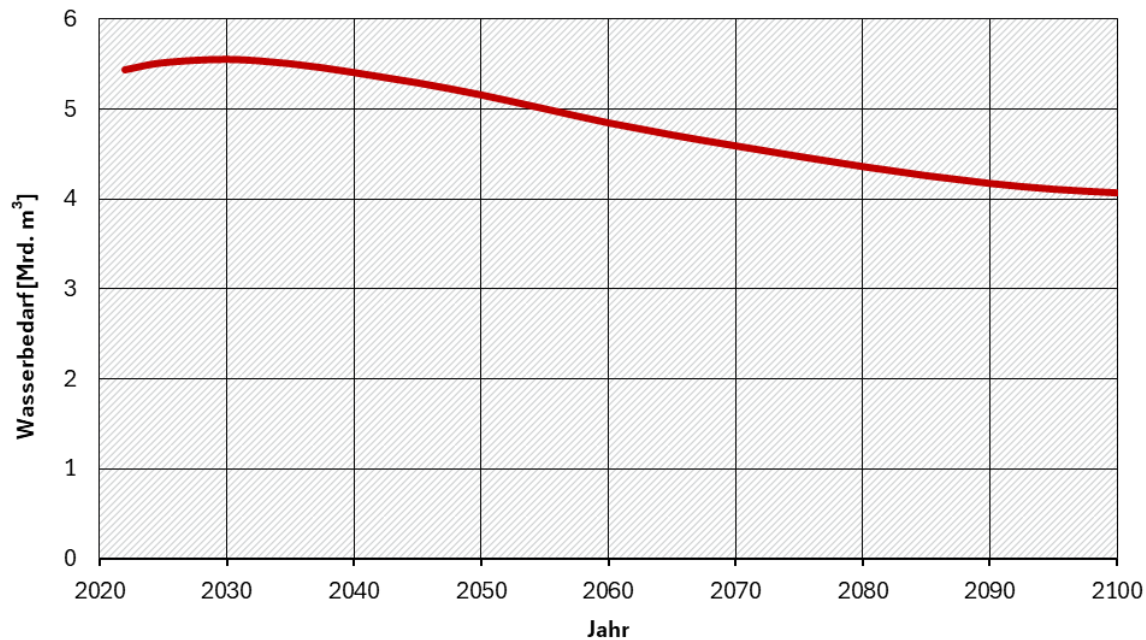
##### **Annahmen aus Fachworkshops**

Der Anteil des verarbeiteten Gewerbes an der gesamten Wirtschaftsleistung steigt an, da die Fertigungsindustrien in Deutschland angesiedelt werden (z. B. Halbleiter) und andere Wirtschaftszweige an Kaufkraft verlieren. 2050 erhöht sich der Anteil der Bruttowertschöpfung am BIP um 10 % und steigt dann linear bis 2100 auf 20 % an. Die Wassernutzungsintensität des Wirtschaftssektors folgt zunächst dem historischen Trend (7,6 m<sup>3</sup> pro 1000 Euro Bruttowertschöpfung), und reduziert sich dann auf 6 m<sup>3</sup> je 1000 Euro Bruttowertschöpfung im Jahr 2050 aufgrund von Effizienzgewinnen. In den darauffolgenden Jahren (bis 2075) verringert sich die Wassernutzungsintensität aufgrund vermehrter Wasseraufbereitung und Kreislaufführung weiter auf 5 m<sup>3</sup> pro 1000 Euro Bruttowertschöpfung und verbleibt auf diesem Niveau bis zum Ende des 21. Jahrhunderts.

### Modellierter Wasserbedarf für den Wirtschaftssektor

Abbildung 23 zeigt den Verlauf des zukünftigen Wasserbedarfs in der Industrie (ohne Energie und Bergbau) in Deutschland für das Szenario „Rückzugskampf“. Im Referenzjahr 2022 betrug der Wasserbedarf der Industrie 5,44 Milliarden m<sup>3</sup>. Nach einem kurzzeitigen Anstieg bis 2030 liegt der Wasserbedarf im Jahr 2050 etwa auf dem Niveau des Referenzjahres. Bis 2100 sinkt der Wasserbedarf der Industrie aufgrund zurückgehender Wirtschaftsleistung und reduzierter Wassernutzungsintensität um 25 % auf ca. 4,1 Milliarden m<sup>3</sup> im Jahr 2100.

**Abbildung 23: Modellierter Wasserbedarf des Wirtschaftssektors im Szenario „Rückzugskampf“ von 2022 bis 2100.**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

### Energie:

Im Energiesektor werden die Wasserbedarfe für die Kühlung in der thermischen Stromproduktion sowie für die Wasserstoffherstellung berücksichtigt.

### Globale SSP-Treiber

Im Szenario „Rückzugskampf“ wird die Energieprojektion für die Stromerzeugung aus dem globalen SSP3-Szenario verwendet (Bauer et al., 2017; Fujimori et al., 2017). Die Energieprognosen unter dem Szenario SSP3 prognostizieren einen signifikanten Anstieg des Energiebedarfs, der hauptsächlich durch eine erhöhte Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen gedeckt wird. Dieser Trend wird durch Nationalismus, begrenzte technologische Zusammenarbeit und erhebliche Herausforderungen bei der Eindämmung von Emissionen begünstigt. Die Folge sind erhebliche CO<sub>2</sub>-Emissionen, eine fragmentierte Energielandschaft mit höheren Energiekosten und langsameren Effizienzsteigerungen. Im Referenzjahr 2020 lag die thermische Stromerzeugung bei ca. 279,2 TWh. Die Entwicklung der thermischen Elektrizitätsproduktion in Deutschland unter SSP3 zeigt zunächst einen leichten Zuwachs von ca. 20 % bis 2050 im Vergleich zum Referenzjahr, gefolgt von einem stärkeren Anstieg auf das Doppelte zum Ende des 21. Jahrhunderts. Fossile Energieträger bleiben relevant, wobei Kohle leicht ansteigt, Öl nur geringfügig und Erdgas deutlich abnimmt. Geothermie und die Verbrennung von Biomasse nehmen zu, spielen jedoch bei der Elektrizitätsproduktion nur eine

untergeordnete Rolle. (Die Darstellung der zukünftigen thermischen Stromerzeugung in Deutschland im SSP3-Szenario ist in Anlage B zu finden.)

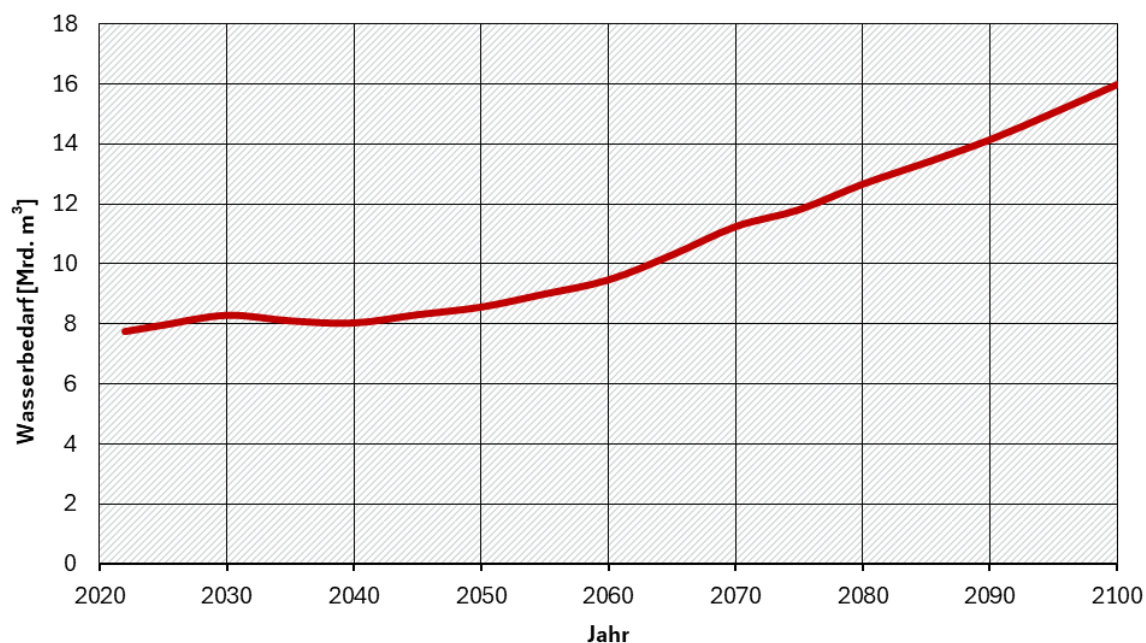
### Annahmen aus Fachworkshops

Die Wasserintensität der Kühlsysteme bleibt zunächst auf dem aktuellen Niveau. Erst am Ende des Jahrhunderts machen sich die Auswirkungen des Klimawandels bemerkbar und für die Kühlung der Anlagen wird 10 % mehr Wasser benötigt. Die Technologien der Kühlsysteme werden beibehalten und entsprechen dem Referenzjahr. Es gibt weder politischen Willen noch finanzielle Anreize, den Wasserbedarf durch den Umbau auf neue Kühlsysteme oder durch Effizienzsteigerungen zu reduzieren.

### Modellierter Wasserbedarf für thermische Stromerzeugung

Der Wasserbedarf im Energiesektor im Szenario „Rückzugskampf“ (Abbildung 24) wird insbesondere von den globalen SSP-Treibern beeinflusst. Bis 2040 steigt der Wasserbedarf für die Kühlung der thermischen Stromerzeugungsanlagen nur geringfügig auf etwa 8 Mrd. m<sup>3</sup> (Referenzwert 2020: 7,69 Mrd. m<sup>3</sup>). Der Rückgang der Stromerzeugung aus Erdgas wird durch den Anstieg der Kohle-Verstromung ausgeglichen. Ab 2040 übertrifft der Anstieg der Kohle-Verstromung den Rückgang des Erdgases, sodass der Wasserbedarf insgesamt ansteigt. Zudem führt der Klimawandel Ende des Jahrhunderts zu erhöhten Wasserbedarfen aufgrund verringerter Kühlleistung durch erwärmte Gewässer. Im Jahr 2100 benötigt der Energiesektor schließlich 16 Mrd. m<sup>3</sup> Wasser (+108 %).

Abbildung 24: Modellierter Wasserbedarf (Kühlwasser) des Energiesektors im Szenario "Rückzugskampf" von 2022 bis 2100.



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

### Wasserstoff:

Im Szenario „Rückzugskampf“ wird Wasserstoff nicht berücksichtigt. Die bestehende Kapazität bleibt unverändert.

## **Landwirtschaft:**

### ***Annahmen zur Modellierung***

#### **RCP-Szenario: RCP8.5**

Das SSP3-Szenario wurde mit dem Klimawandelszenario RCP8.5 verknüpft, das einen sehr hohen Klimawandel annimmt. Extremwetterereignisse steigen dabei kontinuierlich an, mit verstärkten Dürre- und Hitzeeinflüssen in Deutschland im späten 21. Jahrhundert. Dies führt zu einem deutlich steigenden theoretischen Bewässerungsbedarf und regelmäßigen Ertragseinbußen bei nicht-bewässerten Feldfrüchten (Heilemann et al., 2024; McNamara & Herrmann, 2024).

#### **Globale SSP-Treiber:**

Für SSP3 wurde das Modell AIM/CGE als Referenz-IAM ausgewählt (Popp et al., 2017). Dieses Modell projiziert für OECD-Länder wie Deutschland im Szenario SSP3-RCP8.5 steigende Agrarpreise bis zum Ende des Jahrhunderts. Gründe sind das starke globale Bevölkerungswachstum, sehr geringe Produktivitätszuwächse und ein eingeschränkter Handel mit Agrarrohstoffen. Zwar projizieren alle IAMs steigende Agrarpreise, doch fällt der Anstieg in den anderen Modellen weniger stark aus.

#### **Annahmen aus Fachworkshops:**

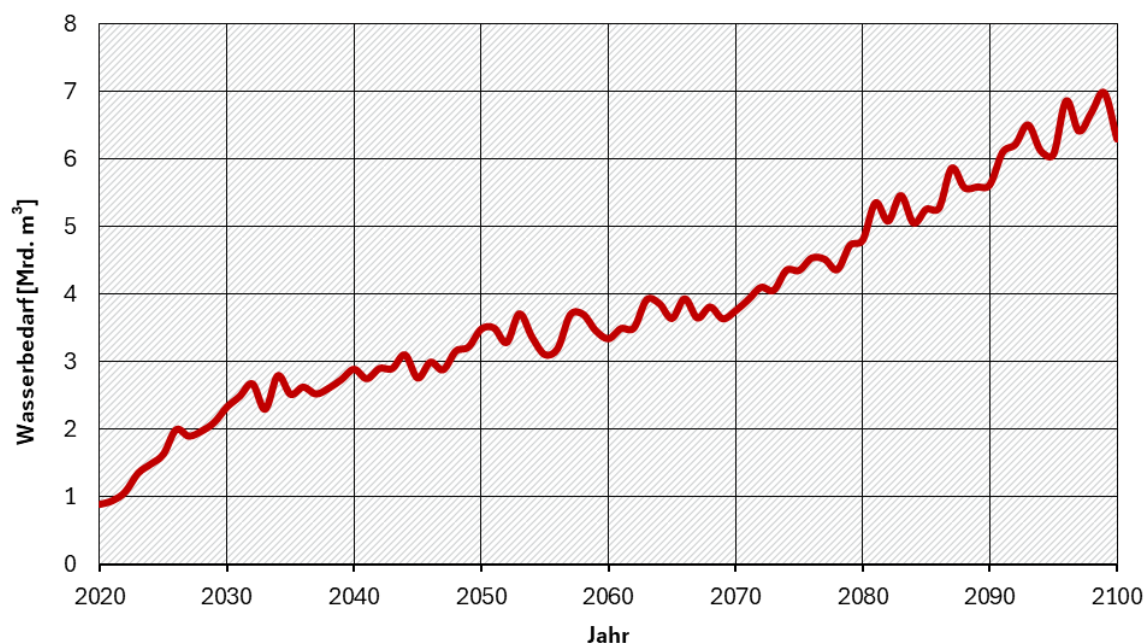
Zusätzlich zu den globalen Agrarpreisprojektionen wurden ausgewählte Annahmen aus den Fachworkshops in die Modellierung integriert. Für das Szenario "Rückzugskampf" deckten sich einige der im Szenarienentwicklungsprozess genannten Aspekte bereits mit bestehenden Modellannahmen, etwa starke Klimawandelfolgen (in RCP8.5 enthalten) oder eine Intensivierung der Landwirtschaft (u. a. über eine Ausweitung der landwirtschaftlichen Fläche).

Als zusätzliche Annahmen wurden im Szenario "Rückzugskampf" folgende Punkte berücksichtigt:

- ▶ Der **verstärkte Gemüseanbau in Deutschland**, umgesetzt über eine Verdopplung der Gemüseanbauflächen.
- ▶ Es wurden knappheitsbedingte, **steigende Wasserpreise** in das Bewässerungsmodell aufgenommen, die ab dem Jahr 2025 einsetzen und bis 2100 linear auf 8 Cent/m<sup>3</sup> ansteigen.
- ▶ Als Reaktion auf die höheren Wasserpreise wurde ab 2075 eine **leichte Effizienzsteigerung** der Wassernutzung in konventionellen Sprinkler-Bewässerungssystemen angenommen (bis zu 5 % Einsparung bis 2100).

Bestimmte Inputs aus der Szenarienentwicklung konnten aufgrund von Modellgrenzen nicht direkt integriert werden. Für das Szenario "Rückzugskampf" betrifft dies die manuelle Bestäubung von Obstbäumen, die ab 2075 infolge des zunehmenden Biodiversitätsverlusts nötig werden könnte. Auch der potenzielle Anbau von Südfrüchten wie Paprika oder Avocados in Deutschland konnte mangels verfügbarer Daten nicht modelliert werden, könnte den Wasserbedarf jedoch weiter erhöhen.

**Abbildung 25: Modellierter Wasserbedarf für die Landwirtschaft im Szenario "Rückzugskampf"**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

Der projizierte Wasserbedarf der Landwirtschaft steigt im Szenario „Rückzugskampf“ kontinuierlich stark bis zum Ende des Jahrhunderts an (Abbildung 25). Von anfänglich ca. 0,81 Mrd. m<sup>3</sup> im Jahr 2020<sup>29</sup> vervierfacht sich der Wasserbedarf bis zur Mitte des Jahrhunderts (2040-2060) und verachtfacht sich bis zum Ende des Jahrhunderts (2080-2098), mit einem jährlichen Wasserbedarf von bis zu 6,5 Mrd. m<sup>3</sup>.

Dies ist vor allem auf die globalen RCP- und SSP-Treiberkräfte in diesem Szenario zurückzuführen. Stark steigende Agrarpreise machen Investitionen in Bewässerungssysteme in vielen Regionen rentabel, da die Erträge ohne Bewässerung durch vermehrter Dürre- und Hitzeereignisse hohe Verluste aufweisen. Im Gegensatz dazu können unter Bewässerung hohe Erträge eingefahren werden. Dabei reagiert die Bewässerungsnachfrage relativ elastisch auf die Annahme der steigenden Wasserpreise aus dem Fachworkshop. Diese führen dazu, dass eine Investition in Bewässerungssysteme weniger lohnenswert ist und stattdessen alternative Anpassungsreaktionen, z. B. über veränderte Anbaumuster, unternommen werden. Gerade wenn Bewässerungsinfrastruktur erst noch ausgebaut werden muss, führt das Preissignal so zu einem weniger starken Anstieg der Bewässerungsnachfrage für Feldfrüchte.

Die Annahme zur leichten Effizienzsteigerung von konventionellen Sprinkler-Bewässerungssystemen führt, ähnlich wie die Tröpfchenbewässerungsoption im Szenario „Aufklärung 2.0“, entgegen den Erwartungen zu einem leichten weiteren Anstieg des Wasserbedarfs, da eine höhere Effizienz wiederum für manche Feldfrüchte Investitionen in Bewässerungssysteme begünstigt.

### **Gesamtwasserbedarf**

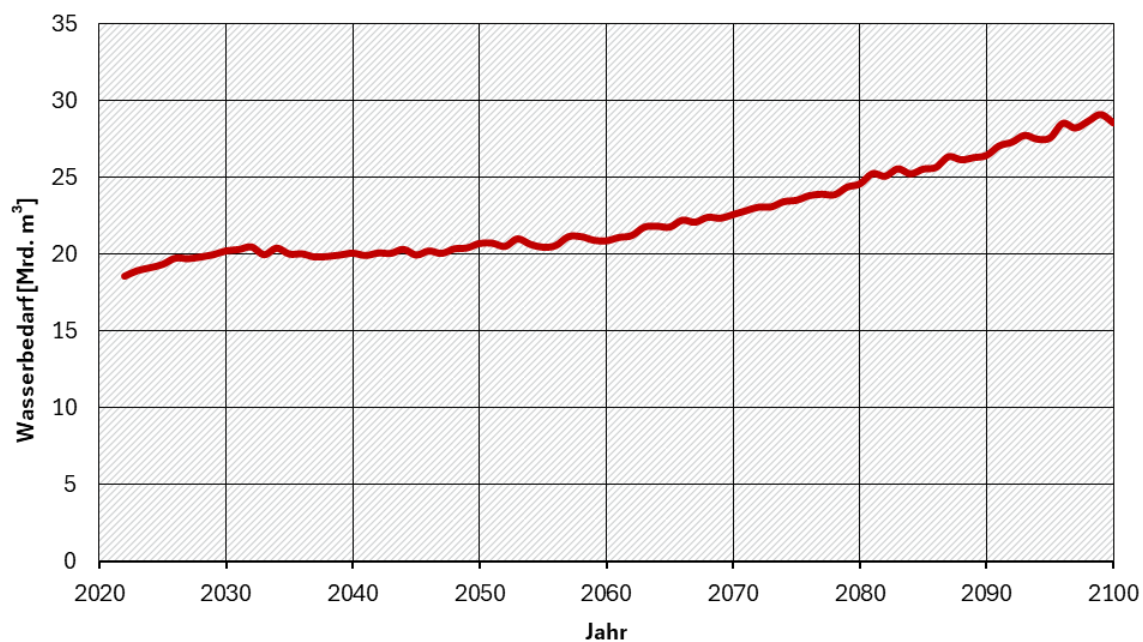
Unter Berücksichtigung der globalen SSP-Treiber und ergänzenden Annahmen aus dem entwickelten Narrativ oben lässt sich eine Entwicklung des Gesamtwasserbedarfs

<sup>29</sup> Referenz bezieht sich auf die modellierte Bewässerungsmenge für Feldfrüchte und Gemüse im Jahr 2020 (Ansatz beschrieben in Kapitel 2.3.6.4).

(zusammengesetzt aus den Sektoren Wirtschaft, Landwirtschaft, Haushalte und Energie) für Deutschland abschätzen.

Der Wasserbedarf im Szenario „Rückzugskampf“ steigt im modellierten Zeitraum deutlich von 18 Mrd. m<sup>3</sup> auf 29 Mrd. m<sup>3</sup> (Abbildung 26). Besonders die Landwirtschaft trägt mit einer Vervielfachung des Bewässerungsbedarfs maßgeblich zu diesem Anstieg bei. Der starke Anstieg ist auf steigende Agrarpreise und verstärkte Investitionen in Bewässerungssysteme zurückzuführen. Auch der Energiesektor verzeichnet eine starke Zunahme des Wasserbedarfs für Kühlzwecke, insbesondere durch den verstärkten Einsatz von Kohlekraftwerken zur Stromerzeugung. Im Gegensatz dazu sinkt der Wasserbedarf im Wirtschaftssektor leicht, da die Wirtschaftsleistung insgesamt zurückgeht. Der Wasserbedarf der Haushalte nimmt sogar deutlich ab, was vor allem auf den Rückgang der Bevölkerungszahlen zurückzuführen ist. Insgesamt überwiegen jedoch die Zuwächse in der Landwirtschaft und dem Energiesektor, sodass der Gesamtwasserbedarf sich im betrachteten Zeitraum deutlich erhöht (+61 %).

**Abbildung 26: Prognostizierter Wasserbedarf im Szenario „Rückzugskampf“ (eigene Darstellung)**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

### 3.1.4 *Privatisierung des Lebens* (Szenario SSP4)

Druck auf Wasserressourcen: **Gering**; Ungleichheit: **Hoch**.

#### 3.1.4.1 *Privatisierung des Lebens: Szenario-Narrativ*

##### **Politik-Disruptionen führen zur schleichenden Machtübernahme von Oligarchen**

In der Mitte der 2020er-Jahre richtet die Regierung der USA mit ihrer Zollpolitik weltweit großen wirtschaftlichen Schaden an, der gerade auch die großen US-Wirtschaftsunternehmen und -Investoren betrifft. Wirtschaftseliten und Oligarchen in den USA beklagen die Exzesse, die viele von ihnen mit ihrer Unterstützung der Regierung selbst ermöglicht hatten. Es setzt sich die Erkenntnis durch, dass Disruptionen in der Politik in ihrer Eigendynamik auch für sie selbst gefährlich werden können. Der Wunsch nach Eindämmung der Politik wird weltweit stärker. Er führt die wirtschaftlichen Eliten des Planeten weg von der offenen Gesellschaft und Demokratie und hin zum Fokus auf Kontrolle.

Dies geschieht nicht konzertiert, sondern schleichend, in einem vielschichtigen Prozess, bei dem der bereits erreichte, weitgehende Verzicht der Privatsphäre im Internet die Grundlage bietet. Enorme Fortschritte im Bereich der Künstlichen Intelligenz (KI) ermöglichen zugleich eine nie gesehene Mikrokontrolle und -steuerung von Individuen. Sie erschaffen weltweit neue und drastische technologische, wirtschaftliche und damit Macht-Ungleichheiten in und zwischen den Ländern. Deutschland und die EU hängen in der KI-Entwicklung hinterher. Geschwächt vom Einbruch der Wirtschaftsentwicklung weltweit und vom Aufkommen Chinas als Industriekonkurrent in allen Bereichen können sie der Entwicklung nichts Entscheidendes entgegensetzen.

### **Bis 2050: Knappe Kassen, Privatisierung und Spaltung der Gesellschaft**

In Deutschland wie weltweit wachsen im Zuge der Weltwirtschaftskrise Mitte der 2020er-Jahre die Ungleichheiten. Konfrontiert mit weiterhin steigendem wirtschaftlichen und zunehmend klimabedingten Migrationsdruck, knappen Sozialkassen und der politischen Radikalisierung reagiert die Politik in Deutschland mit einer strikten Einwanderungssteuerung. Zugleich nehmen innerhalb Deutschlands angesichts knapper Kassen die regionalen Wohlstandsunterschiede zu. Der Länderfinanzausgleich kommt unter Druck. In der geschwächten Wirtschaft kommt es zu Konzentrationsbewegungen, zumal die großen notwendigen Investitionen in künstliche Intelligenz nicht mehr von kleinen und mittleren Firmen getragen werden können. Internationale Megaunternehmen investieren in Deutschland. Mit knappen Kassen mangelt es an öffentlichen Investitionen, zum Beispiel in die Wasserinfrastruktur.

Es kommt zu weitgehenden Privatisierungen auch im Wassersektor, und damit zu einer Kontrollabgabe des Staates. Dies trägt zu einer Bündelung wirtschaftlicher Macht und einem Primat der Ökonomie bei. Riesige Wirtschaftsakteure außerhalb Deutschlands und der EU nutzen ihren Vorsprung in zentralen KI- und Produktionstechnologien und münzen ihn auch in anderen Wirtschaftsbereichen um. Verstärkt durch ihren Mediengriff und in Verbindung mit deutschen Elitepartnern gewinnen sie zunehmend direkten und indirekten Einfluss in Deutschland. Die Unterschiede in der Gesellschaft verstärken sich. Städte mit vergleichsweise hohem Anteil an Wissenschaft und neuer Industrie profitieren – ärmere Kommunen haben kaum Geld für Klimaanpassung. Es kommt zu Wasserkonflikten, bei dem die wirtschaftlich schwächeren Interessen den Kürzeren ziehen.

Im Tourismus reisen die reichen Bevölkerungsschichten mehr und dabei zunehmend in Urlaubsresorts, die ihnen Sicherheit und Komfort ohne Umweltbelastungen garantieren. Die Masse der Menschen reist weniger und im näheren Umkreis, weil sie sich mehr Mobilität und Service nicht leisten kann. Naturschutzgebiete geraten unter Druck durch Tagestourismus. Virtuelle Reiseräume sorgen für Ablenkung von realen Reisewünschen. Die Unzufriedenheit in den benachteiligten Gruppen der Gesellschaft wächst, wird jedoch durch Konsum- und Einstellungssteuerung mit effektiven KI-Medien im digitalen Zaum gehalten.

### **Bis 2075: Nebeneinander von Hightech, Luxus, Wassernot und Effizienzfokus**

International wird der Klimawandel durch die Zusammenarbeit unter Oligarchen relativ nachdrücklich bekämpft, so auch durch CO<sub>2</sub>-Entnahme aus der Atmosphäre und neue Formen der Energieerzeugung, wie nuklearer Fusion, die technologische Erneuerung weiter beschleunigt. Gleichzeitig sorgen in vielen Ländern, so auch in Deutschland, Extremwetterereignisse verstärkt für eine lokale Verknappung von Wasser. In der "Wasser-Oligarchie", in der die Wasserversorgung effektiv durch wenige Unternehmen gesteuert wird, steigen die Wasserpreise. Die Wassernutzung wird nach wirtschaftlicher Bedeutung und

Kaufkraft priorisiert. Wasser ist nicht mehr überall verfügbar. Es kommt häufiger zu Fällen von Wasserdiebstahl.

Durch die Verteuerung von Wasser wird dessen effiziente Nutzung sehr wichtig. Die Grau-/ Brauchwassernutzung steigt – auch in unterprivilegierten Privathaushalten. Es ergeben sich Wasserqualitätsprobleme für die breite Bevölkerung. In industriellen Kühlkreisläufen kommen zunehmend effizientere Kühlungstechnologien zum Einsatz. In der Landwirtschaft gibt es verstärkt *Vertical Farming* mit Wasserkreislaufführung. Der virtuelle Wasserkonsum steigt durch den internationalen Handel. Deutschland insgesamt hat an Wirtschaftskraft und als Exportnation deutlich eingebüßt und ist hinter aufstrebenden asiatischen Ländern zurückgefallen und hat sich auf einem niedrigeren Niveau stabilisiert. Mit zunehmendem Einsatz von Robotern und KI ist die Nachfrage nach Arbeit verringert. Die Geburtenrate sinkt weiter. Die Machtposition der Nicht-Privilegierten hat sich weiter verschlechtert. Auch der Zustand der Ökosysteme hat sich mangels entsprechender Schutzmaßnahmen verschlechtert. Nur privatisierte Ökosysteme werden gezielt gepflegt – für Naturerlebnisse müssen Menschen teuer bezahlen.

#### **Bis 2100: Elite in künstlicher Natur - Nicht-Privilegierte in KI-Scheinwelten**

Im letzten Viertel des 21. Jahrhunderts schirmt sich die oligarchische Elite immer weiter von den Nicht-Privilegierten ab. Während die Ökologie in den meisten Teilen Deutschlands zunehmend Schaden nimmt, erschafft sich die oligarchische Elite in *Gated Communities* künstlich angelegte „Natur“ einhergehend mit dem Luxus hohen Wasserkonsums. Schwimmende Städte und neu geschaffene Inseln setzen den Trend fort. Mit dem Konzept „funktioneller Natur“ versucht die oligarchische Elite für das Überleben zentrale Ökosysteme gezielt zu erhalten oder technologisch zu ersetzen. Die Elite profitiert zudem von den Errungenschaften lebensverlängernder Pharmakologie, während andere keinen Zugang zu diesen Privilegien erhalten.

In den nicht-privilegierten Gebieten degradiert die sich dezentralisierende öffentliche Infrastruktur, die Wasserver- und -entsorgung ist geprägt von vielen Leckagen. Das allgemeine Bildungsniveau verschlechtert sich zusehends, zumal viele tägliche Aktivitäten KI-unterstützt sind. Immersive digitale KI-Welten entführen die Nicht-Privilegierten in bessere Scheinwelten. Dennoch kommt es mit den sich verschlechternden Lebensbedingungen der Nicht-Privilegierten zu Unruhen und Aufständen in Teilen Deutschlands, die gewaltsam niedergeschlagen werden. In anderen Ländern ist der Widerstand der Bevölkerung hier und da erfolgreich – jedoch werden die dortigen neuen Machthaber nach einiger Zeit, in die internationalen Oligarchiestrukturen kooptiert.

### Abbildung 27: Illustration „Privatisierung des Lebens“ im Jahre 2100 (Quelle KI Gemini)



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

#### 3.1.4.2 *Privatisierung des Lebens*: Modellierter Wasserbedarf

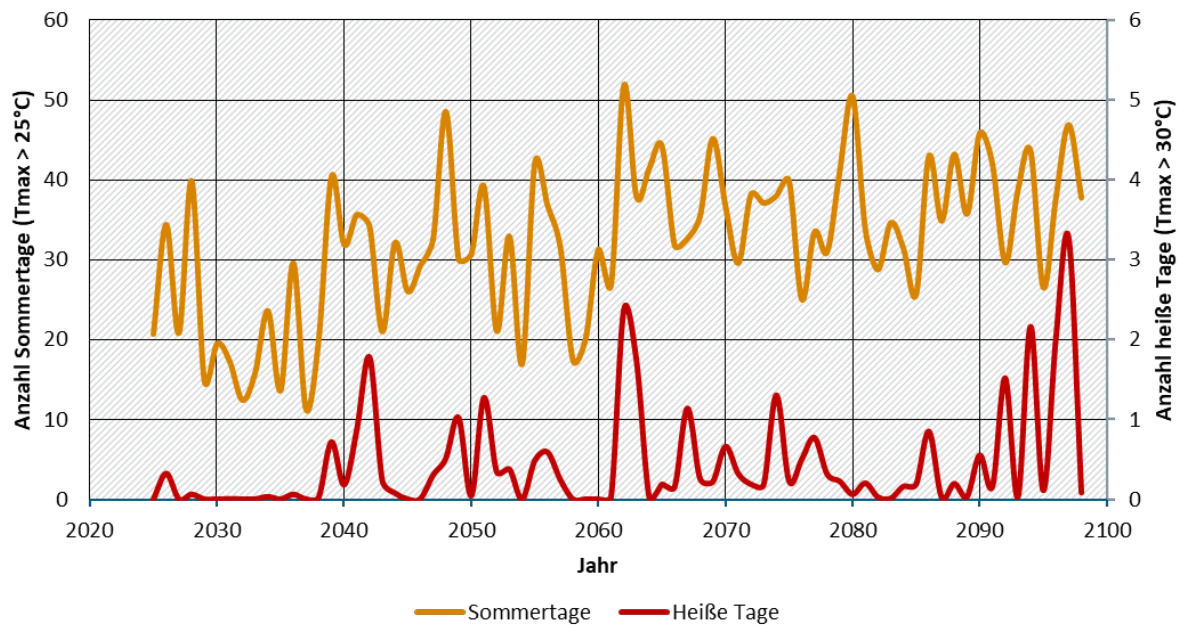
**Haushalte:**

##### *Inputs zur Modellierung*

##### **RCP-Szenario**

Das Szenario „Privatisierung des Lebens“ wurde mit dem Klimawandelszenario RCP4.5 verknüpft. Die Anzahl der zukünftigen Sommertage (>25 °C) und heißer Tage (>30 °C) wurde dem entsprechenden Klimamodellensemble (s. Kap. 2.3.5) aus der Studie von Heilemann et al. (2024) entnommen. In Abbildung 28 ist der Verlauf der Anzahl der Tage pro Jahr und NUTS-3-Region als Medianwert des Modellensembles für Deutschland dargestellt. Die Anzahl der Sommertage variiert stark und liegt zwischen 6 und 51 Tagen. Bis Ende der 2040er-Jahre liegen die meisten Werte zwischen 10 und 40 Tagen pro NUTS-3-Region, was mit dem RCP8.5-Szenario vergleichbar ist. Zwischen 2040 und 2060 nimmt die Anzahl der Sommertage leicht zu (17 bis 47 Tage) und erreicht ab 2060 Werte zwischen 25 und 50 Tagen. Das Niveau der Anzahl heißer Tage erhöht sich bis zum Jahr 2040 nicht deutlich. Ab dem Jahr 2040 kommt es zu Werten zwischen 0 und 3 Tagen. Ab 2060 treten häufiger Jahre mit einem heißen Tag (maximal drei heiße Tage) pro NUTS-3-Region auf. Regional kann die Anzahl der Sommertage und heißen Tage variieren und deutlich höhere Werte erreichen.

**Abbildung 28: Durchschnittliche Anzahl an Tagen mit einer Tageshöchsttemperatur von über 25 °C (Sommertage) und 30 °C (heiße Tage) pro NUTS-3-Region im RCP-Szenario 4.5 (eigene Darstellung, Daten aus Heilemann, 2024)**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

### Globale SSP-Treiber

Im Szenario „Privatisierung des Lebens“ werden die Bevölkerungszahlen aus dem globalen SSP4-Szenario verwendet (Jones & O’Neill, 2016; Gao, 2017, 2020). Für Deutschland wird ein leichter Bevölkerungsrückgang erwartet, hervorgerufen durch einen Rückgang der Geburtenraten, der Anteil der Bevölkerung über 67 Jahre nimmt zu. Obwohl die Bevölkerungszahlen sinken, nimmt der Urbanisierungsgrad stetig zu und erreicht 90 %. Es wird erwartet, dass die Einwohner\*innenzahl zunächst bis zum Jahr 2040 moderat um 4,5 % sinken wird und einen Wert von unter 80 Millionen (79,5 Millionen) erreicht. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts wird ein weiterer Rückgang erfolgen, der insgesamt zu einer Gesamtbevölkerung von 53,3 Millionen Einwohner\*innen führt. In diesem Szenario sinkt die Bevölkerung zwischen 2022 und 2100 um ca. 36 %. (Die Darstellung der zukünftigen Bevölkerungsentwicklung Deutschlands im SSP4-Szenario ist in Anlage B zu finden.)

### Annahmen aus den Fachworkshops

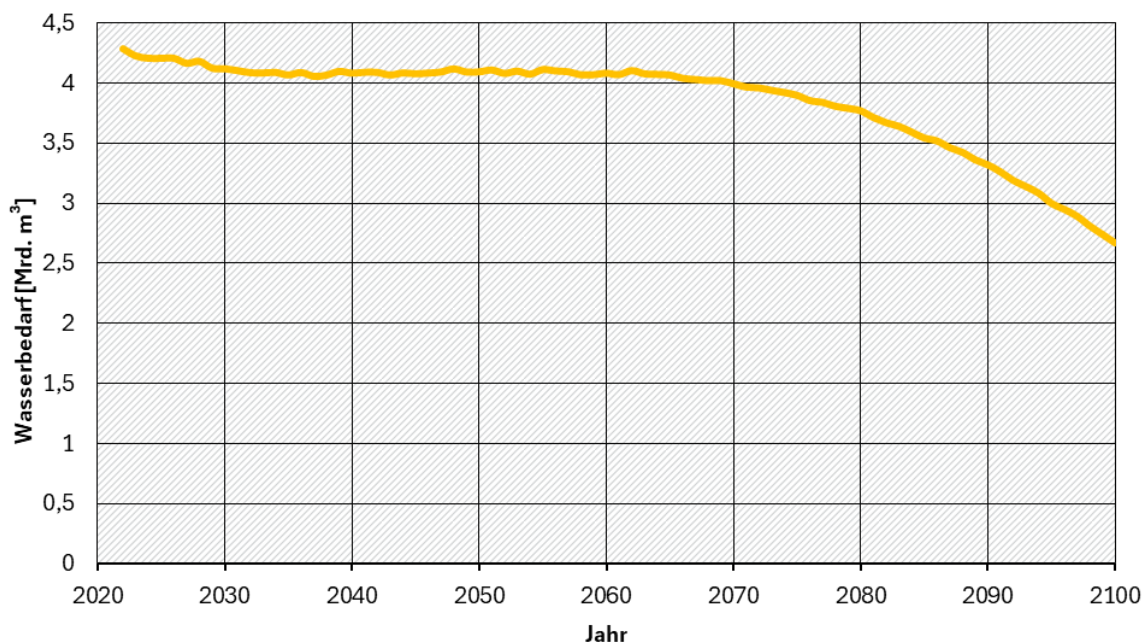
Die Entwicklung des Wasserbedarfs verläuft zweigleisig: in Haushalten der Nicht-Elite wird zwischen 2025 und 2050 eine Reduktion des Wasserbedarfs um 10 % erwartet, hauptsächlich aufgrund steigender Wasserpreise. Die effiziente Nutzung von Wasser wird sehr wichtig, da die Kosten insbesondere für diese Haushalte eine immer größere Rolle spielen. Demgegenüber stehen Haushalte der Elite, welche 10 % der Gesamtbevölkerung ausmachen und 2050 einen Wasserbedarf von 200 Liter pro Kopf und Tag aufweisen. Abgeschottete Gemeinschaften mit künstlich angelegter „Natur“ gehen mit einem hohen Wasserkonsum einher. Bis 2075 steigt der tägliche Pro-Kopf-Wasserbedarf der Elite weiter auf 225 Liter und bleibt bis 2100 konstant auf diesem Niveau. In der mehrheitlich ärmeren Bevölkerung (anteilig 90 %) wird der Wasserbedarf bis zum Ende des Jahrhunderts weiter sinken. Im Jahr 2100 liegt der Pro-Kopf-Wasserbedarf der „Nicht-Elite“ insgesamt 37 % unter dem Wert des Referenzzeitpunkts. Aufgrund der hohen Wasserpreise ist die Mehrheit der Haushalte („Nicht-Elite“-Haushalte)

kontinuierlich gezwungen, Wasser effizient zu nutzen, um die steigenden Kosten für Wasser zu bewältigen. Trotz des hohen Pro-Kopf-Wasserbedarfs der Elite sinkt der Wasserbedarf im Haushaltssektor nach dem Jahr 2075. In nicht-privilegierten Gebieten wird die sich dezentralisierende öffentliche Infrastruktur degradieren, was zu Verlusten durch Leckagen führt (20 % bis 2050, 35 % in den Jahren 2050 bis 2075 und 40 % für die Periode 2075-2100). Diese Entwicklung zeigt, dass in diesem Szenario die Ungleichheit in der Wasserverteilung zunehmen wird.

### **Modellierter Wasserbedarf für Haushalte**

Abbildung 29 zeigt den Verlauf des zukünftigen Wasserbedarfs im Haushaltssektor in Deutschland für das Szenario „Privatisierung des Lebens“. Im Referenzjahr 2022 betrug der Wasserbedarf im Haushaltssektor 4,28 Milliarden m<sup>3</sup> inklusive Verluste in Höhe von 12 %. Aufgrund von Effizienzsteigerungen und sinkender Bevölkerung, aber trotz steigendem Bedarf aufgrund von Leckagen, klimatischer Bedingungen und erhöhter Bedarfe für Pools (in Haushalten der Elite), fällt der Wasserbedarf auf 4,08 Milliarden m<sup>3</sup> im Jahr 2060. Bis zum Jahr 2100 erfolgt eine weitere deutliche Reduzierung des Wasserbedarfs in Deutschland auf 2,67 Milliarden m<sup>3</sup> (-38 %), hervorgerufen durch weiter sinkende Einwohner\*innenzahlen und Effizienzsteigerung. Die geringfügigen Änderungen zwischen den Jahren sind auf klimatische Einflüsse zurückzuführen.

**Abbildung 29: Modellierter Wasserbedarf des Haushaltssektors im Szenario „Privatisierung des Lebens“ von 2022 bis 2100.**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

### **Wirtschaftssektor:**

#### **Inputs zur Modellierung**

#### **Globale SSP-Treiber**

Im Szenario „Privatisierung des Lebens“ wird die BIP-Projektion aus dem globalen SSP4-Szenario verwendet (Wang & Sun, 2023; Wang & Sun, 2022; Dellink et al., 2017; Leimbach et al., 2017; Riahi et al., 2017). Deutschland gehört zu den global vernetzten, wohlhabenden Regionen

und fungiert als Lieferant von Spezialtechnik für andere Elite-Regionen, während der Handel mit den „abgehängten“ Regionen der Welt stagniert. Aufgrund der verringerten internationalen Zusammenarbeit und des damit verbundenen geringeren Wissensaustausches wird für Deutschland ein langsames BIP-Wachstum projiziert. Die Wirtschaft sieht sich mit Fachkräftemangel und höheren Kosten für die Anpassung an Klimafolgen konfrontiert, was das langfristige Wachstum dämpft. Ein geringerer technologischer Fortschritt und eine geringere Humankapitalbildung wirken sich ebenfalls hemmend auf das langfristige Pro-Kopf-BIP-Wachstum aus. Im Vergleich zum Referenzjahr wird ein Anstieg des BIP auf 7,18 Billionen Euro (d. h. +85 %) bis zum Jahr 2100 erwartet. (Die Darstellung der zukünftigen BIP-Entwicklung Deutschlands im SSP4-Szenario ist in Anlage B zu finden.)

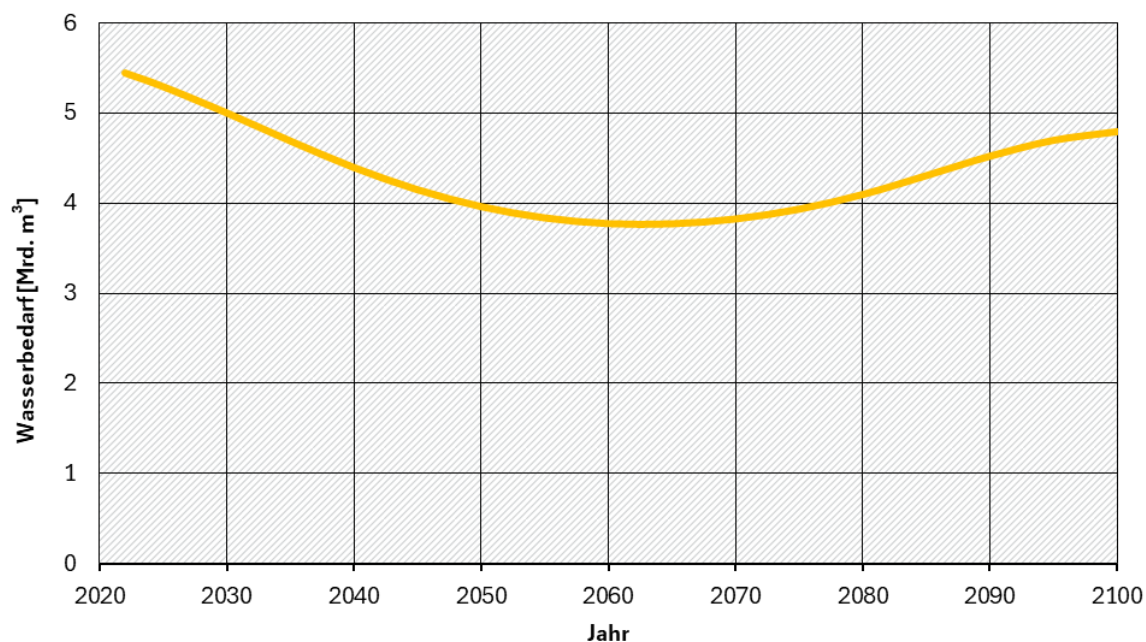
### Annahmen aus Fachworkshops

Die Wassernutzungsintensität sinkt aufgrund steigender Effizienz bis 2050 auf 3,5 m<sup>3</sup> pro 1000 Euro Bruttowertschöpfung und verbleibt anschließend auf diesem Niveau, da keine Investitionen zur weiteren Reduktion erfolgen. Nach einem Anstieg des Anteils der Bruttowertschöpfung am BIP um 10 % bis 2050 fällt die Wirtschaftsleistung des verarbeitenden Gewerbes infolge weltweiter Krisen und rückläufiger Industriensiedlungen bis 2075 wieder auf das Ursprungsniveau zurück.

### Modellierter Wasserbedarf für den Wirtschaftssektor

Der Wasserbedarf des Wirtschaftssektors sinkt bis 2060 trotz eines leichten Wirtschaftswachstums um über 30 % auf 3,7 Mrd. m<sup>3</sup> (Abbildung 30). Grund hierfür ist die sinkende Wassernutzungsintensität des Sektors. Der leichte Aufschwung des Industriesektors um 2050 hat keinen merklichen Einfluss auf den Bedarf. Mit dem weiteren Wirtschaftswachstum steigt der Wasserbedarf ab 2060 wieder, da die Intensität konstant bleibt und nicht weiter reduziert werden kann. 2100 benötigt der Sektor mit 4,8 Mrd. m<sup>3</sup> Wasser etwa 12 % weniger Wasser als im Referenzjahr 2022 (5,44 Mrd. m<sup>3</sup>).

Abbildung 30: Modellierter Wasserbedarf des Wirtschaftssektors im Szenario „Privatisierung des Lebens“ von 2022 bis 2100.



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

## **Energie:**

Im Energiesektor werden die Wasserbedarfe für die Kühlung in der thermischen Stromproduktion sowie für die Wasserstoffherstellung berücksichtigt.

## **Globale SSP-Treiber**

Das Szenario „Privatisierung des Lebens“ basiert auf den Energieprojektionen für die Stromerzeugung aus dem globalen SSP4-Szenario (Bauer et al., 2017; Calvin et al., 2017). SSP4 zeichnet sich durch eine erhebliche Elektrifizierung, einen hohen Wasserstoffbedarf und Effizienzsteigerungen aus. Die Einzelheiten dieses SSP (der in der Regel Fragmentierung/Regionalismus impliziert) stimmen oft mit den nationalen Zielen der Energiewende überein, berücksichtigen jedoch unterschiedliche globale Kontexte für die Ressourcenversorgung. Während wohlhabende Gebiete eine zunehmende Elektrifizierung mit saubereren Energiequellen verzeichnen, kämpfen ärmere Gebiete mit begrenztem Wachstum und einer anhaltenden Abhängigkeit von traditioneller Biomasse (Biokraftstoffen). In Deutschland liegt der Fokus stärker auf lokalen erneuerbaren Energien und weniger auf den globalen fossilen Energiemärkten. Die Entwicklung der thermischen Elektrizitätsproduktion in Deutschland unter SSP4 zeigt einen geringfügigen Anstieg bis 2100 um 31 % im Vergleich zum Referenzwert im Jahr 2020 (279,2 TWh). Anschließend stabilisiert sich die Produktion auf diesem niedrigeren Niveau bis zum Jahr 2100. Die Nutzung fossiler Energieträger (Erdgas, Kohle und Öl) nimmt bis zum Jahr 2100 deutlich ab. Biomasse, Kernenergie/Kernfusion und Geothermie tragen zur Dekarbonisierung, aber auch zur thermischen Elektrizitätsproduktion bei und nehmen bis zum Jahr 2100 zu. (Die Darstellung der zukünftigen thermischen Stromerzeugung in Deutschland im SSP4-Szenario ist in Anlage B zu finden.)

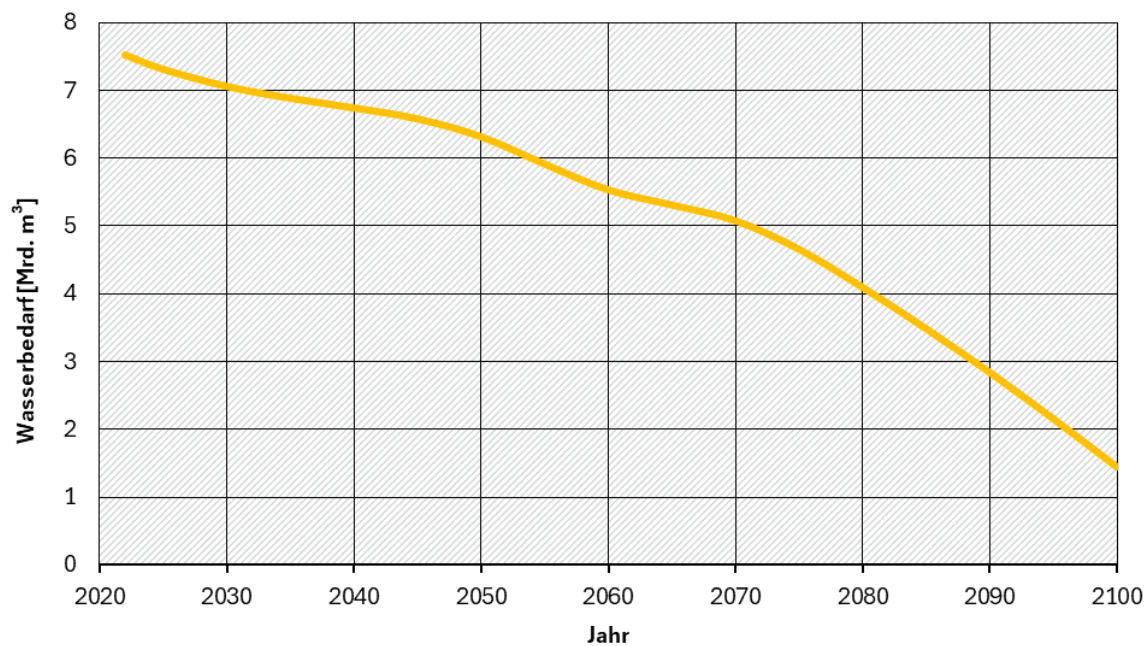
## **Annahmen aus Fachworkshops**

Die Kühlsysteme der Stromerzeugungsanlagen werden aufgrund steigender Wasserpreise von den Betreibern nach und nach auf Kühltürme umgestellt, sodass 2100 keine anderen Kühlsysteme verwendet werden. Es werden Anstrengungen unternommen, die Wassernutzungsintensität weiter zu reduzieren. Die Anpassungen erfolgen langsam, sodass erst am Ende des Jahrhunderts die Intensitäten im Vergleich zu den heutigen Werten um 10 % reduziert werden können.

## **Modellierter Wasserbedarf für thermische Elektrizitätsproduktion**

Im Szenario „Privatisierung des Lebens“ sinkt der Wasserbedarf für die thermische Stromerzeugung deutlich (Abbildung 31). Dieser Rückgang verläuft nahezu linear und ist insbesondere auf die stetige Verbesserung der Wassernutzungsintensität zurückzuführen. Zudem erfolgt die Kühlung der Kraftwerke ausschließlich über Turmkühlung, was den Wasserbedarf weiter reduziert, den Wasserverbrauch jedoch erhöhen dürfte. Der Anstieg bzw. die Wiedereinführung der Kernenergie wird durch den Rückgang der Stromproduktion aus Kohle und Gas ausgeglichen. Im Jahr 2100 beträgt der Wasserbedarf mit 1,4 Mrd. m<sup>3</sup> somit weniger als einem Fünftel des Ausgangswertes im Jahr 2020 (7,69 Mrd. m<sup>3</sup>).

**Abbildung 31: Modellierter Wasserbedarf (Kühlwasser) des Energiesektors im Szenario „Privatisierung des Lebens“ von 2020 bis 2100.**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

#### **Wasserstoff:**

Im Szenario „Privatisierung des Lebens“ wird Wasserstoff nicht berücksichtigt. Die bestehende Kapazität bleibt unverändert.

#### **Landwirtschaft:**

##### ***Annahmen zur Modellierung***

##### **RCP-Szenario: RCP4.5**

Das Szenario „Privatisierung des Lebens“ wurde mit dem Klimawandelszenario RCP4.5 verknüpft, das einen mittleren Klimawandel beschreibt. Verstärkte Extremwetterereignisse in der Landwirtschaft werden dabei vor allem in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts spürbar. Dies führt zu Ertragsminderungen bei Sommerfeldfrüchten wie Mais, Kartoffeln, Frühlingsgerste und Hafer und erhöht regional den theoretischen Bewässerungsbedarf dieser Kulturen (Heilemann et al., 2024).

#### **Globale SSP-Treiber:**

Für SSP4 wurde das Modell GCAM als Referenz-IAM ausgewählt (Popp et al., 2017). Dieses Modell projiziert für OECD-Länder wie Deutschland im Szenario SSP4-RCP4.5 stark steigende Agrarpreise bis etwa 2065, die anschließend auf hohem Niveau stagnieren. Ursache dafür sind vor allem die Klimaschutzannahmen in GCAM: Um den Emissionspfad von RCP4.5 zu erreichen, setzt das Modell verstärkt auf Aufforstung und Bioenergie als Minderungsmaßnahmen. Dadurch entsteht eine erhebliche Konkurrenz um landwirtschaftliche Fläche, was die Agrarpreise steigen lässt. Die anderen *Integrated Assessment Modelle* (IAMs), die Agrarpreise für SSP4-RCP4.5 quantifiziert haben, projizieren ebenfalls steigende Preise, allerdings mit einem etwas geringeren Anstieg.

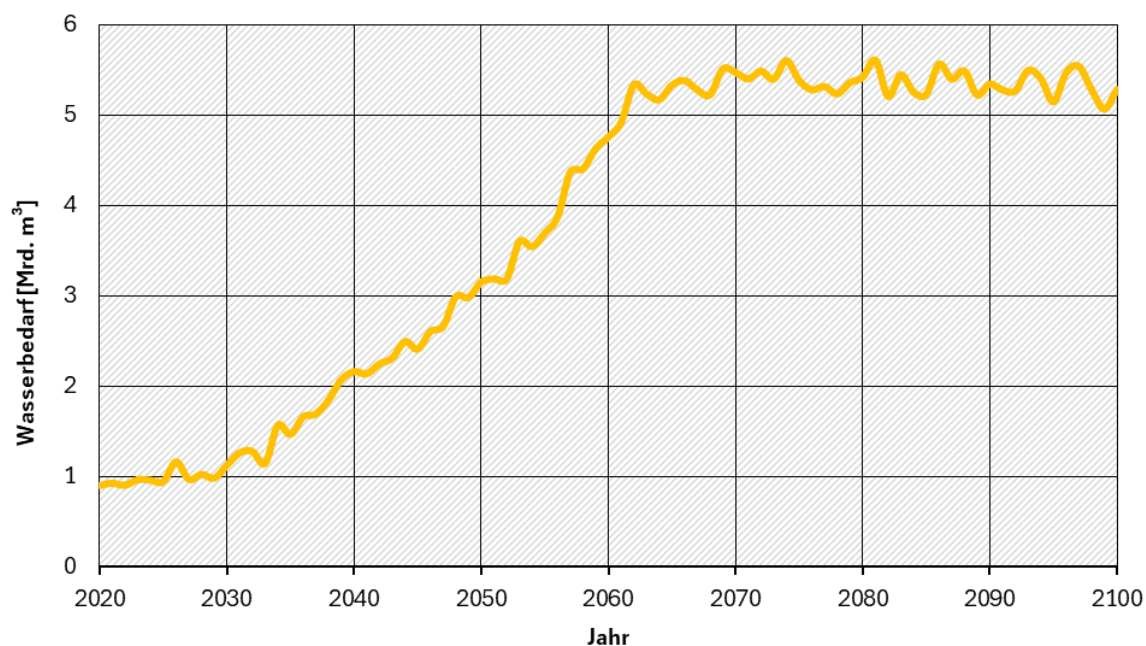
### Annahmen aus Fachworkshops:

Zusätzlich zu den globalen Agrarpreisprojektionen wurden für das Szenario „Privatisierung des Lebens“ zwei ausgewählte Annahmen aus den Fachworkshops in die Modellierung integriert:

- ▶ **steigende Wasserpreise** ab 2050, die bis 2100 linear auf 4 ct/m<sup>3</sup> ansteigen.
- ▶ Die steigenden Wasserpreise ab 2050 führen zu einer **leichten Effizienzsteigerung** konventioneller Sprinkler-Bewässerungssysteme (5 % Einsparung bis 2100).

Bestimmte Inputs aus der Szenarienentwicklung konnten aufgrund mangelnder Daten oder bestehender Modellgrenzen nicht direkt berücksichtigt werden. Für das Szenario „Privatisierung des Lebens“ betrifft dies das Aufkommen von Vertical-Farming-Systemen, die in diesem Szenario ab 2050 als möglich eingeschätzt wurden, sowie häufigere Fälle von Wasserdiebstahl in der Landwirtschaft, etwa durch nicht registrierte Brunnen oder Anlagen ohne Wasserzähler.

**Abbildung 32: Modellierter Wasserbedarf für die Landwirtschaft im Szenario "Privatisierung des Lebens" von 2020 bis 2100.**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

Der projizierte Wasserbedarf der Landwirtschaft im Szenario „Privatisierung des Lebens“ steigt steil an bis ca. 2065 (Abbildung 32). Im Vergleich zum Ausgangsjahr 2020 (0,81 Brd. m<sup>3</sup>)<sup>30</sup> steigt der jährliche landwirtschaftliche Wasserbedarf auf bis zu 5,5 Brd. m<sup>3</sup> an, was fast eine Versiebenfachung des Wasserbedarfs bedeutet. Daraufhin bleibt der jährliche Wasserbedarf konstant hoch zwischen 5,2 und 5,6 Brd. m<sup>3</sup> bis zum Ende des Jahrhunderts. Diese Entwicklung ist v. a. durch die steigenden Agrarpreise im Referenz-IAM für SSP4 bedingt, die einen ähnlichen Verlauf projizieren.

<sup>30</sup> Referenz bezieht sich auf die modellierte Bewässerungsmenge für Feldfrüchte und Gemüse im Jahr 2020 (Ansatz beschrieben in Kapitel 2.3.6.4).

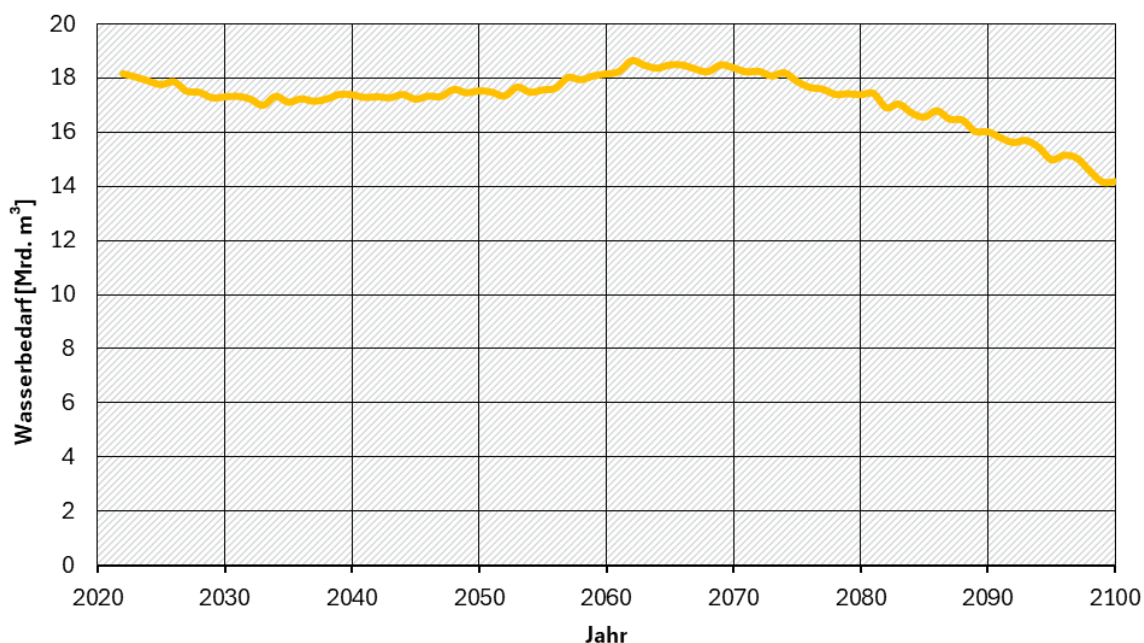
Genau wie im Szenario „Rückzugskampf“ führen steigende Wasserpreise zu einer deutlichen Abflachung des modellierten Anstiegs des Bewässerungsbedarfs verglichen zur Modellierung für das Szenario „Privatisierung des Lebens“, ohne die Annahme von steigenden Wasserpreisen. Die leichten Effizienzsteigerungen heben hingegen den Wasserbedarf minimal weiter an, da somit für mehr Agrarflächen Bewässerung lohnenswert wird.

### Gesamtwasserbedarf

Unter Berücksichtigung der globalen SSP-Treiber und ergänzenden Annahmen aus dem entwickelten Narrativ oben lässt sich eine Entwicklung des Gesamtwasserbedarfs (zusammengesetzt aus den Sektoren Wirtschaft, Landwirtschaft, Haushalte und Energie) für Deutschland abschätzen.

Der Gesamtwasserbedarf im Szenario „Privatisierung des Lebens“ zeigt bis 2070 kaum eine Veränderung gegenüber dem Referenzzeitpunkt 2022 mit etwa 18 Mrd. m<sup>3</sup> Wasser (Abbildung 33). Die starke Abnahme des Wasserbedarfs im Energiesektor aufgrund von Effizienzsteigerungen wird durch die deutliche Zunahme des Bewässerungsbedarfs ausgeglichen. Der Mehrbedarf im Landwirtschaftssektor wird v. a. durch steigende Agrarpreise ausgelöst. Ab 2070 bleibt der Bewässerungsbedarf konstant, zudem sinkt der Wasserbedarf im Haushaltssektor aufgrund sinkender Einwohner\*innenzahlen und geringen Pro-Kopf-Bedarfes, sodass auch der Gesamtwasserbedarf für Deutschland sinkt. 2100 beträgt der Wasserbedarf somit nur noch 14 Mrd. m<sup>3</sup>. Der Wirtschaftssektor zeigt über den Modellierungszeitraum nur eine geringfügige Reduktion des Wasserbedarfs an.

**Abbildung 33: Prognostizierter Wasserbedarf im Szenario „Privatisierung des Lebens“ (eigene Darstellung)**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

### 3.1.5 **Wirtschaftswunder 2.0** (Szenario SSP5)

Druck auf Wasserressourcen: **Hoch**; Ungleichheit: **Gering**

#### 3.1.5.1 **Wirtschaftswunder 2.0: Szenario-Narrativ**

##### **Alle Ressourcen für die eigene Entwicklung und die Bezwingung der Natur durch die Menschheit**

Nach politisch und ökonomisch turbulenten Perioden im ersten Viertel des 21. Jahrhunderts verlagert sich der Schwerpunkt der Entwicklung gegen Ende der 2020er-Jahre auf das menschliche Wohlergehen. Die militärischen Konfrontationen nehmen auch in Europa mit dem Verebben des Ukraine-Krieges wieder ab und der internationale Wettstreit fokussiert sich auf das Wirtschaftliche. Mit den negativen Erfahrungen politischer Konflikte und wirtschaftlicher Turbulenzen macht sich die Einschätzung breit, dass weder militärische Konfrontation noch ungehemmte Globalisierung den Wohlstand der Menschen regional und national dauerhaft sichern und erweitern können. Die später als Weckruf bezeichnete Verschiebung des politischen Spektrums nach rechts führte in Deutschland zu einer stärkeren Betonung des gesellschaftlichen Zusammenhalts und der Stärkung der inländischen Wirtschaft. Die 2030er beginnen mit dem Verwässern der föderalen Struktur Deutschlands und der Abkehr vom Kohleausstieg. Starke Migrationsbegrenzung und soziale Teilhabe durch staatliche Förderungen gehen Hand in Hand mit einer Stärkung des Mittelbaus der Gesellschaft – „Jede(r) kann Unternehmer“ ist das Sprichwort. Spektakuläre technologische Erfolge in Künstlicher Intelligenz und Robotik ebnen den Weg zu einem Fokus auf breite menschliche Weiterentwicklung auf Kosten der Nutzung aller vorhandenen Ressourcen, auch der bereitstellbaren fossilen.

Deutschland nutzt die Rückkehr zu fossilen Energien – auch aus Russland - für den Erhalt und das Wachstum von Industrie (insbesondere der Stahl- und Autoindustrie) sowie für den Erhalt des Wohlstands angesichts der chinesischen Konkurrenz. Dies wird als *alternativlos* angesehen. International erscheinen durchschlagende Einigungen auf Emissionsreduktionen illusorisch. Wie viele andere sehen auch die Deutschen mehrheitlich keinen Sinn mehr darin, den Klimawandel mit minimalen Erfolgen bekämpfen zu wollen, wenn andere Länder sich international weder beteiligen noch die Kosten tragen. Kritiker bezeichnen dies als egoistisch und zukunftsblind – und sehen sich selbst als Rufer in der Wüste. Mit steigendem Wohlstand bei mehr und mehr desaströsen Klimakrisen wird die Haltung zur Natur zunehmend instrumentell, die Einstellung der Gesellschaft zu einer „ungezähmten“ Natur feindlicher. Der Diskurs der Nachhaltigkeit ist zunächst noch ein Feigenblatt, verebbt dann mehr und mehr und macht Platz für den Diskurs der menschlichen Anpassungs- und Gestaltungskraft mit Technologie: von künstlicher Natur in Mikrokosmen und Schutzgebieten (“Inseln mit Mineralbrunnen”) *ohne Macken und Mücken zu Lebenswelten auf anderen Himmelskörpern.*

##### **Bis 2050: Ein mit günstiger Energie befeuertes deutsches Wirtschaftswunder 2.0**

Um den gesellschaftlichen und ökonomischen Absturz Deutschlands zu verhindern, betreibt die deutsche Regierung in der zweiten Hälfte der 20er-Jahre eine intensive Kampagne zur Reindustrialisierung. Hierbei spielt günstige Energie eine große Rolle. Zunehmend werden wieder fossile Brennstoffe genutzt. Für die deutsche Automobilindustrie, die beim Elektroantrieb von chinesischer Konkurrenz nahezu überrollt wird, bietet das Verlängern der Verbrenner-Technologie eine als überlebensnotwendig angesehene Atempause, um sich entwicklungstechnologisch auf die nächsten Herausforderungen wie autonomes Fahren konzentrieren zu können. In Deutschland bleibt das Auto außerhalb der großen Städte das Fortbewegungsmittel Nummer eins. Um die 2030er-Jahre wird der Kohleausstieg widerrufen und der Braunkohleabbau wieder eingeführt. Neue Gasquellen werden in Deutschland erschlossen. Flüssigerdgas (LNG) und Steinkohle werden verstärkt importiert, während

Wasserstoff in erster Linie zur industriellen Nutzung (Elektrolyse) verwendet wird und weniger zur Elektrizitätsproduktion. Kernenergie in kleinen Modulen Reaktoren der IV. Generation (Small Modular Reactors, SMR) wird genutzt. Der Weg zu dieser Entwicklung ruft in der zweiten Hälfte der 20er-Jahre noch starke gesellschaftliche Kontroversen hervor. So wird das geplante Fracking in Niedersachsen beispielsweise aufgrund des Widerstands der Bevölkerung zunächst verhindert.

Mit den ersten wirtschaftlichen Erfolgen der neuen Politik und der noch sehr instabilen Sicherheitslage schwindet die Opposition, die durch die internationale Abkehr von den Klimazielen zunehmend geschwächt wird. Das Abklingen des Ukraine-Krieges und die Wiederaufnahme von Wirtschaftsbeziehungen mit Russland ermöglichen wieder russisch-deutsche Gaslieferungen. Das gibt der Industrie, dem Staatshaushalt und der Finanzierung des Sozialstaats in Deutschland einen großen Schub. Die deutsche Industrie und Gesellschaft erleben einen neuen Boom unternehmerischer Tätigkeit - von der Stahlindustrie bis zur KI-befeuerten Hochtechnologie. Dieser erlaubt es der breiten Bevölkerung, Wohlstandsgewinne zu erzielen. Ältere sprechen etwas scherzhaft von einem *deutschen Wirtschaftswunder 2.0*. In kontrollierten Ausbildungszentren werden weltweit gezielt ausländische Arbeitskräfte ausgewählt und geschult, um sich vorteilhaft in die deutsche Wirtschaft und Gesellschaft einpassen zu können. Die Verschärfung der Klimawandelfolgen stellt viele Regionen vor große Herausforderungen; Deutschland kann als wirtschaftsstarker Standort in mancher Hinsicht resilienter reagieren als stärker betroffene Regionen, etwa in Südeuropa.

Mehr Haushalte haben durch wachsenden Wohlstand einen erhöhten Wasserbedarf für schöne Gärten und Pools, insbesondere bei Hitze und bei Trockenheit. Die Rohwasserqualität spielt eine untergeordnete Rolle, da die Trinkwasseraufbereitung nutzungsorientiert erfolgt und die notwendige Qualität herstellt. Die Landwirtschaft ist von Brüsseler Agrarsubventionen abhängig. Zugleich werden erste landwirtschaftliche Erzeugnisse mit Protein-Produkten aus dem 3D-Drucker ersetzt. Abwärme von KI-Rechenzentren wird genutzt. Massenstoff-Transporte erfolgen über Schiffe und Schiene, wobei die Schifffahrt abflussbedingten Schwankungen unterliegt und in den Sommermonaten oft eingeschränkt ist. Im Tourismus gewinnt der Norden Deutschlands aufgrund der Küstenlage und der als angenehmer empfundenen Temperaturen weiter an Bedeutung; neben den bereits gut erschlossenen Küstenregionen werden zunehmend Binnen- und Hinterlandgebiete ausgebaut. Auch an den Braunkohle-Restseen floriert der Tourismus. Klimatisierte Erholungs- und Erlebnislandschaften und virtuelle Urlaubswelten bieten kurzweilige Ablenkung und angenehme, geschützte Lebensverhältnisse auch bei Hitzetagen und extremen Wetterbedingungen.

### **Bis 2075: Menschliche Schaffenskraft kontrolliert die Natur und passt sie und sich an**

Nach den zuvor gescheiterten Versuchen wird zu Beginn der 2050er-Jahre auch das Fracking zugelassen, das von neuartigen, umweltschonenderen Technologien profitiert und nun Akzeptanz in der Bevölkerung erhält. Lautstarken Protesten wird entgegengehalten, dass die günstige fossile Energieversorgung zentral für den Wohlstand in Deutschland ist. Mit den stärker werdenden Auswirkungen des Klimawandels nimmt die Zahl der Menschen zu, die zunehmend an die überfüllten Küsten von Nord- und Ostsee drängen. Die Ostsee ist stark eutrophiert, zum Baden laden nur noch Resorts ein. Es kommt zu einer Süd-Nord-Bewegung, auch im boomenden internationalen Tourismus mit Schiffs- und Flugzeugtransport. Im Zuge des allgemeinen Technologiebooms wird auch die Landwirtschaft, insbesondere die Bewässerung zunehmend optimiert und effizienter. Angesichts der zunehmend unberechenbaren Umweltkatastrophen wird versucht, mit *Geoengineering* das lokale Wetter atmosphärisch zu beeinflussen. Bei hoher Luftfeuchtigkeit wird lokal entfeuchtet. In Städten erfolgt im Sommer

zusätzliche Kühlung durch Wassersprühen. Die Landwirtschaft verlagert sich zunehmend in vielstöckige Gewächshäuser und auf den Feldern werden Sonderkulturen wie Soja und Hirse, statt Weizen und Mais, verstärkt angebaut – mit neuartigen Düngemitteln und verdreifachter Fruchtfolge. Kleine und mittelständische Betriebe verschwinden größtenteils.

Agrarsubventionen werden schrittweise abgebaut und weichen den Marktmechanismen. Auf landwirtschaftlichen Flächen werden Solarstromanlagen errichtet.

Während Deutschland so bis 2075 zu einem der weltweit führenden Agrarexporteure heranwächst, wird die Landwirtschaft zum Vorreiter des zunehmenden Rückzugs der Menschen von der freien Natur in geschützte, kontrollierte Lebenswelten. Dabei ergibt sich zwar ein Stadt-Land-Gefälle, wobei jedoch alle Gesellschaftsschichten zu den kontrollierten Lebenswelten Zugang haben. Dies erfordert enorme Investitionen in die Infrastruktur angesichts einer Natur, die durch zunehmende, klimawandelbedingte Ereignisse als feindlich wahrgenommen wird. Skifahren findet in überdachten Hallensystemen statt. Natur wird an manchen Orten gezielt als Erlebnispark erhalten und gesteuert zugänglich gemacht oder im Rahmen von Fernreisen ins Ausland dort besucht, wo sie noch vital ist. In Deutschland werden zunehmend Drohnen zur Fortbewegung genutzt. Neue Energiequellen, wie Kernfusion, werden industriell verfügbar und tragen zur Deckung des enormen Energiebedarfs in Deutschland und weltweit bei. Die Nachfrage nach Wasser steigt und der Druck, alternative und künstliche Wasserquellen zu erschließen, nimmt deutlich zu. Versuche, technische Lösungen zur CO<sub>2</sub>-Entnahme aus der Atmosphäre zu propagieren, kommen nicht über gelegentliches Mäzenatentum hinaus, da die Beherrschung und Technisierung der Natur einen als größer empfundenen Nutzen versprechen.

#### **Bis 2100: Natur bauen wir uns selbst – Deutschland im Wettlauf der Beherrschung der Natur**

Supraleiter und Quantentechnologie ermöglichen im letzten Viertel des 21. Jahrhunderts revolutionäre technologische Lösungen. Enorme Fortschritte im Pharmabereich lassen Epidemien als kontrollierbar erscheinen. Der weltweite Wettlauf um die Technisierung der Ökosysteme ist längst in vollem Gange: Es gibt künstliche, KI-gesteuerte und zunehmend autarke Umweltsysteme *ohne Mücken*. Zugleich entwickelt sich im Zuge des radikalen Klimawandels eine neue Küstenlinie in Deutschland.

Deutschland spielt seine wiedergewonnene technologische Stärke aus und nimmt eine Vorreiterrolle ein. Die Menschen selbst erfahren Technologisierung am eigenen Körper, von der Geburtensteuerung bis hin zu kybernetischen Erweiterungen des Körpers mit Plug-Ins und Add-Ons. Der Sprung von künstlicher Intelligenz zu künstlicher Natur ist in vollem Gange. Das Leben unter Kuppeln und überdachten Mikrokosmen gelingt nicht nur in industrie- und wirtschaftsgeprägten Städten, sondern auch außerhalb der Erde, auf anderen Himmelskörpern.

**Abbildung 34: Illustration „Wirtschaftswunder 2.0“ im Jahre 2100 (Quelle KI Gemini)**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

### **3.1.5.2 Wirtschaftswunder 2.0: Modellierter Wasserbedarf**

#### **Haushalte:**

#### ***Annahmen zur Modellierung***

#### **RCP-Szenario**

Das Szenario „Wirtschaftswunder 2.0“ wurde mit dem Klimawandelszenario RCP8.5 verknüpft. Die Anzahl der zukünftigen Sommertage (>25 °C) und heißer Tage (>30 °C) wurde dem entsprechenden Klimamodellensemble (s. Kap. 2.3.5) aus der Studie von Heilemann et al. (2024) entnommen. In Kapitel 3.1.3.2 ist der Verlauf der Anzahl der Sommertage und heißen Tage pro Jahr und NUTS-3-Region als Medianwert des Modellensembles für Deutschland dargestellt (Abbildung 21) und beschrieben.

#### **Globale SSP-Treiber**

Im Szenario „Wirtschaftswunder 2.0“ werden die Bevölkerungszahlen aus dem globalen SSP5-Szenario verwendet (Jones & O’Neill, 2016; Gao, 2017, 2020). Für die Bevölkerung Deutschlands werden ein hohes Wachstum und eine erhebliche Suburbanisierung prognostiziert. Bedingt durch eine Stabilisierung der Geburtenrate und internationale Migration zur Deckung des Bedarfs an Fachkräften fallen die Zahlen deutlich höher aus als in den anderen Szenarien. Im SSP5-Szenario steigt die Lebenserwartung der Bevölkerung, wodurch der Anteil älterer Menschen zunimmt. Die Urbanisierungsrate ist hoch, jedoch besteht eine Vorliebe für Wohnraum in Vororten. Bis zum Jahr 2050 steigt die Bevölkerung um 9 % auf 90 Millionen an. Es wird erwartet, dass die Bevölkerung Deutschlands im Jahr 2100 bei 97,8 Millionen liegt, was

einer Zunahme von 17 % im Vergleich zum Jahr 2022 entspricht. (Die Darstellung der zukünftigen Bevölkerungsentwicklung Deutschlands im SSP5-Szenario ist in Anlage B zu finden.)

### **Annahmen aus den Fachworkshops:**

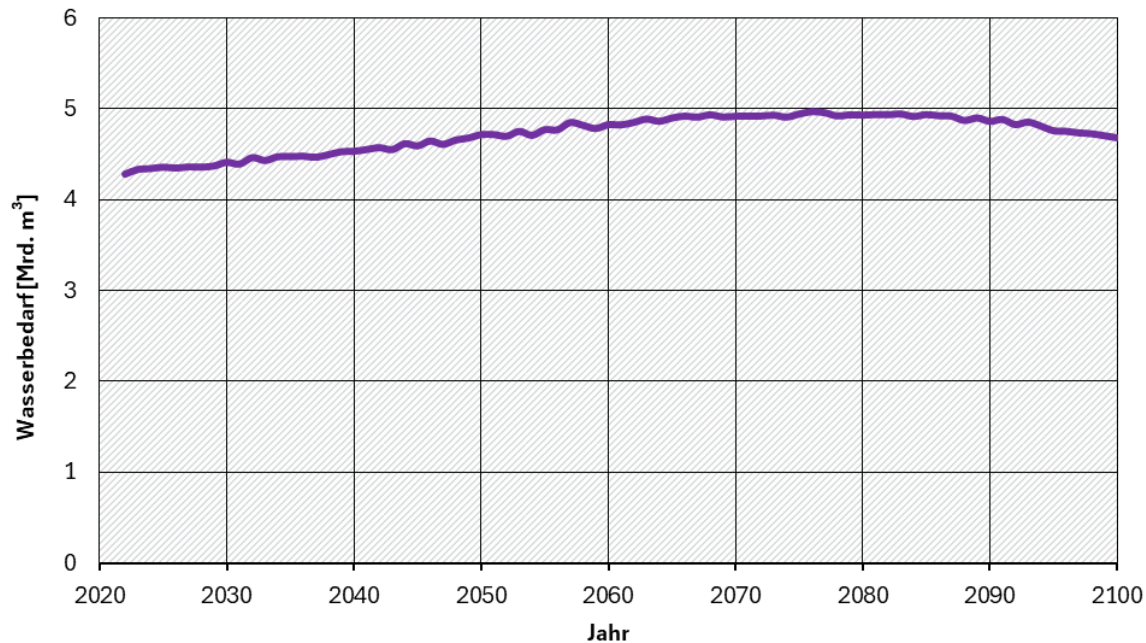
In den kommenden Jahrzehnten wird der Wasserbedarf im Haushaltssektor stark von steigenden Temperaturen und Hitzewellen geprägt sein, was zu deutlich höheren Bedarfen in den Sommermonaten führt und sich verstärkt auf Spitzenlasten auswirkt. In Deutschland wird zwischen 2025 und 2050 eine leicht steigende Tendenz des Wasserbedarfs erwartet, die auf die Zunahme der Bevölkerung zurückzuführen ist. Die steigenden Temperaturen und Hitzewellen werden den Wasserbedarf in den Sommermonaten deutlich erhöhen. Von 2050 bis 2075 wird sich dieser Trend fortsetzen, wobei die Zunahme der Bevölkerung weiterhin zu einem leicht steigenden Wasserbedarf führt. Mehr Haushalte haben durch wachsenden Wohlstand einen erhöhten Wasserbedarf für schöne Gärten und Pools. Allerdings wird eine Effizienzsteigerung von 0,15 % pro Jahr den Anstieg teilweise ausgleichen. Die steigenden Temperaturen und Hitzewellen werden weiterhin zu einem stark saisonal geprägten Wasserbedarf führen. Zwischen 2075 und 2100 wird sich der Wasserbedarf im Haushaltssektor leicht verringern, wobei sich zwei unterschiedliche Trends abzeichnen. In Regionen mit ausreichenden natürlichen Wasserressourcen und zusätzlicher Versorgung durch entsalztes Wasser wird der Wasserbedarf auf etwa 130 Liter pro Person und Tag ansteigen. In Regionen, die durch Trockenheit und Dürre geprägt sind, wird die Einführung eines zweiten Wasserkreislaufs in Haushalten zur Verwendung von aufbereitetem Abwasser zu einer Reduzierung des Frischwasserbedarfs auf 110 Liter pro Person und Tag führen. Eine Effizienzsteigerung von 0,25 % pro Jahr trägt ebenfalls zur Reduzierung bei.

Getrieben durch den Klimawandel wird der Norden Deutschlands zwischen 2025 und 2050 stärker touristisch erschlossen. Klimatisierte Erholungs- und Erlebnislandschaften sowie virtuelle Urlaubswelten werden deutschlandweit kurzweilige Ablenkung und angenehme, geschützte Lebensverhältnisse auch bei Hitzetagen und extremen Wetterbedingungen bieten. Diese Entwicklungen werden den Tourismus in den Norden verlagern und neue Anforderungen an die Wasserinfrastruktur stellen. Von 2050 bis 2075 wird der Wasserbedarf in touristischen Regionen auf 300 Liter pro Person und Übernachtung ansteigen. Zunehmende Übernachtungszahlen und ein veränderter Urlaubsanspruch mit höherem Wasserverbrauch (Pools, Golfanlagen, häufigeres Duschen) lassen den Wasserbedarf im Tourismus steigen und verstärken die Saisonalität in den Sommermonaten. Für 2075–2100 wird in touristischen Gebieten ein Wasserbedarf von etwa 500 Litern pro Person und Übernachtung erwartet. Die starke Konzentration der Wasserbedarfe in den Sommermonaten wird weiterhin zu einer hohen Belastung der Wasserversorgung führen.

### **Modellierter Wasserbedarf für Haushalte**

Abbildung 35 zeigt den Verlauf des zukünftigen Wasserbedarfs im Haushaltssektor in Deutschland für das Szenario „Wirtschaftswunder 2.0“. Im Referenzjahr 2022 betrug der Wasserbedarf im Haushaltssektor 4,28 Milliarden m<sup>3</sup> inklusive Verluste in Höhe von 12 %. Aufgrund steigender Bevölkerungszahlen steigt der Wasserbedarf bis zum Ende des 21. Jahrhunderts auf 4,68 Milliarden m<sup>3</sup> (+9 %) an. Der höchste Wert (4,93 Milliarden m<sup>3</sup>) wird im Jahr 2080 erreicht (+15 %). Die Effizienzsteigerungen, die ab dem Jahr 2050 einsetzen, können den Anstieg durch die wachsende Bevölkerung etwas abmildern, aber nicht kompensieren. Die geringfügigen Änderungen zwischen den Jahren sind auf klimatische Einflüsse zurückzuführen.

**Abbildung 35: Modellierter Wasserbedarf des Haushaltssektors im Szenario „Wirtschaftswunder 2.0“ von 2022 bis 2100.**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

## **Wirtschaft:**

### ***Inputs zur Modellierung***

#### **Globale SSP-Treiber**

Im Szenario „Wirtschaftswunder 2.0“ wird die BIP-Projektion des globalen SSP5-Szenarios verwendet (Wang & Sun, 2023; Wang & Sun, 2022; Dellink et al., 2017; Leimbach et al., 2017; Riahi et al., 2017). Dieses Szenario geht im Allgemeinen von einem starken Wirtschaftswachstum für Industrienationen wie Deutschland aus. Es wird eine durchgehende starke wirtschaftliche Expansion erwartet, die durch die intensive Nutzung fossiler Ressourcen angetrieben wird und zu einem deutlich höheren BIP-Niveau führt. Zum Wachstum trägt zusätzlich eine hohe Kapitalakkumulation bei. Bis zum Jahr 2100 könnte sich das BIP in diesem Szenario im Vergleich zum Referenzjahr vervierfachen. Trotz des Wirtschaftswachstums birgt dieser Zukunftspfad erhebliche Klimarisiken, die langfristig auch zu erheblichen wirtschaftlichen Auswirkungen führen können (Bachner et al. 2022). (Die Darstellung der zukünftigen BIP-Entwicklung Deutschlands im SSP5-Szenario ist in Anlage B zu finden.)

#### **Annahmen aus Fachworkshops**

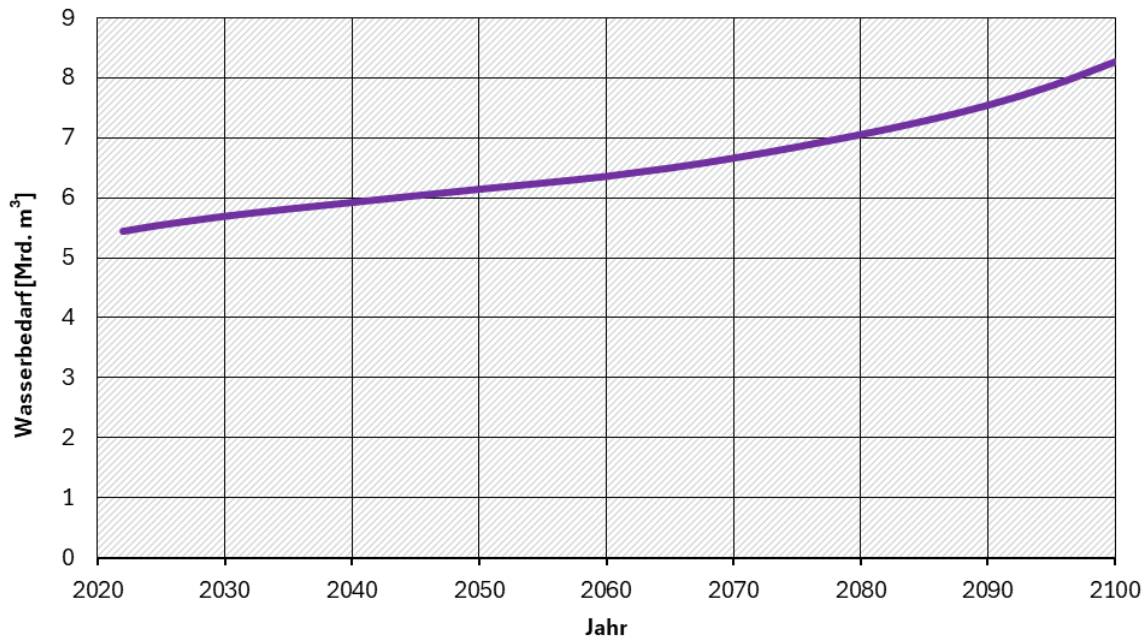
Aufgrund von Investitionen in Effizienzsteigerungen und Kreislaufführung sinkt die Wassernutzungsintensität im Wirtschaftssektor von 7,6 m<sup>3</sup> pro 1000 Euro Bruttowertschöpfung auf 3 m<sup>3</sup> pro 1000 Euro Bruttowertschöpfung im Jahr 2100. Die Fertigungsindustrie ist in Deutschland nicht mehr tragfähig und wird ins Ausland ausgelagert. Der Anteil der Bruttowertschöpfung des verarbeitenden Gewerbes am BIP sinkt dadurch bis 2100 um 30 %.

#### ***Modellierter Wasserbedarf im Wirtschaftssektor***

Der Wasserbedarf des Wirtschaftssektors steigt im Szenario „Wirtschaftswunder 2.0“ entgegen dem langjährigen Trend wieder an (Abbildung 36). Zwischen 2022 und 2100 erhöht sich der Bedarf von 5,44 Mrd. m<sup>3</sup> auf 8,26 Mrd. m<sup>3</sup>. Trotz einer sinkenden Wassernutzungsintensität und

einer teilweisen Abwanderung der Industrie ins Ausland führt das starke Wirtschaftswachstum insgesamt zu einem steigenden Wasserbedarf. Die zunehmende Produktion und der Ausbau wirtschaftlicher Aktivitäten überkompensieren die Effizienzgewinne, sodass der Wasserbedarf im Jahr 2100 deutlich über dem Ausgangsniveau liegt (+52 %).

**Abbildung 36: Modellierter Wasserbedarf des Wirtschaftssektors im Szenario „Wirtschaftswunder 2.0“ von 2022 bis 2100.**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

### Energie:

Im Energiesektor werden die Wasserbedarfe für die Kühlung in der thermischen Stromproduktion sowie für die Wasserstoffherstellung berücksichtigt.

### Globale SSP-Treiber

Im Szenario „Wirtschaftswunder 2.0“ wird die Energieprojektion für die Stromerzeugung aus dem globalen SSP5-Szenario verwendet (Bauer et al., 2017; Kriegler et al., 2017). Im globalen Szenario SSP5 wird eine Zukunft mit rasantem Wirtschaftswachstum prognostiziert, das hauptsächlich durch den Einsatz fossiler Brennstoffe vorangetrieben wird. Dies führt zu einem enormen Energiebedarf und beträchtlichen Treibhausgasemissionen. Trotz hoher technologischer Innovationen werden in diesem Szenario kaum Klimaschutzmaßnahmen ergriffen, was zu erheblichen Auswirkungen des Klimawandels führt. Es kommt zu einer intensiven Nutzung von Kohle und anderen fossilen Brennstoffen für einen energieintensiven Lebensstil. Es gibt einen starken technologischen Fortschritt, der jedoch den Schwerpunkt auf Innovationen legt, die die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen unterstützen oder ausgleichen, wie z. B. Geoengineering oder Kohlenstoffabscheidung (CCS). Trotz des hohen Verbrauchs fossiler Brennstoffe besteht eine hohe Nachfrage nach Biokraftstoffen und Bioenergie mit CCS zur Emissionssteuerung. Die Entwicklung der thermischen Elektrizitätsproduktion in Deutschland im SSP5-Szenario ist geprägt durch einen sehr deutlichen Anstieg (mehr als das Fünffache im Vergleich zum Referenzwert von 779,2 TWh im Jahr 2020) bis 2100. Die fossilen Energieträger Kohle und Erdgas nehmen sehr stark zu, die Nutzung von Öl reduziert sich bis 2040 auf null. Kernenergie/Kernfusion spielt ab 2070 wieder eine Rolle im Energiemix und

steigt stark an. Biomasse und Geothermie nehmen ebenfalls zu und tragen zum deutlichen Anstieg der thermischen Elektrizitätsproduktion bei, wenngleich ihr Anteil am Energiemix eher untergeordnet ist. Erneuerbare Energien werden aufgrund des technologischen Fortschritts weiterentwickelt und ausgebaut. Der Ausbau erfolgt jedoch nur langsam und kann die fossilen Energieträger nicht schnell genug verdrängen. (Die Darstellung der zukünftigen thermischen Stromerzeugung in Deutschland im SSP5-Szenario ist in Anlage B zu finden.)

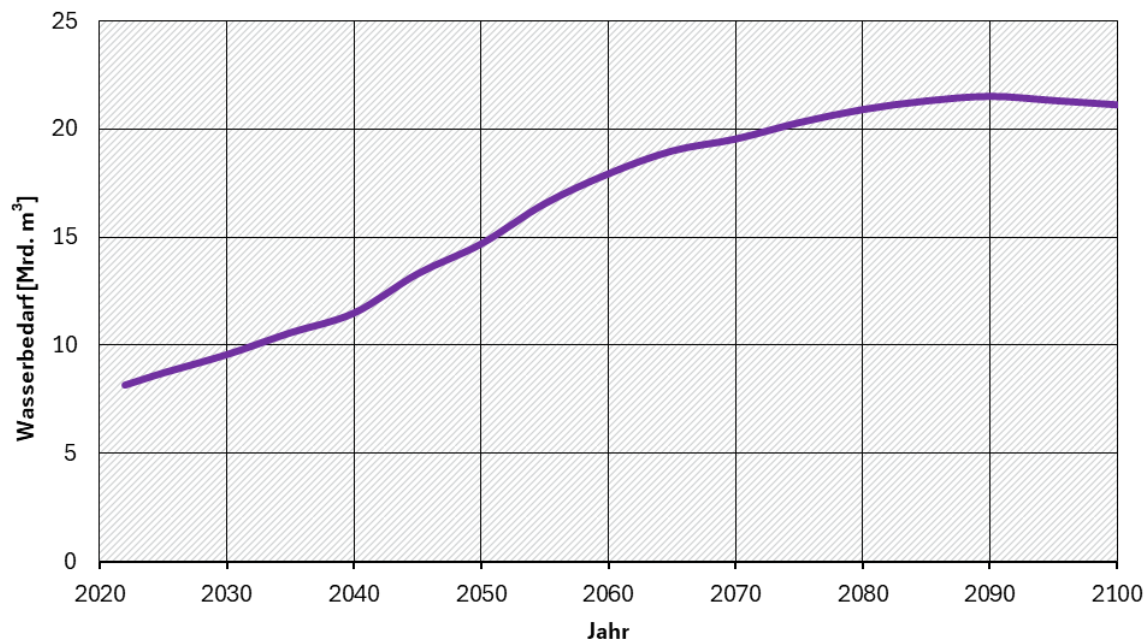
### **Annahmen aus Fachworkshops:**

Die aktuelle Aufteilung der Kühlsysteme bei der Stromerzeugung wird in Zukunft beibehalten. Verschiedene Standorte machen unterschiedliche Kühlsysteme nötig, diese werden jedoch technisch verbessert. Obwohl der Klimawandel eine verstärkte Kühlung der Anlagen notwendig macht, wird durch diese technischen Maßnahmen eine Effizienzsteigerung von 0,5 % pro Jahr erreicht.

### **Modellierter Wasserbedarf für thermische Elektrizitätsproduktion**

Das Szenario „Wirtschaftswunder 2.0“ ist durch einen hohen Strombedarf gekennzeichnet, welcher größtenteils durch fossile Energieträger gedeckt wird. Dementsprechend stark steigt auch der Wasserbedarf für Kühlzwecke (Abbildung 37). Zudem wird ab 2070 mit der Kernfusion eine weitere Energiequelle genutzt, welche ebenfalls Wasser zur Kühlung verwendet. Die jährlichen Effizienzgewinne können den Wasserbedarf zwar dämpfen, jedoch werden am Ende des Jahrhunderts über 21 Mrd. m<sup>3</sup> Wasser für die Kühlung von thermischen Kraftwerken benötigt und damit fast dreimal so viel wie zum Referenzzeitpunkt 2020 (7,69 Mrd. m<sup>3</sup>).

**Abbildung 37: Modellierter Wasserbedarf (Kühlwasser) des Energiesektors im Szenario „Wirtschaftswunder 2.0“ von 2020 bis 2100.**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

### **Wasserstoff:**

Im Szenario „Wirtschaftswunder 2.0“ wird Wasserstoff nicht berücksichtigt. Die bestehende Kapazität bleibt unverändert.

## **Landwirtschaft:**

### ***Annahmen zur Modellierung***

#### **RCP-Szenario:**

Wie im Szenario „Rückzugskampf“ wurde auch das Szenario „Wirtschaftswunder 2.0“ mit dem Klimawandelszenario RCP8.5 verknüpft, das einen sehr hohen Klimawandel beschreibt. Extremwetterereignisse nehmen darin kontinuierlich zu, mit verstärkten Dürre- und Hitzeeinflüssen in Deutschland im späten 21. Jahrhundert. Dies führt zu einem deutlich steigenden theoretischen Bewässerungsbedarf und zu regelmäßigen Ertragseinbußen bei nicht bewässerten Feldfrüchten (Heilemann et al., 2024; McNamara & Herrmann, 2024).

#### **Globale SSP-Treiber:**

Für SSP5 wurde das Modell REMIND-MAGPIE als Referenz-IAM ausgewählt (Popp et al., 2017). Es projiziert für OECD-Länder wie Deutschland im Szenario SSP5-RCP8.5 leicht fallende Agrarpreise bis 2100. Gründe sind der globalisierte internationale Handel mit regionaler Spezialisierung – viele Agrarprodukte werden in Asien produziert und importiert – sowie eine zunehmende landwirtschaftliche Intensivierung. Das Modell GCAM projiziert eine ähnliche Agrarpreisentwicklung, während AIM/CGE eine leichte Preissteigerung erwartet.

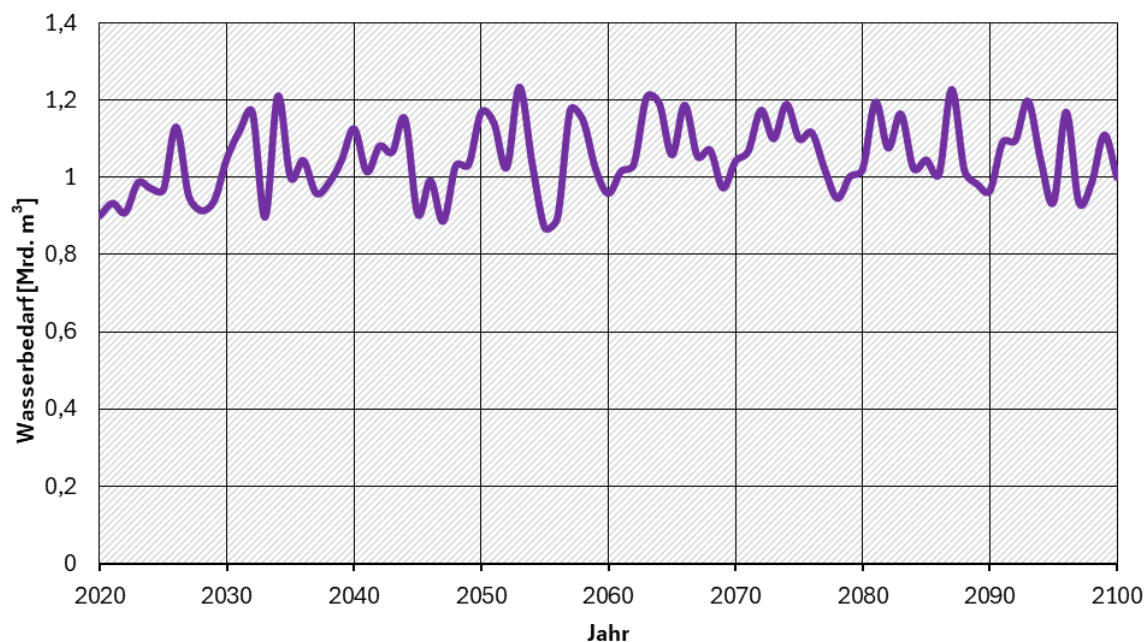
#### **Annahmen aus Fachworkshops:**

Zusätzlich zu den globalen Agrarpreisprojektionen wurden ausgewählte Annahmen aus den Fachworkshops in die Modellierung integriert. Für das Szenario „Wirtschaftswunder 2.0“ deckten sich einige der im Szenarienentwicklungsprozess genannten Aspekte bereits mit bestehenden Modellannahmen, etwa die starken Klimawandelfolgen (in RCP8.5 enthalten) oder der verstärkte Anbau wassersparender Pflanzen als Alternative zur Bewässerung (modelliert über Landnutzungsanpassungen der Feldfrüchte im Multi-Agenten-System-Modell, wo sich die Landnutzung graduell zu dürre- und hitzeresistenteren Feldfrüchten wie Wintergetreide verschiebt).

Als zusätzliche Annahme wurde ein ab 2050 einsetzender **Technologieboom in der Landwirtschaft** aufgenommen. Neben ersten Proteinprodukten aus dem 3D-Drucker, die tierische und pflanzliche Erzeugnisse ergänzen oder ersetzen, treiben vielstöckige Gewächshäuser (*Vertical Farming*) die ganzjährige Produktion voran. Gleichzeitig entstehen neue Düngemittel, die die Erträge deutlich steigern, Tröpfchenbewässerung mit Bodensensoren im Feldfruchtbau sorgt für einen optimierten Wassereinsatz.

Bestimmte Inputs aus der Szenarienentwicklung konnten aufgrund von Modellgrenzen nicht direkt umgesetzt werden. Für das Szenario „Wirtschaftswunder 2.0“ betrifft dies den Einsatz von *Geoengineering* zur lokalen Wetterbeeinflussung sowie die Einführung von *Vertical-Farming*-Systemen ab Mitte des Jahrhunderts. Auch der potenzielle Anbau klimaangepasster Pflanzen wie Soja und Hirse konnte nicht explizit modelliert werden, könnte den zukünftigen Wasserbedarf aber leicht senken.

**Abbildung 38: Modellierter Wasserbedarf für die Landwirtschaft im Szenario „Wirtschaftswunder 2.0“ von 2022 bis 2100.**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

Der projizierte Wasserbedarf der Landwirtschaft im Szenario „Wirtschaftswunder 2.0“ verläuft insgesamt relativ konstant vom Ausgangspunkt im Jahr 2020 (0,81 Mrd. M<sup>3</sup>)<sup>31</sup> bis zum Ende des Jahrhunderts (Abbildung 38). Die jährlichen Schwankungen des landwirtschaftlichen Bedarfs aufgrund von wechselnden Dürre- und Hitzebedingungen rangieren zwischen 0,8 Mrd. m<sup>3</sup> und 1,2 Mrd. m<sup>3</sup>. Dabei steigt der Wasserbedarf von Gemüse leicht, da im Klimawandelszenario RCP8.5 die theoretischen Bewässerungsbedarfe aufgrund des hohen Klimawandels stark zunehmen. Die Annahme des Subventionsabbaus hat nur einen sehr geringen Einfluss auf den modellierten Bewässerungsbedarf, und auch die Tröpfchenbewässerungsoption führt nur zu einem geringen Anstieg des landwirtschaftlichen Wasserbedarfs in diesem Szenario, da durch die günstige Bewässerungstechnologie weitere Flächen mit Bewässerungsinfrastruktur ausgestattet werden.

### Gesamtwasserbedarf

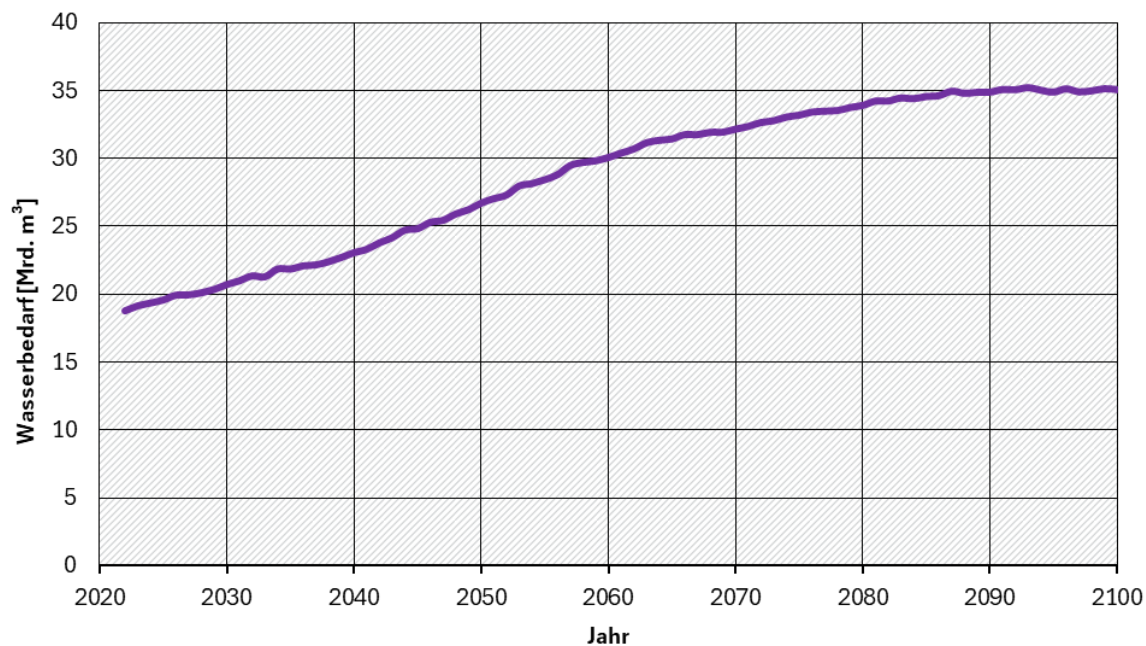
Unter Berücksichtigung der globalen SSP-Treiber und ergänzenden Annahmen aus dem entwickelten Narrativ lässt sich eine Entwicklung des Gesamtwasserbedarfs (zusammengesetzt aus den Sektoren Wirtschaft, Landwirtschaft, Haushalte und Energie) für Deutschland abschätzen.

Der Gesamtwasserbedarf im Szenario „Wirtschaftswunder 2.0“ in Verbindung mit dem Klimaszenario RCP8.5 steigt bis 2100 deutlich an (Abbildung 39). Der Anstieg ist insbesondere durch die Sektoren Energie und Wirtschaft zu erklären. Ein starkes Wirtschaftswachstum erhöht, trotz aller Effizienzgewinne, den Wasserbedarf in der Wirtschaft und der hohe Strombedarf wird durch fossile Energieträger und Kernfusion gestillt. So steigt der Wasserbedarf bundesweit auf 35 Mrd. m<sup>3</sup> im Jahr 2100 an (+94 %). Der Haushaltssektor zeigt

<sup>31</sup> Referenz bezieht sich auf die modellierte Bewässerungsmenge für Feldfrüchte und Gemüse im Jahr 2020 (Ansatz beschrieben in Kapitel 2.3.6.4).

durch das Bevölkerungswachstum einen moderaten Anstieg des Wasserbedarfs, während in der Landwirtschaft aufgrund fortgeschrittener Bewässerungsmethoden kein höherer Wasserbedarf zu erkennen ist.

**Abbildung 39: Prognostizierter Wasserbedarf im Szenario „Wirtschaftswunder 2.0“ (eigene Darstellung)**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

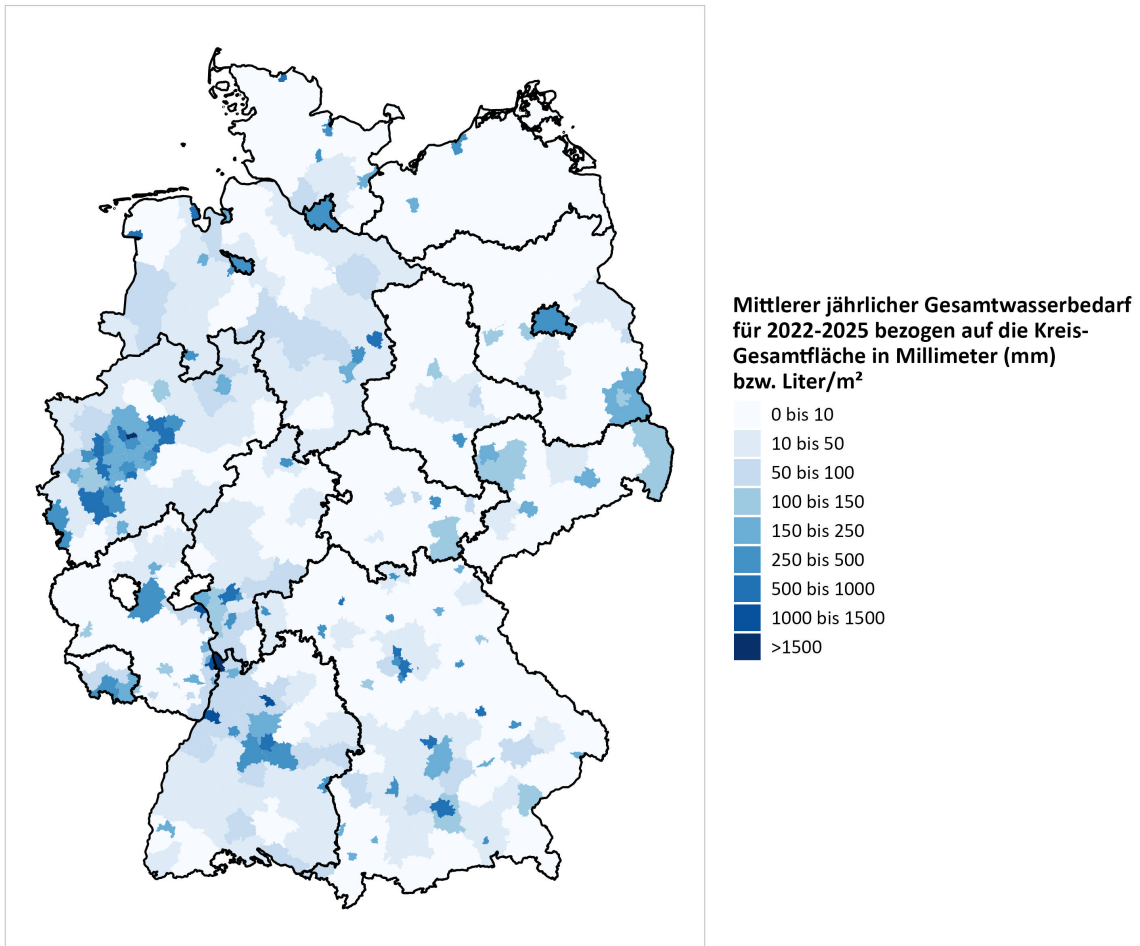
## 3.2 Regionale und saisonale Aspekte der Ergebnisse

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, langfristige Szenarien und Modellierungen zum Wasserbedarf in Deutschland zu erarbeiten. In diesem Zusammenhang sind auch regionale und saisonale Aspekte des zukünftigen Wasserbedarfs von Bedeutung. Die zentralen Ergebnisse bezüglich regionaler Effekte und Saisonalität werden in diesem Kapitel kurz beschrieben.

### 3.2.1 Regionale Aspekte

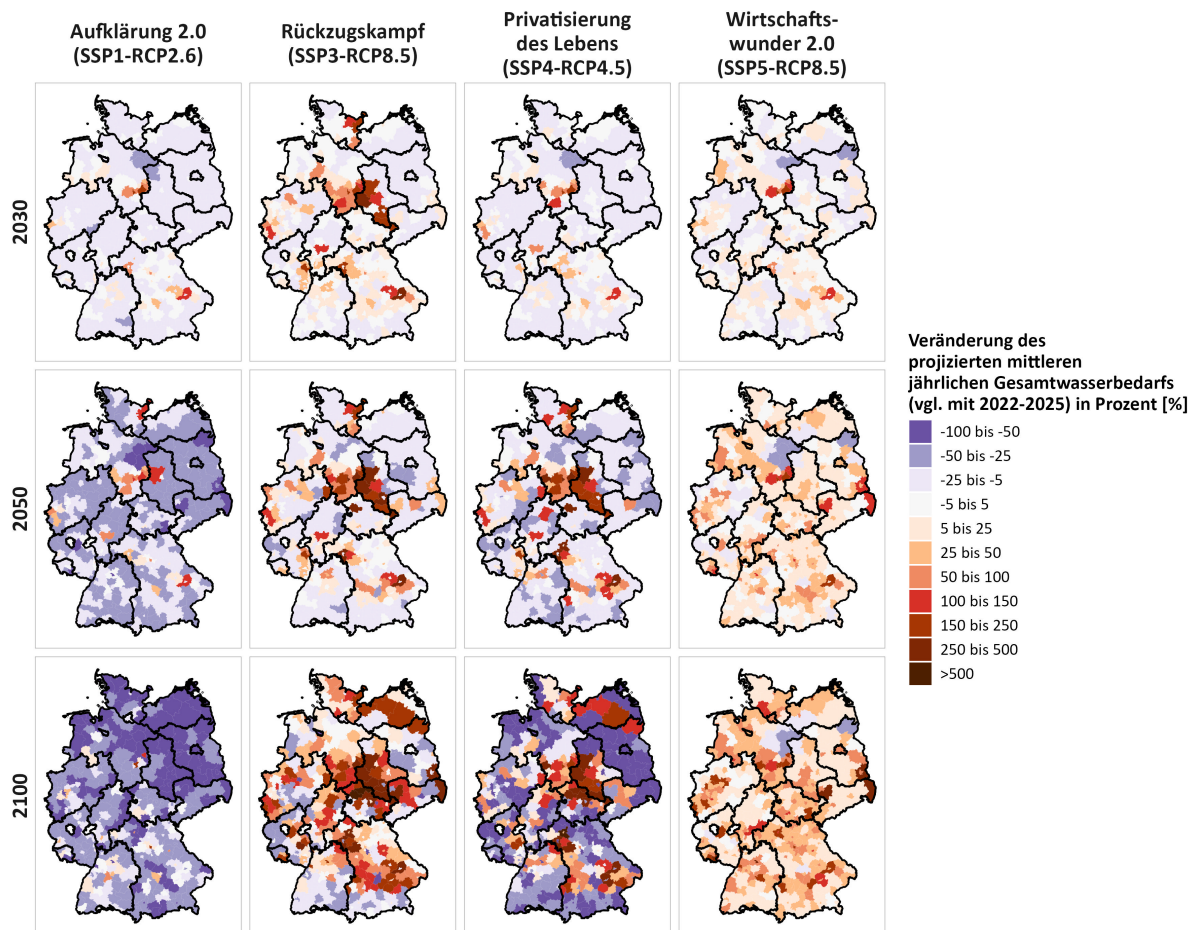
Die modellierten Gesamtwasserbedarfe für die vier Szenarien liegen auf Kreisebene vor und sind in Abbildung 41 für die Jahre 2030, 2050 und 2100 dargestellt. Abgebildet sind die Gesamtwasserbedarfe der Sektoren Haushalte, Wirtschaft, Energie und Landwirtschaft. Die räumliche Modellierung erfolgte entweder direkt für NUTS-3-Regionen (d. h. auf Kreisebene) oder wurde nachträglich, z. B. von nationaler oder Bundeslandebene, auf diese Ebene skaliert. Für den Wasserbedarf im Zusammenhang mit Wasserstoff war eine räumliche Zuordnung nicht möglich, da die zukünftige Standortverteilung der Wasserstoffproduktion schwer prognostizierbar und mit hohen Unsicherheiten verbunden ist. Zur besseren räumlichen Vergleichbarkeit wurden die aktuellen Gesamtwassermengen auf die jeweilige Kreisfläche normiert und als Flächenwasserbedarf in Millimetern (mm bzw. Liter/m<sup>2</sup>) ausgewiesen (Abbildung 40). Die Darstellung basiert auf den jeweils verfügbaren Referenzwerten für die Jahre 2022-2025 für die Sektoren Haushalte, Wirtschaft, Landwirtschaft und Energie (siehe Tab. 1).

**Abbildung 40: Ausgangssituation des mittleren jährlichen Gesamtwasserbedarfs für die Jahre 2022-2025 auf Kreisebene bezogen auf die Gesamtfläche in Millimeter (mm) bzw. Liter/m<sup>3</sup> (eigene Darstellung)**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

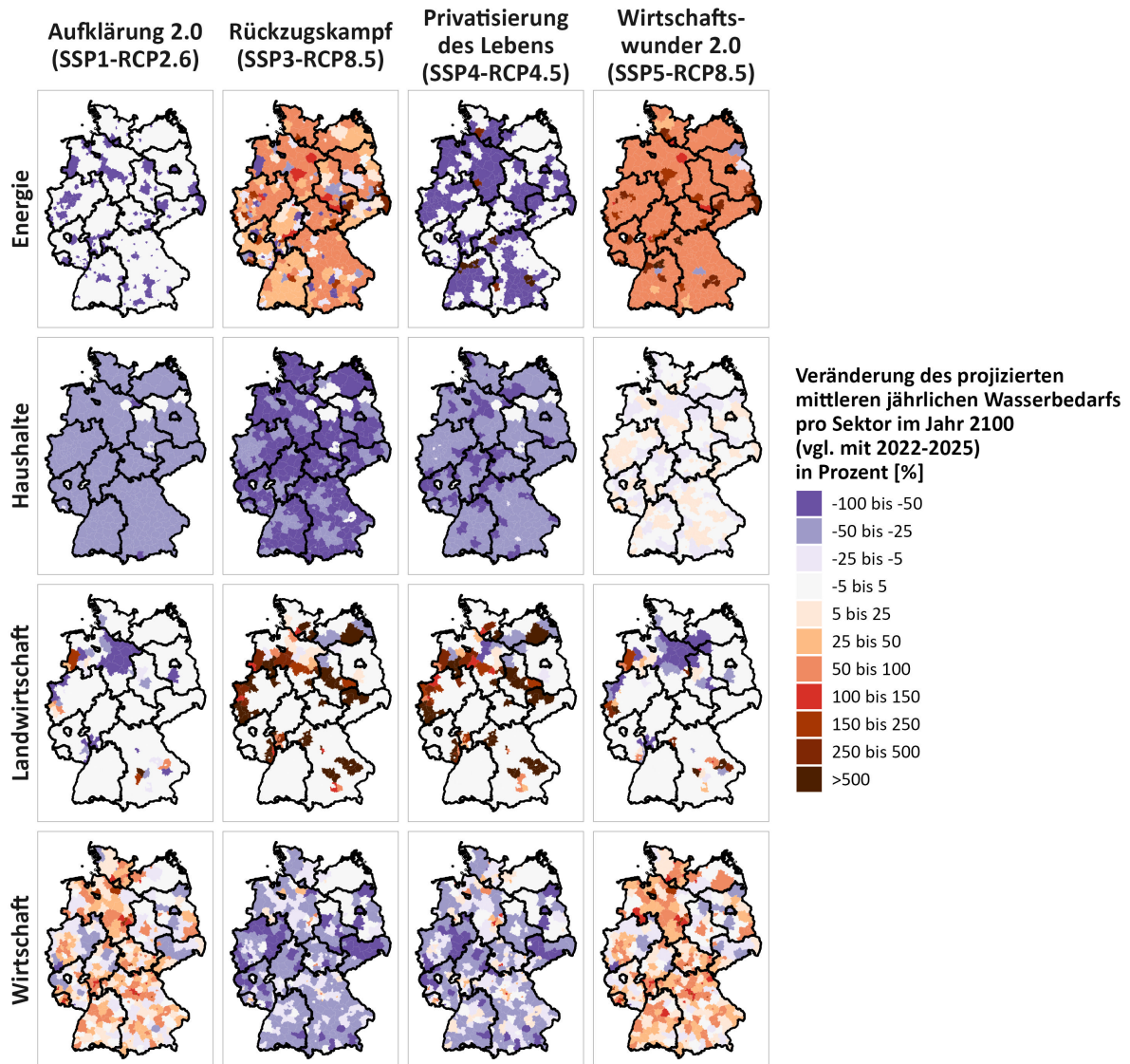
**Abbildung 41: Veränderung des projizierten mittleren jährlichen Gesamtwasserbedarfs im Vergleich zur Ausgangssituation 2022-2025 (siehe Abb. 40) in Prozent [%] für die vier Szenarien in den Jahren 2030, 2050 und 2100 (eigene Darstellung)**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

Dabei zeigen sich deutliche räumliche Unterschiede zwischen Regionen und Kreisen. In allen Szenarien treten ausgeprägte „Wasserbedarfs-Hotspots“ insbesondere im Ruhrgebiet, im Rhein-Main-Gebiet sowie in großen Städten wie Berlin und Hamburg auf. Über das Jahrhundert hinweg ist vor allem in den Szenarien „Rückzugskampf“ (SSP3-RCP8.5) und „Wirtschaftswunder 2.0“ (SSP5-RCP8.5) in vielen Kreisen eine Zunahme des Gesamtwasserbedarfs erkennbar. In den Szenarien „Aufklärung 2.0“ (SSP1-RCP2.6) und „Privatisierung des Lebens“ (SSP4-RCP4.5) deuten sich dagegen eher Abnahmen des Wasserbedarfs an. In diesen beiden Szenarien weisen einzelne Regionen – insbesondere in Nordostdeutschland – sehr geringe Wasserbedarfe auf, während die Hotspots weiterhin bestehen bleiben.

**Abbildung 42: Veränderung des projizierten mittleren jährlichen Wasserbedarfs der einzelnen Sektoren im Vergleich zur Ausgangssituation 2022-2025 (siehe Abb. 40) auf Kreisebene in den vier Szenarien für das Jahr 2100 in Prozent [%] (eigene Darstellung)**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

Abbildung 42 zeigt zudem für das Jahr 2100 eine sektorale Aufschlüsselung der modellierten regionalen Wasserbedarfe (Haushalte, Wirtschaft, Energie und Landwirtschaft). Dabei wird deutlich, dass die Wasserbedarfs-Hotspots vor allem durch die Bedarfe der Haushalte und der Wirtschaft in urbanen Regionen sowie durch räumlich konzentrierte Energieproduktion (insbesondere im Szenario „Rückzugskampf“ (SSP3-RCP8.5) und „Wirtschaftswunder 2.0“ (SSP5-RCP8.5)) geprägt sind. Der landwirtschaftliche Wasserbedarf konzentriert sich hingegen auf ländliche Regionen mit großer landwirtschaftlicher Nutzfläche, darunter Nordostniedersachsen, Sachsen-Anhalt sowie entlang des Rheins flussabwärts ab Karlsruhe und entlang des bayerischen Teils der Donau, insbesondere in den Szenarien „Rückzugskampf“ (SSP3-RCP8.5) und „Privatisierung des Lebens“ (SSP4-RCP4.5). In anderen Regionen, wie z. B. in

Brandenburg wird die landwirtschaftliche Bewässerung von Feldfrüchten trotz zunehmender Dürre und Hitze (ökonomisch) nicht lohnend, was v. a. durch die geringeren Gesamterträge in diesen Regionen zu erklären ist. Dabei ist zu beachten, dass aufgrund mangelnder Daten zum Effekt verschiedener Bodentypen auf Bewässerungsmengen in Deutschland die Bodenqualität in der Modellierung nicht direkt berücksichtigt wurde. Diese könnte die regionale Wirtschaftlichkeit der Bewässerung ebenso beeinflussen.

### 3.2.2 Saisonale Aspekte

Die häusliche Wassernutzung weist eine ausgeprägte Saisonalität auf: Im 2. und 3. Quartal steigen die Verbräuche in der Regel spürbar an (s. Abbildung 6), weil im Frühjahr und Sommer zusätzliche, wetterabhängige Nutzungen wie Gartenbewässerung, Befüllen und Nachfüllen von Pools sowie häufigeres Duschen hinzukommen. In Hitzejahren verstärkt sich dieses Muster deutlich: Längere Trockenphasen und Hitzewellen führen zu höheren Spitzen und insgesamt erhöhtem Pro-Kopf-Verbrauch in den Quartalen 2 und 3, während die Verbräuche im 1. und 4. Quartal deutlich niedriger liegen (s. Abbildung 7). Die vom BDEW bereitgestellten Daten stützen diesen Befund: Auf Basis der Quartalsdaten lässt sich die saisonale Anhebung in den warmen Quartalen konsistent erkennen und in besonders warmen und trockenen Jahren als noch ausgeprägter beobachten. Für eine belastbare Modellierung der zeitlichen Dynamik sind diese quartalsweise aggregierten Informationen jedoch nicht ausreichend.

Der Tourismus in Deutschland ist deutlich saisonal geprägt, mit starken Sommerspitzen in Küsten- und Seeregionen sowie Winterspitzen in Skiregionen und Kurorten. Diese saisonalen und regionalen Schwankungen in den Bevölkerungszahlen wirken sich direkt auf den Wasserbedarf aus.

Auch bei der thermischen Stromerzeugung sind saisonale Muster bei den Kühlwasserentnahmen zu verzeichnen (Lubega und Stillwell, 2018; Mu et al., 2020), die hier nur qualitativ beschrieben werden. In den Sommermonaten steigt der Kühlwasserbedarf tendenziell, weil die Stromnachfrage für Klimatisierung in Gebäuden und für wärmeempfindliche Rechenzentrumsinfrastrukturen zunimmt. Gleichzeitig führt die Erwärmung der Gewässer zu einer verschlechterten Kraftwerkswirkungsweise. Thermische Kraftwerke mit Durchlaufkühlung müssen dann häufig größere Wassermengen entnehmen, um die gleiche Abwärme abzuführen, während Anlagen mit Nasskühltürmen größere Bedarfe haben, weil die Verdunstungsverluste bei hohen Temperaturen zunehmen. Andererseits setzen Umweltauflagen zu Einleittemperaturen und Mindestabflüssen dem Betrieb Grenzen. Dies kann dann in Hitze- und Dürreperioden mit niedrigen Abflüssen in den Gewässern zu geringeren Entnahmen und Leistungsrosselung führen. Diese Komplexität wurde mit den in dieser Studie durchgeführten Modellsimulationen nicht abgebildet, da die Berücksichtigung dieser Effekte eine gekoppelte Energie-Wasser-Modellierung (Stromerzeugung, Wasserverfügbarkeit und Wassertemperatur) erfordert.

Die Produktion von grünem Wasserstoff erfolgt in Zeiten hoher erneuerbarer Einspeisung und niedriger Strompreise. In PV dominierten Systemen sind das vor allem das Sommerhalbjahr und die Mittagsstunden, in windreichen Regionen fällt die Erzeugungsspitze dagegen eher in den Winter. Entsprechend können saisonale Muster der grünen Wasserstoffproduktion regional recht unterschiedlich ausfallen. Saisonale Abschätzungen des Wasserbedarfs wurden aufgrund mangelnder Datenlage nicht durchgeführt.

Auch der Sektor Wirtschaft weist eine saisonale Wassernutzung auf, die jedoch stark von der Branche abhängig ist. Zum einen können höhere Entnahmen (und Verbräuche) im Sommer auftreten, die kühlungsgetrieben sind, zum anderen ergeben sich zusätzliche branchen- bzw. kampagnenabhängige Peaks. Stärke und Richtung hängen jedoch stark vom Prozess, der Kühltechnik, der Gewässerlage und regulatorischen Vorgaben ab. Saisonale Abschätzungen des industriellen Wasserbedarfs wurden aufgrund mangelnder Datenlage nicht durchgeführt.

Der landwirtschaftliche Wasserbedarf konzentriert sich deutlich auf das Sommerhalbjahr (April bis September) und damit auf die vegetativen Phasen der bewässerten Kulturen (s. Abb. 18, 25, 32, und 38). In der Regel werden landwirtschaftliche Kulturen über ihre gesamte Wachstumsphase bewässert, wobei die täglichen Bewässerungsmengen an die jeweilige Wachstumsphase, klimatischen Bedingungen und Bodenfeuchte angepasst werden, z. B. mithilfe von Sensoren. Diese saisonale Ausprägung wird unter Dürre- und Hitzebedingungen zusätzlich verstärkt, da in solchen Perioden erhöhte Bewässerungsmengen erforderlich sind, um Erträge zu stabilisieren, und sich zusätzlich die Vegetationsperiode weiter ausdehnt. Ergebnisse von McNamara et al. (2024) weisen darauf hin, dass der potenzielle Bewässerungsbedarf in Deutschland unter Dürrebedingungen im Median um 72 % zunimmt. Es ist davon auszugehen, dass sich dieser Effekt im Zuge des fortschreitenden Klimawandels weiter verstärken wird. Die starke Saisonalität des landwirtschaftlichen Wasserbedarfs stellt deshalb eine Herausforderung für das Wasserressourcenmanagement dar. Wasserbedarfe für die Frostschuttbewässerung wurden aufgrund fehlender Daten nicht betrachtet.

Die modellierten zukünftigen Wasserbedarfe bilden für den Sektor Haushalt nur bedingt eine Saisonalität ab, für die Sektoren Energie und Wirtschaft wird diese nicht abgebildet. Lediglich für die Landwirtschaft wurden unterjährige Wasserbedarfe simuliert. Dennoch lässt sich aus den zuvor beschriebenen saisonalen Effekten der verschiedenen Sektoren eine für Deutschland ausgeprägte Sommerlastspitze der Wasserbeanspruchung ableiten. In den Monaten April bis September erhöhen Haushalte (Gartenbewässerung, Pools, häufigeres Duschen), Tourismusziele an Küsten und in Seenlandschaften, die Landwirtschaft (Bewässerung) sowie Wirtschaft und Energie (höherer Kühlbedarf bei hohen Luft- und Wassertemperaturen) den Wasserbedarf. Besonders durch Verdunstung und Bewässerung steigt auch der konsumtive Verbrauch. In Hitze- und Dürre Jahren verstärkt sich dieses Muster deutlich. Sommerliches Niedrigwasser und hohe Gewässertemperaturen verringern die verfügbare Ressource und die Verdünnungskapazität. Potenziell sind somit Wasserknappheit und Nutzungskonflikte im Sommer am stärksten ausgeprägt.

## 4 Anschlussfähigkeit und Ergebnisverwendung

Die Entwicklung von Wasserbedarfsszenarien für Deutschland bietet einen strategischen Mehrwert, der weit über klassische statistische Prognosen hinausgeht. Anstatt sich auf einen einzigen, vermeintlich „sicher eintretenden“ Entwicklungspfad zu verlassen, ermöglichen Szenarien die Sensibilisierung für ein breiteres Spektrum möglicher Zukünfte. Dieser Ansatz macht unterschiedliche Entwicklungen – etwa durch den Klimawandel, technologische Sprünge wie die Wasserstoffwirtschaft, demografische Verschiebungen, politische oder sozio-ökonomische Einschnitte – erst greifbar und vorstellbar. Durch die Visualisierung kontrastierender Pfade werden Akteure in Politik, Landwirtschaft und Industrie dazu angeregt, das „Business-as-usual“-Denken zu hinterfragen und die **Unsicherheit künftiger Wasserbedarfe** als planbare Größe zu akzeptieren. Dies schafft die notwendigen Grundlagen, um robuste, vorausschauende Anpassungsstrategien zu entwickeln, die auch unter extremen Bedingungen (z. B. langanhaltenden Dürreperioden) die Versorgungssicherheit in Deutschland gewährleisten.

So können Wasserbedarfsszenarien auf **regionaler Ebene** in Deutschland ein entscheidendes Instrument für die zukunftsorientierte Wasserwirtschaft, Standortpolitik und die Anpassung an den Klimawandel sein. Wichtig ist: Szenarien bilden mögliche Zukünfte ab – sie sind ausdrücklich keine Vorhersagen. Sie zeigen Bandbreiten potenzieller Entwicklungen unter unterschiedlichen Annahmen auf und helfen, Unsicherheiten systematisch zu berücksichtigen. Damit dienen sie nicht nur der Darstellung möglicher künftiger Entwicklungen, sondern fungieren als Planungs- und Entscheidungsgrundlage für Politik, Wasserversorger, Landwirtschaft und Industrie.

Die Erarbeitung und Erörterung der Wasserbedarfsszenarien in Workshops mit relevanten Stakeholdern (Industrie, Umweltverbände, Behörden, etc.) trägt zur Schaffung von Transparenz hinsichtlich zukünftiger Herausforderungen bei. Dies unterstützt die Erfassung wichtiger Faktoren und Dynamiken in der Vorausschau, fördert das gegenseitige Verständnis und ist ein wichtiger Schritt zur konfliktarmen Bewirtschaftung sowie zur Akzeptanz von möglicherweise zukünftig notwendigen Maßnahmen und Entnahmeregelungen.

In diesem Kapitel soll beleuchtet werden, wie die oben beschriebenen Ergebnisse (Szenariennarrative und deren Quantifizierung) auf regionaler und lokaler Ebene und durch verschiedene Stakeholder genutzt werden können.

### 4.1 Identifizierung zukünftiger Wasserengpassregionen ("Hotspots")

Die primäre und vielleicht wichtigste Nutzung regionaler Wasserbedarfsszenarien ist die räumlich aufgelöste quantifizierte Einschätzung der Wasserbedarfe in den verschiedenen Sektoren (Haushalte, Industrie, Landwirtschaft, Energie). Die Identifizierung von Hotspots kann räumlich differenziert für NUTS-3-Regionen erfolgen, z. B. durch die Verschneidung der szenariospezifischen Wasserbedarfe dieser Studie mit den projizierten Änderungen des Wasserdargebots (z. B. aus WADKlim (Stein, U., Tröltzsch, J., Vidaurre, R., Schmitt, H., Bueb, B., Reineke, J., et al. (2024)). Hotspots sind Gebiete, in denen unter den zugrunde gelegten Annahmen eine nachhaltige Wasserbewirtschaftung zukünftig erschwert oder nicht möglich sein kann und in denen Zielkonflikte zwischen Nutzungen wahrscheinlich oder zu erwarten sind. Für die Bewertung nicht-nachhaltiger Wassernutzung ist die Verortung der Wassergewinnung von Bedeutung, d. h., es muss unterschieden werden, ob die Wasserbedarfe aus Grundwasserressourcen oder Oberflächengewässern gedeckt werden oder ob das benötigte Wasser in Form von Wasserstransfers zwischen administrativen Einheiten über die

Fernwassernetze transportiert wurde. Die in dieser Studie ermittelten Ergebnisse bilden die Basis für weiterführende Analysen, in denen die Bedarfe mit der Wasserverfügbarkeit, dem Grundwasserdargebot oder der Grundwasserneubildung verschnitten werden können. Dieser Abgleich ermöglicht eine räumlich hoch aufgelöste Identifizierung von Defizitregionen (Hotspots) sowohl auf regionaler als auch auf nationaler Ebene.

Mit den aktuell erstellten Szenarien lassen sich derzeit keine **saisonalen** Hotspots identifizieren, da die Wasserbedarfsmodelle auf Datenerhebungen des Statistischen Bundesamtes und der Statistischen Landesämter basieren, die keine saisonalen Werte erheben. Eine Ausnahme bildet das Modell zur Berechnung des Bewässerungsbedarfs in der Landwirtschaft, das u. a. auf Klimaprojektionen in hoher raum-zeitlicher Auflösung beruht. Dieser Aspekt muss aber zwingend bei der Regionalisierung der Szenarien berücksichtigt werden und über eine jährliche Durchschnittsbetrachtung hinausgehen, da die **Wasserverfügbarkeit** und der **Bedarf** in Deutschland stark **saisonal** und **regional** variieren (Stein, U., Tröltzsch, J., Vidaurre, R., Schmitt, H., Bueb, B., Reineke, J., et al. (2024)).

Die Quantifizierung möglicher saisonaler Wasserbedarfe ermöglicht es den regionalen Akteuren, potenzielle Engpässe frühzeitig zu erkennen, um:

- ▶ präventive Maßnahmen zu ergreifen, bevor akute Krisen eintreten. Die Ergebnisse können somit direkt in die Klimarisikoanalyse und das Risikomanagement der Wasserversorgungsunternehmen und Behörden integriert werden, um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten.
- ▶ Strategien für eine nachhaltige Wassernutzung zu entwickeln, zu fördern und eine Verschärfung bereits angespannter Situationen in der Zukunft zu vermeiden.

## 4.2 Optimierung der wasserwirtschaftlichen Infrastruktur und Planung

Die Nationale Wasserstrategie<sup>32</sup> verlangt in Aktion 41 die Entwicklung von bundesweit einheitlichen konzeptionellen Leitlinien für die künftige Ausgestaltung von Wasserinfrastrukturen. Die Leitlinien sollen Hinweise zur Berücksichtigung von Klimaresilienz, Ressourcenschonung, Sektorenkopplung und Multifunktionalität bei der Gestaltung von Infrastrukturen unter Berücksichtigung eines integrierten risikobasierten Ansatzes bieten. Regionale Szenarien können die Basis dafür bieten und zur resilienten und nachhaltigen Gestaltung der wasserwirtschaftlichen Infrastruktur beitragen. So können **regionalisierte Szenarien Wasserversorgern helfen, den möglichen zukünftigen Bedarf in ihren Versorgungsgebieten abzuschätzen** und Investitionen in Netzwerk-Erweiterungen, Speicheranlagen (z. B. Talsperren oder Grundwasserspeicher) oder Verbundsysteme (z. B. Fernwasserleitungen) **strategisch zu planen**. Die Dimensionierung der Anlagen kann so unterstützt und an zukünftige Anforderungen angepasst werden, wie es auch in den Länderwasserversorgungskonzepten gefordert wird.

## 4.3 Strategischer Zukunftstest und Maßnahmenentwicklung seitens unterschiedlicher Stakeholder

Die Wasserbedarfsszenarien können durch diverse Stakeholder für die Strategie- und Maßnahmenentwicklung genutzt werden. Anhand der Szenarien können Stakeholder ihre derzeitigen wasserbezogenen Strategien und Maßnahmen auf deren Kompatibilität in den

---

<sup>32</sup> <https://www.bundesumweltministerium.de/download/nationale-wasserstrategie-2023>

unterschiedlichen Szenarien und damit auf ihre Zukunftsrelevanz testen. Hierdurch können bestehende Strategien und Maßnahmen vorausschauend angepasst und neue, zukunftsrelevante Konzepte entwickelt werden, die für verschiedene mögliche Entwicklungspfade relevant und stimmig sind.

#### **4.4 Steuerung und Regulierung der sektoralen Wassernutzung**

Wie zuvor beschrieben, setzt sich der Wasserbedarf aus verschiedenen Sektorbedarfen zusammen, deren Entwicklungen oft durch unterschiedliche Treiber bestimmt werden, beispielsweise Bevölkerungsentwicklung, technologische Innovation, wirtschaftliche Entwicklung, Klimawandel oder Agrarpolitik. Mithilfe regionaler Szenarien ist eine spezifische Identifizierung dieser Treiber möglich.

Gerade in landwirtschaftlich geprägten Regionen ist die Prognose des Bewässerungsbedarfs ein wichtiger Aspekt. Die Szenarien liefern wichtige Informationen, die als Grundlage für die Entwicklung regionaler Bewässerungsstrategien dienen. Zudem tragen sie zur Minimierung möglicher Nutzungskonflikte zwischen Landwirtschaft, Trinkwasserversorgung und wasserabhängiger Ökosysteme bei. Die Identifikation möglicher sektoraler / regionaler Hotspots ermöglicht ein rechtzeitiges Gegensteuern. So können auf dieser Basis gegebenenfalls geeignete Wasserentnahmeentgelte oder Anreize für Anpassungen der landwirtschaftlichen Praxis zur Senkung des Wasserbedarfs (bspw. verbesserter Wasserrückhalt, Anpassung der Bodenbearbeitung und Kulturauswahl, Steigerung der Wassereffizienz) entwickelt werden.

Obwohl der industrielle Gesamtbedarf (insbesondere Kühlwasser) bundesweit rückläufig ist, können lokale bis regionale Neuansiedlungen (z. B. Chipfabriken, Rechenzentren oder Wasserstoffproduktionsanlagen) sowie eine Neuausrichtung der Wirtschaft (vgl. SSP5 „Wirtschaftswunder 2.0“) den Bedarf drastisch erhöhen. Die Szenarien helfen bei der Abwägung neuer Genehmigungen von Wasserentnahmen und der standortbezogenen Bewertung neuer Projekte, um die Wasserressourcen nicht zu überlasten.

## 5 Schlussfolgerungen für das weitere Vorgehen

Mit Blick auf die Forderungen der Nationalen Wasserstrategie, die Prognosefähigkeit sowohl der Dargebots- als auch der Bedarfsseite zu verbessern, ist transparent zu bewerten, welchen Stand das Vorhaben erarbeiten konnte und welche weiteren Schritte erforderlich sind.

Im Vorhaben wurden qualitative Szenarien (Narrative) für die Wasserbedarfsseite entwickelt, die durch verschiedene Modellierungsansätze quantifiziert und zu einem integrierten qualitativ-quantitativen Szenarioset zusammengeführt wurden. Die Darstellung der Wasserbedarfsprojektionen pro Sektor und insgesamt hat dabei einen wichtigen Beitrag zur Schließung von existierenden Lücken in der Literatur geleistet, insbesondere durch die Berücksichtigung von sozioökonomischen Faktoren als Treiber von zukünftigen Wasserbedarfen neben klimatischen Veränderungen durch den Klimawandel. Die zusätzliche Analyse von saisonalen und regionalen Effekten ist besonders hilfreich, um zukünftige potenzielle Versorgungsengpässe und "Hotspots" aufzudecken.

Je nach Szenario und den zugrunde liegenden sozioökonomischen und klimatischen Annahmen variieren die projizierten Wasserbedarfe bis 2100 deutlich (s. Tab. 1). Im Szenario „Wirtschaftswunder 2.0“ (SSP5-RCP8.5) fällt der Bedarf am höchsten aus und liegt im Jahr 2100 um ca. 94 Prozent über dem Referenzjahr 2022. Der Anstieg ist vor allem auf die im Vergleich zu den anderen Szenarien höchsten Wasserbedarfe in den Sektoren Energie, Wirtschaft und Haushalte zurückzuführen. Im Szenario „Rückzugskampf“ (SSP3-RCP8.5) sind hingegen die Bedarfe für landwirtschaftliche Bewässerung am größten, hier verachtfacht sich der Bewässerungsbedarf bis zum Jahr 2100. Die niedrigsten projizierten Gesamtwasserbedarfe ergeben sich in den Szenarien „Privatisierung des Lebens“ (SSP4-RCP4.5) und „Aufklärung 2.0“ (SSP1-RCP2.6). Beide Szenarien liegen bei jeweils -22 Prozent gegenüber dem Referenzjahr 2022. Während die Wasserbedarfe der Haushalte und der Wirtschaft in „Privatisierung des Lebens“ (SSP4-RCP4.5) etwas geringer ausfallen als in „Aufklärung 2.0“ (SSP1-RCP2.6), ist der Bedarf für Kühlwasser und landwirtschaftliche Bewässerung in „Privatisierung des Lebens“ (SSP4-RCP4.5) deutlich höher.

Über alle Szenarien hinweg zeigen sich ausgeprägte Hotspots des Wasserbedarfs – insbesondere im Ruhrgebiet, im Rhein-Main-Gebiet, in Metropolen wie Berlin und Hamburg sowie in bewässerungsintensiven Regionen wie Nordostniedersachsen. Relevante Einflussfaktoren sind insbesondere Bevölkerungsentwicklung, wirtschaftliche Aktivität, Energieversorgung, landwirtschaftliche Produktion und Bewässerung, technologische Entwicklungen und Effizienzgewinne und Urbanisierung sowie klimatische Entwicklungen. Auch (globale) Marktentwicklungen wirken, soweit in den Annahmen berücksichtigt, bedarfsprägend. Die Wasserbedarfsszenarien verstehen sich als maßnahmen- und gegensteuerungsfreie "Baselines", in der z. B. Nachfrage- und Angebotsmanagement oder Infrastrukturmaßnahmen nicht berücksichtigt sind. Dadurch wird sichtbar, wo ohne zusätzliche Steuerung künftig Handlungsdruck entstehen kann. Auswirkungen auf die Ökosysteme können dabei jedoch nicht umfänglich abgebildet werden. Für die Ermittlung ökologischer Wasserbedarfe bspw. zum Erhalt von Mindestwasserabflüssen oder dem Aufrechterhalten des Landschaftswasserhaushalts fehlen entsprechende Daten. Die entwickelten Narrative lassen damit nur eine vage Vorstellung zu, wie sich die Ökosysteme in den jeweiligen Szenarien bis 2100 verändern.

Der Vergleich dieser Ergebnisse mit den im Rahmen der Literaturrecherche (AP2) projizierten Wasserbedarfen zeigt für die Landwirtschaft deutliche Unterschiede. Die in AP2 analysierten Studien modellieren den Bewässerungsbedarf häufig primär auf Basis klimatischer Faktoren. Dies führt in der Regel über alle Klimawandelszenarien hinweg zu leicht bis deutlich steigenden

Bewässerungsbedarfen in Deutschland (z. B. Riediger et al., 2014; Zaun et al., 2024). Der hier verwendete Modellierungsansatz ist hingegen stark durch sozioökonomische Faktoren geprägt, die sich aus den globalen SSPs sowie aus Annahmen der Fachworkshops ableiten. Dies resultiert in einer größeren Spannbreite der projizierten Bewässerungsbedarfe zwischen den einzelnen Szenarien. So sind sowohl langfristige Rückgänge (wie im Szenario „Aufklärung 2.0“ SSP1-RCP2.6) als auch sehr starke Anstiege (wie im Szenario „Rückzugskampf“ SSP3-RCP8.5) möglich. Ähnliche Dynamiken hinsichtlich der zentralen Rolle sozioökonomischer Einflussfaktoren wurden auch in der Studie von Schaldach et al. (2012) für Europa aufgezeigt.

Auch in den Sektoren Haushalt, Wirtschaft und Energie unterscheiden sich die Ergebnisse der hier vorgenommenen Modellierung von der Literaturrecherche. Für die Berechnung des Wasserbedarfs von Haushalten werden zwar regionale Daten zu Bevölkerungsentwicklung und Wasserverbrauch verwendet, jedoch können spezifische Entwicklungen, die teilweise in kommunalen Wasserversorgungskonzepten verwendet werden, nicht aufgenommen werden. Durch den Fokus auf mögliche sozioökonomische und klimatische Entwicklungen kann jedoch eine Bandbreite an Wasserbedarfen aufgestellt werden, welche von einem leichten Anstieg im Szenario „Wirtschaftswunder – SSP5“ bis zu der Reduktion um die Hälfte im Szenario „Rückzugskampf – SSP3“ reichen. Großskalige Studien wie in Mikat et al. (2010) und Bij et al. (2016) zeigen für Südhessen bzw. Westeuropa ähnliche Entwicklungspfade.

Die Entwicklung des Wasserbedarfs bei der Stromerzeugung hängt vor allem von den eingesetzten Energieträgern ab und wird im Wesentlichen durch die jeweiligen RCP-Konzentrationspfade bestimmt. Durch den Einsatz von erneuerbaren Energien wird die thermische Stromerzeugung reduziert und somit auch der Wasserbedarf. Bohrmann et al. (2019) zeigen anhand von Klimaschutzmaßnahmen eine starke Reduktion des Wasserbedarfs, welche mit dem Szenario „Aufklärung 2.0“ vergleichbar ist. Die großskalige Studie von Bij et al. (2016) prognostiziert in Westeuropa einen Rückgang des Wasserbedarfs um 50 % und liegt somit zwischen den hier vorgestellten Szenarien, welche eine Änderung von 2020 bis 2100 zwischen -95 % („Aufklärung 2.0“) und +175 % („Wirtschaftswunder 2.0“) aufzeigen.

Der Wasserbedarf des Wirtschaftssektors reicht 2100 mit den hier entwickelten Narrativen zwischen -25 % („Rückzugskampf“ – SSP3) und +52 % (Wirtschaftswunder 2.0 – SSP5) im Vergleich zu 2022. In der WADKlim-Studie wurde der Bedarf der nicht-öffentlichen Wasserversorgung (Wirtschaft plus Energie) mit drei Szenarien bis zum Jahr 2070 abgeschätzt. Im Jahr 2070 könnte sich der Wasserbedarf der nicht-öffentlichen Wasserversorgung zwischen 7 und 16 Milliarden Kubikmetern liegen. Die Schwankungsbreite aus WADKlim ist etwas geringer als in dieser Studie, jedoch vergleichbar mit den Ergebnissen der drei Szenarien „Aufklärung 2.0“ (7,6 Mrd. m<sup>3</sup>), „Rückzugskampf“ (15,8 Mrd. m<sup>3</sup>) und „Privatisierung des Lebens“ (8,9 Mrd. m<sup>3</sup>). In der großskaligen Studie von Bij et al. (2016) werden für Westeuropa bis 2100 gleichbleibende Wasserbedarfe prognostiziert und liegen somit ebenfalls innerhalb der modellierten Ergebnisse.

Der Vergleich zwischen hier modellierten Ergebnissen und anderen Studien ist für alle Sektoren schwierig, da die erfassten Studien selbst sehr heterogen sind und oftmals keine oder andere Szenarioansätze verwenden.

Die Quantifizierung zukünftiger Wasserbedarfe ist annahmenbasiert, die Ergebnisse hängen wesentlich von den abgeleiteten Annahmen, den Modellstrukturen und Vereinfachungen ab. Diese sind u. a. durch die aktuelle Datenlage zu sektoralen Wasserentnahmen in Deutschland bedingt, v. a. bei Haushalten, Industrie und in der Landwirtschaft. Wasserentnahmen werden in einem dreijährlichen Turnus von den Statistischen Landesämtern veröffentlicht. Eine Skalierung der durch die Länder erhobenen Daten erfolgt auch auf NUTS-3-Ebene, sofern keine

Einzelnutzung besteht. Durch die Erhebung raum-zeitlich detaillierter Wasserbedarfsdaten könnte das Prozessverständnis und die Prognosefähigkeit der verwendeten Modelle bedeutend gesteigert werden. Da Wasserknappheit temporär über Tage und Wochen auftritt, wäre eine Erfassung von wöchentlichen oder monatlichen Wassernutzungsdaten sinnvoll. Darüber hinaus ist anzumerken, dass die Modellierung Szenario-Input nutzt, der auf dem verfügbaren Expert\*innenwissen der Fachworkshops beruhen. Mangels Expertise in einzelnen Teilsektoren weisen diese Modellinputs ein kenntnisbasiertes Bias auf.

Die Studie prognostiziert keine Einzelzukunft, sondern entwirft vier plausible Szenarien, die durch zentrale Treiber und kritische Unsicherheiten, wie Klima, Politik oder Technologie, definiert werden. Die vier Szenarien und quantifizierten Modellergebnisse spannen einen Raum möglicher sektoraler Wasserbedarfe auf. Diese Aufspannung kann dazu dienen, in folgenden Schritten Strategien auf ihre Zukunftsfähigkeit zu prüfen, Risiken frühzeitig zu identifizieren und robuste Handlungspläne für die zukünftigen Entwicklungen zu entwerfen.

## Quellenverzeichnis

- AG Energiebilanzen (AGEB) (2025). Bruttostromerzeugung in Deutschland nach Energieträgern (STRERZ-Abgabe-2025-06.pdf). <https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2025/02/STRERZ-Abgabe-2025-06.pdf> [Letzter Abruf am 15.09.2025]
- Alcamo, J. (2008). Environmental futures: The practice of environmental scenario analysis. Earthscan.
- Alcamo, J., Henrichs, T. (2008): Chapter Two Towards Guidelines for Environmental Scenario Analysis, Developments in Integrated Environmental Assessment, Elsevier, Volume 2, ISBN 9780444532930, [https://doi.org/10.1016/S1574-101X\(08\)00402-X](https://doi.org/10.1016/S1574-101X(08)00402-X)
- Bachner, G., Lincke, D. & Hinkel, J. (2022). The macroeconomic effects of adapting to high-end sea-level rise via protection and migration. *Nat Commun* 13, 5705, <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33043-z>
- Bauer, N., Calvin, K., Emmerling, J., Fricko, O., Fujimori, S., Hilaire, J., Eom, J., Krey, V., Kriegler, E., Mouratiadou, I., de Boer, H. S., Berg, M. v. d., Carrara, S., Daigolou, V., Drouet, L., Edmonds, J., Gernaat, D., Havlik, P., Johnson, N., Klein, D., Kyle, P., Marangoni, G., Masui, T., Pietzcker, R. C., Strubegger, M., Wise, M., Riahi, K., Vuuren, D. P. v. (2017). Shared socio-economic pathways of the energy sector - quantifying the narratives. - *Global Environmental Change*, 42, 316-330., <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.07.006>
- Bernhardt, J.J., Stupak, N., Neuenfeldt, S., Potts, F. (2025). Status quo der Bewässerung in Deutschland. Thünen Working Paper 258. [https://literatur.thuenen.de/digbib\\_extern/dn069402.pdf](https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn069402.pdf) [Letzter Abruf am 04.11.2025]
- Bitkom (2025). Rechenzentren in Deutschland. Aktuelle Marktentwicklungen (Update 2025), <https://doi.org/10.64022/2025-rechenzentren>
- BMUV (2023): Nationale Wasserstrategie. Kabinettsbeschluss vom 15. März 2023. <https://www.bundesumweltministerium.de/download/nationale-wasserstrategie-2023> [Letzter Abruf am 04.11.2025]
- Boeing, F. & Marx, A. (2022). Klimafolgenstudie für das DVGW-Innovationsprogramm "Zukunftsstrategie Wasser", Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ, LeipzigBundesnetzagentur. (2025). Kraftwerkliste (Datenstand 14. Mai 2025). <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerkliste/start.html>, [Letzter Abruf am 15.09.2025]
- BZL (2024). Wie viel landwirtschaftliche Fläche wird in Deutschland bewässert? <https://www.landwirtschaft.de/infothek/infografiken/uebersicht-aller-infografiken/wieviel-landwirtschaftliche-flaeche-wird-in-deutschland-bewaessert> [Letzter Abruf am 04.11.2025]
- Calvin, K., Bond-Lamberty, B., Clarke, L., Edmonds, J., Eom, J., Hartin, C., Kim, S., Kyle, P., Link, R., Moss, R., McJeon, H., Patel, P., Smith, S., Waldhoff, S., Wise, M. (2016). The SSP4: A world of deepening inequality. *Global Environmental Change*. 42, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.06.010>
- Dellink, R., Châteauneuf, J., Lanzi, E., B. Magné, B. (2017). Long-term economic growth projections in the Shared Socioeconomic Pathways, *Global Environmental Change* Volume 42, January 2017, Pages 200-214, <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2015.06.004>
- Diemel, T. (2024). Zeitlich und räumlich hochaufgelöste Analyse von Wassernutzungsdaten in Deutschland im Kontext des Klimawandels (Projektarbeit). Ruhr-Universität Bochum.
- European Commission: Directorate-General for Energy, Hinterholzer, S., Lopes Bautista, P., Marx, N., Furda, P., Bolchi, M., Dragan, I., Beucker, S., Heatubun, D., & Hintemann, R. (2025). Assessment of next steps to promote the energy performance and sustainability of data centres in EU, including the establishment of an EU-wide

rating scheme: second technical report, Publications Office of the European Union.

<https://data.europa.eu/doi/10.2833/0828045>

Fink, A., Jürgensmeier, H., Ohse, S., Kuhle, J. (2022). New Global Scenarios. World Economy, Power Shift and Global Architectures, Paderborn, [https://www.scmi.de/images/downloads/dateien/en/scmi\\_new-global-scenarios.pdf](https://www.scmi.de/images/downloads/dateien/en/scmi_new-global-scenarios.pdf) [Letzter Abruf am 25.03.2025]

Fujimori, S., Hasegawa, T., Masui, T., Takahashi, K., Silva Herran, D., Dai, H., Hijioka, Y., Kainuma, M. (2016). SSP3: AIM implementation of Shared Socioeconomic Pathways. *Global Environmental Change*. 42. 10.1016/j.gloenvcha.2016.06.009.

Gao, J., (2017). Downscaling Global Spatial Population Projections from 1/8-degree to 1-km Grid Cells. NCAR Technical Note NCAR/TN-537+STR, <https://doi.org/10.5065/D60Z721H>

Gramberger, M., Zellmer, K., Kok, K., Metzger M.J. (2014). Stakeholder integrated research (STIR): a new approach tested in climate change adaptation research, *Climatic Change* 128(3-4), February 2014, <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1225-x>

Hadjimichael, A., Quinn, J. D., Wilson, E., Reed, P., Basdekas, L., Yates, D., Garrison, M. (2020). Defining robustness, vulnerabilities, and consequential scenarios for diverse stakeholder interests in institutionally complex river basins. *Earth's Future*, 7, e2020EF001503. <https://doi.org/10.1029/2020EF001503>

Hattermann, F., Huang, S., & Koch, H. (2015). Climate change impacts on hydrology and water resources. *Meteorologische Zeitschrift*, 24(2), 201–211. <https://doi.org/10.1127/metz/2014/0575>

Heilemann, J., Klassert, C., Samaniego, L., Thober, S., Marx, A., Boeing, F., Klauer, B., Gawel, E. (2024). Projecting impacts of extreme weather events on crop yields using LASSO regression. *Weather and Climate Extremes*, 46, 100738. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2024.100738>

Heilemann, J., Nagpal, M., Werner, S., Klauer, B., Gawel, E., Klassert, C. (2025). Scenario projections of future irrigation water demand for field crops in Germany considering farmers' adaptive land use. *Agricultural Water Management*, 318, 109699. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109699>

Howitt, R. E. (1995). Positive Mathematical Programming. *American Journal of Agricultural Economics*, 77(2), 329–342. <https://doi.org/10.2307/1243543>

Howitt, R.E., Medellín-Azuara, J., MacEwan, D., Lund, J.R. (2012). Calibrating disaggregate economic models of agricultural production and water management. *Environ. Model. Softw.* 38, 244–258. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.06.013>.

Jones, B., O'Neill, B.C., (2016). Spatially explicit global population scenarios consistent with the Shared Socioeconomic Pathways. *Environmental Research Letters* 11, 84003, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/8/084003>

Jones, B., O'Neill, B. C., & Gao, J. (2020). *Global 1-km Downscaled Population Base Year and Projection Grids for the Shared Socioeconomic Pathways (SSPs), Revision 01 (Version 1.01)* [Data set]. Palisades, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). <https://doi.org/10.7927/Q7Z9-9R69> Date Accessed: 2026-01-19

Kahlenborn, W., Porst, L., Voß, M., Fritsch, U., Renner, K., Zebisch, M., Wolf, M., Schönthaler, K., Schauser, I. (2021). Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland. CLIMATE CHANGE 26/2021 Umweltbundesamt, <https://doi.org/10.60810/openumwelt-7609>

Kasper K., Pedde, S., Gramberger, M., Harrison, P.A., Holman I.P. (2019). New European socio-economic scenarios for climate change research: operationalising concepts to extend the shared socio-economic pathways, *Regional Environmental Change* (2019) 19:643–654 <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1400-0>

- Kasper, K., Bärlund, I., Flörke, M., Holman, I., Gramberger, M., Sendzimir, J., Stuch, B., Zellmer, K. (2014). European participatory scenario development: strengthening the link between stories and models, *Climatic Change* 128(3-4), June 2014, <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1143-y>
- Keywan R., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O’Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Crespo Cuaresma, J., Samir KC, Leimbach. M., , Jiang, L., Kram, T., Rao, S, Emmerling, J., Ebi, K., Hasegawa, T., Havlík, P., Humpenöder F., Da Silva, L.A., Smith S., Stehfest,E., Bosetti, V., Eom, J., Gernaat, D., Masui, T., Rogelj, J., Strefler, J., Drouet, L., Krey, V., Luderer, G., Harmsen, M., Takahashi, K., Baumstark, L., Doelman, J.C., Kainuma, M., Klimont, Z., Marangoni, G., Lotze-Campen, H., Obersteiner, M., Tabeau,A., Tavoni. M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview, *Global Environmental Change*, Volume 42, Pages 153-168, 2017, ISSN 0959-3780, <https://doi.org/110.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Kemmler, A., Kirchner, A., Auf der Maur, A., Ess, F., Kreidelmeyer, S., Piégsa, A., Spillmann, T., Straßburg, S., Wünsch, M., Ziegenhagen, I., Schlomann, B., Plötz, P., Lutz, C., Becker, L., Fritsche, U. (2021). *Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050 - Gesamtdokumentation der Szenarien.* [https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/energiewirtschaftliche-projektionen-und-folgeabschaetzungen-2030-2050.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/energiewirtschaftliche-projektionen-und-folgeabschaetzungen-2030-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=1) [Letzter Abruf am 25.03.2025]
- Kriegler, E., Bauer, N., Popp, A., Humpenöder, F., Leimbach, M., Strefler, J., Baumstark, L., Bodirsky, B. L., Hilaire, J., Klein, D., Mouratiadou, I., Weindl, I., Bertram, C., Dietrich, J. P., Luderer, G., Pehl, M., Pietzcker, R. C., Piontek, F., Lotze-Campen, H., Biewald, A., Bonsch, M., Giannousakis, A., Kreidenweis, U., Müller, C., Rolinski, S., Schultes, A., Schwanitz, J., Stevanović, M., Calvin, K., Emmerling, J., Fujimori, S., Edenhofer, O. (2017). Fossil-fueled development (SSP5): An energy and resource intensive scenario for the 21st century. - *Global Environmental Change*, 42, 297-315. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.015>
- LAWA – Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, Ständiger Ausschuss „Oberirdische Gewässer und Küstengewässer“ (LAWA-AO). (2020). *LAWA-Empfehlung zur Ermittlung einer ökologisch begründeten Mindestwasserführung in Ausleitungsstrecken von Wasserkraftanlagen (Produkt-Datenblatt PDB AO19, Beschlüsse der 144-149 LAWA VV).* [https://www.lawa.de/documents/lawa-mindestwasser-barrierefrei\\_1689840769.pdf](https://www.lawa.de/documents/lawa-mindestwasser-barrierefrei_1689840769.pdf) [Letzter Abruf am 25.03.2025]
- Leimbach, M., Kriegler, E., Roming, N., Schwanitz, J. (2017). Future growth patterns of world regions - A GDP scenario approach. - *Global Environmental Change*, 42, 215-225. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.02.005>
- Li, P., Yang, J., Islam, M. A., & Ren, S. (2023). Making ai less” thirsty”: Uncovering and addressing the secret water footprint of ai models, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.03271>
- Lohrmann, A., Farfan, J., Caldera, U., Lohrmann, C., Breyer, C. (2019). Global scenarios for significant water use reduction in thermal power plants based on cooling water demand estimation using satellite imagery. *Nat Energy* 4, 1040–1048 <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0501-4>
- Lubega, W. N.; Stillwell, A. S. (2018). Maintaining electric grid reliability under hydrologic drought and heat wave conditions. *Appl. Energy* ,210, 538–549. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.091>
- Lutz, C., Becker, L., Ulrich, P., Distelkamp, M. (2019). *Sozioökonomische Szenarien als Grundlage der Vulnerabilitätsanalysen für Deutschland.*
- McNamara, I., Flörke, M., Uschan, T., Baez-Villanueva, O.M., Herrmann, F. (2024). Estimates of irrigation requirements throughout Germany under varying climatic conditions. *Agric. Water Manag.* 291, 108641. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108641>.

McNamara, I., Herrmann, F. (2024). Szenarien (Projektionen) für einen zukünftigen Bewässerungsbedarf. In: Stein, U., Tröltzsch, J., Vidaurre, R., Schmitt, H., Bueb, B., Reineke, J., et al. (2024). Auswirkung des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit – Anpassung an Trockenheit und Dürre in Deutschland (WADKlim). Abschlussbericht. Umweltbundesamt: Dessau Roßlau. UBA TEXTE 143/2024. <https://doi.org/10.60810/openumwelt-7523>

Mensah, T.N.O., Oyewo, A.S., Breyer, C. (2025). The global sustainable bioenergy potential until 2050 in global-national resolution. *Appl. Energy*, 400, 126464. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126464>

Mu, M., Zhang, Z., Cai, X., Tang, Q. (2020). Seasonal risk assessment of water-electricity nexus systems under water consumption policy constraint. *Environ. Sci. Technol.*, 54, 3793-3802. <https://dx.doi.org/10.1021/acs.est.0c00171?ref=pdf>

NH (2024). Neue Horizonte 2045 – Missionen für Deutschland, [https://www.d2030.de/wp-content/uploads/2024/09/D2045\\_Neue-Horizonte-Studienreport.pdf](https://www.d2030.de/wp-content/uploads/2024/09/D2045_Neue-Horizonte-Studienreport.pdf) [Letzter Abruf am 25.03.2025]

O'Neill, B.C., Kriegler, E., Riahi, K., Riahi, K., Ebi, K.L., Hallegatte, S., Carter, T.R., Mathur, R., van Vuuren, D.P. (2014). A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change* 122, 387–400 <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0905-2>

O'Neill, B.C., Carter, T.R., Ebi, K., Harrison, P.A., Kemp-Benedict, E., Kok, K., Kriegler, E., Preston, B.L., Riahi, K., Sillmann, J., van Ruijven, B.J. van Vuuren, D., Carlisle, D., Conde, C., Fuglestvedt, J. Green, C., Hasegawa, T., Leininger, J. Monteith, S. Pichs-Madruga, R. (2020). Achievements and needs for the climate change scenario framework. *Nat. Clim. Change* 10 (12), 1074–1084. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00952-0>.

O'Neill, B.C., Kriegler, E., Kristie L. E., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D.S., van Ruijven, B., van Vuuren, D., Birkmann, J., Kok, K., Levy, M., Solecki, W. (2015). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*. 42. 10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004.

OECD (2021), *Global Scenarios 2035: Exploring Implications for the Future of Global Collaboration and the OECD*, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/df7ebc33-en>

Pedde, S., Harrison, P.A., Holman, P.A., Powney, G.D., Lofts, S., Schmucki, R., Gramberger, M., Bullock J.M. (2020). Enriching the Shared Socioeconomic Pathways to co-create consistent multi-sector scenarios for the UK, *Science of the Total Environment*, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143172>, 2020.

Popp, A., Calvin, K., Fujimori, S., Havlik, P., Humpenöder, F., Stehfest, E., Bodirsky, B.L., Dietrich, J.P., Doelmann, J.C., Gusti, M., et al. (2017). Land-use futures in the shared socio-economic pathways. *Glob. Environ. Change* 42, 331–345. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.10.002>

Riahi, K., van Vuuren, D.P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., et al. (2017). The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview, *Global Environmental Change Volume 42*, January 2017, Pages 153-168, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>

Ringland, Gill (2006). *Scenario Planning: Managing for the Future* (2nd ed.). John Wiley & Sons

Saravia, F., Gehrmann, S., Schwarz, S., Koch, M. (2024). Gesamtwasserbedarf für die Wasserelektrolyse. Wie groß ist der Wasserfußabdruck einschließlich der Kühlsysteme?, <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/wasserelektrolyse-gesamtwasserbedarf-factsheet-dvgw.pdf> [Letzter Abruf am 25.03.2025]

Schwartz, Peter (1996): *The Art of the Long View: Planning for the Future in an Uncertain World*. Crown, 1996.

Simon, S., Schöpfer, R., Schumacher, D., Meyer, C. (2019). Auswirkungen der Sommer-trockenheit 2018 auf die öffentliche Wasserversorgung. *energie-wasser-praxis*, 3/2019, p. 14-19.

- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2025a). Umweltökonomische Gesamtrechnungen (UGR). Wassergesamtrechnung. Berichtszeitraum 2001 bis 2022. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/rohstoffe-materialfluesse-wasser/Publikationen/Downloads/statistischer-bericht-ugr-wassergesamtrechnung-5851401.html> [Letzter Abruf am 18.08.2025]
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2025b). Anschlussgrad, Wasserabgabe - Stichtag/Jahressumme - regionale Tiefe: Kreise und krfr. Städte. 32211-02-03-4. <https://www.regionalstatistik.de/genesis/> [Letzter Abruf am 15.07.2025]
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2025c). Bruttoinlandsprodukt - Jahressumme - regionale Tiefe: Kreise und krfr. Städte. 82000-01-01-4. <https://www.regionalstatistik.de/genesis/> [Letzter Abruf am 15.07.2025]
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2025d). Bruttowertschöpfung nach Wirtschaftsbereichen - Jahressumme - regionale Tiefe: Kreise und krfr. Städte. 82000-02-01-4. <https://www.regionalstatistik.de/genesis/> [Letzter Abruf am 15.07.2025]
- Stein, U., Tröltzsch, J., Vidaurre, R., Schritt, H., Bueb, B., Reineke, J., et al. (2024). Auswirkung des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit – Anpassung an Trockenheit und Dürre in Deutschland (WADKlim). Abschlussbericht. Umweltbundesamt: Dessau Roßlau. UBA TEXTE 143/2024. <https://doi.org/10.60810/openumwelt-7523>
- STEPSEC (2024). Forschungsprojekt zur landbasierten Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmosphäre (CDR) in Deutschland, <https://www.geo.lmu.de/geographie/de/forschung/physische-geographie-und-erdsysteminteraktionen/forschungsprojekte-publikationen/stepsec/> [Letzter Abruf am 15.07.2025]
- UNEP (2024). Navigating New Horizons, A global foresight report on planetary health and human wellbeing, <https://www.unep.org/resources/global-foresight-report> [Letzter Abruf am 15.07.2025]
- UWCA (2024). Uncharted water conflicts ahead – Mapping the Scenario Space for Germany in the year 2050 <https://www.frontiersin.org/journals/water/articles/10.3389> [Letzter Abruf am 15.07.2025]
- van der Heijden, Kees (2005). Scenarios: The Art of Strategic Conversation (2nd ed.). John Wiley & Sons
- Vuuren, D. P. V., Stehfest, E., Gernaat, D. E. H. J., Doelman, J. C., Berg, M. v. d., Harmsen, M., Boer, H. S. d., Bouwman, L. F., Daioglou, V., Edelenbosch, O. Y., Girod, B., Kram, T., Lassaletta, L., Lucas, P. L., Meijl, H. v., Müller, C., Ruijven, B. J. v., Sluis, S. v. d., Tabeau, A. (2017). Energy, land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm. - *Global Environmental Change*, 42, 237-250. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.008>
- Wang, T., Sun, F. (2022). Global gridded GDP data set consistent with the shared socioeconomic pathways. *Sci Data* 9, 221 <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01300-x>
- Wang, T., & Sun, F. (2023). Global gridded GDP under the historical and future scenarios [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.789840>
- Zaun, F., aus der Beek, T., Sturm, S., Vollmer, T., Müller, B. M., Streck, T., Weber, T. (2024). WatDEMAND: Multi-sektorale Wasserbedarfsszenarien für Deutschland und Abschätzung zukünftiger Regionen mit steigender Wasserknappheit Abschlussbericht April 2024. DVGW-Förderkennzeichen W 202124 und W 202307

## Quellenverzeichnis Kapitel 2

### Öffentliche Wasserversorgung, Wasserversorgung von Haushalten

- Babel, Mukand S., Maporn, Nisuchcha, Shinde, Victor R. (2014). Incorporating Future Climatic and Socioeconomic Variables in Water Demand Forecasting. A Case Study in Bangkok. In. *Water Resour Manage* 28 (7), S. 2049–2062, <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0598-y>.

- Bao, Keyu, Padsala, Rushikesh, Thrän, Daniela, Schröter, Bastian (2020). Urban Water Demand Simulation in Residential and Non-Residential Buildings Based on a CityGML Data Model. In. IJGI 9 (11), S. 642. <https://doi.org/10.3390/ijgi9110642>.
- BDEW (2024). Entwicklung des personenbezogenen Wassergebrauches. <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/entwicklung-des-personenbezogenen-wassergebrauches/> [Letzter Abruf am 20.11.2024].
- Bijl, David L., Bogaart, Patrick W., Kram, Tom, Vries, Bert J.M. de, van Vuuren, Detlef P. (2016). Long-term water demand for electricity, industry and households. In. Environmental Science & Policy 55, S. 75–86. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.09.005>.
- Choudhary, M, Sharma, R., , Sudhir, K. (2012). Development of residential water demand model for a densely populated area of Jaipur city, India. In. Journal of Water Sanitation and Hygiene for Development 2 (1), S. 10–19. <https://doi.org/10.2166/washdev.2012.029>.
- Destatis (2022). 15. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsvorausberechnung/begleitheft.html?nn=208696#ergebnisse> [Letzter Abruf am 25.09.2024].
- Destatis (2023a). Statistischer Bericht – Umweltökonomische Gesamtrechnung – Wassergesamtrechnung – Berichtszeitraum 2001-2019, [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/rohstoffe-materialfluesse-wasser/\\_inhalt.html#\\_xgpvm5qyc](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/rohstoffe-materialfluesse-wasser/_inhalt.html#_xgpvm5qyc) [Letzter Abruf am 25.09.2024].
- Destatis (2023b). Statistischer Bericht - Landwirtschaftliche Betriebe – Bewässerung - 2022. [https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Landwirtschaftliche-Betriebe/\\_inhalt.html, ywj3c8hk6](https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Landwirtschaftliche-Betriebe/_inhalt.html, ywj3c8hk6), [Letzter Abruf am 19.03.2026].
- Destatis (2024). Anschlussgrad sowie Wasserabgabe an Haushalte, gewerbliche und sonstige Abnehmer – öffentliche Wasserversorgung in Deutschland von 1991 bis 2022, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Tabellen/ww-01-wasserabgabe1991-2022.html> [Letzter Abruf am 25.09.2024].
- DVGW (2024). Szenarien der zukünftigen Wassergewinnung aus den natürlichen Süßwasserressourcen für Deutschland. Überblick aus aktuellen DVGW- Studien und statistischen Daten. <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/szenarien-wassergewinnung-dvgw.pdf>, zuletzt geprüft am 06.01.2025 [Letzter Abruf am 25.09.2024]
- Flörke, M., Kynast, E., Bärlund, I., Eisner, S., Wimmer, F., Alcamo, J. (2013). Domestic and industrial water uses of the past 60 years as a mirror of socio-economic development. A global simulation study. In. Global Environmental Change 23 (1), S. 144–156. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.10.018>.
- Keim, B., Müller, S. (2017). Wasserbilanz Tübingen 2035 Bedarf und Sicherstellung der Wasserversorgung. Hg. v. Stadtwerke Tübingen. <https://www.tuebingen.de/gemeinderat/getfile.php?id=40330&type=do> [Letzter Abruf am 26.09.2024].
- Liehr, S., Schulz, O., Kluge, T., Sunderer, G., Wackerbauer, J. (2016). Aktualisierung der integrierten Wasserbedarfsprognose für Hamburg bis zum Jahr 2045. [https://www.researchgate.net/profile/johann-wackerbauer/publication/298706966\\_update\\_of\\_the\\_integrated\\_water\\_demand\\_forecast\\_for\\_the\\_city\\_of\\_hamburg\\_until\\_2045-part\\_1\\_foundation\\_and\\_methodology/links/56f3c00008ae81582becf90b/update-of-the-integrated-water-demand-forecast-for-the-city-of-hamburg-until-2045-part-1-foundation-and-methodology.pdf](https://www.researchgate.net/profile/johann-wackerbauer/publication/298706966_update_of_the_integrated_water_demand_forecast_for_the_city_of_hamburg_until_2045-part_1_foundation_and_methodology/links/56f3c00008ae81582becf90b/update-of-the-integrated-water-demand-forecast-for-the-city-of-hamburg-until-2045-part-1-foundation-and-methodology.pdf) [Letzter Abruf am 20.08.2024].
- Mikat, H., Wagner, H., Roth, U. (2010). Wasserbedarfsprognose für Südhessen 2100. In. gwf-wa 151 (12), S. 1178–1186. <https://doi.org/10.17560/gwfw.v151i12.1065>.

Möller, K., Burgschweiger, J. (2008). Wasserversorgungskonzept für Berlin und für das von den BWB versorgte Umland (Entwicklung bis 2040). Hg. v. Berliner Wasserbetriebe.

[https://www.berlin.de/sen/uvk/\\_assets/umwelt/wasser-und-geologie/publikationen-und-merkblaetter/wvk2040.pdf?ts=1726206851](https://www.berlin.de/sen/uvk/_assets/umwelt/wasser-und-geologie/publikationen-und-merkblaetter/wvk2040.pdf?ts=1726206851) [Letzter Abruf am 26.09.2024].

PfK Ansbach GmbH (2019). Wasserbedarfsberechnung. Sanierung der Wasserversorgung. Hg. v. Zweckverband WV Unteres Inntal. <https://www.landkreis-passau.de/media/9675/a4-anlage-6-wasserbedarfsberechnung.pdf> [Letzter Abruf am 19.08.2024].

Schleich, J., Hillenbrand, T. (2009). Determinants of residential water demand in Germany. In. *Ecological Economics* 68 (6), S. 1756–1769. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.11.012>.

Senatsverwaltung Umwelt, Mobilität, Verbraucher- und Klimaschutz (SenUMVK) Berlin (2024). Masterplan Wasser Berlin. [https://www.berlin.de/sen/uvk/\\_assets/umwelt/wasser-und-geologie/masterplan-wasser/masterplan-wasser-berlin.pdf?ts=1702027463](https://www.berlin.de/sen/uvk/_assets/umwelt/wasser-und-geologie/masterplan-wasser/masterplan-wasser-berlin.pdf?ts=1702027463) [Letzter Abruf am 19.12.2024].

Stadt Castrop-Rauxel (Hg.) (2018). Wasserversorgungskonzept der Stadt Castrop-Rauxel für die Jahre 2018 bis 2023. EUV Stadtbetrieb Castrop-Rauxel. [https://www.euv-stadtbetrieb.de/fileadmin/content/downloads/Umweltschutz\\_/Wasserversorgungskonzept\\_Stadt\\_Castrop-Rauxel.pdf](https://www.euv-stadtbetrieb.de/fileadmin/content/downloads/Umweltschutz_/Wasserversorgungskonzept_Stadt_Castrop-Rauxel.pdf) [Letzter Abruf am 26.09.2024].

Stadt Herten (Hg.) (2024). Wasserversorgungskonzept der Stadt Herten für die Jahre 2024 bis 2029. [https://www.herten.de/fileadmin/user\\_upload/Wasserversorgungskonzept\\_24\\_Herten.pdf](https://www.herten.de/fileadmin/user_upload/Wasserversorgungskonzept_24_Herten.pdf) [Letzter Abruf am 19.12.2024].

Stadt Oberhausen (Hg.) (2018). Wasserversorgungskonzept für die Stadt Oberhausen. [https://www.oberhausen.de/de/index/rathaus/verwaltung/stadtplanung-bauen-mobilitat-umwelt/umwelt/wasser/wasser\\_material/wasserversorgungskonzept\\_april2018.pdf](https://www.oberhausen.de/de/index/rathaus/verwaltung/stadtplanung-bauen-mobilitat-umwelt/umwelt/wasser/wasser_material/wasserversorgungskonzept_april2018.pdf) [Letzter Abruf am 26.09.2024].

Wasser und Abwasser Wuppertal (WAW) (2024). Wasserversorgungskonzept der Stadt Wuppertal. Hg. v. Stadt Wuppertal. <https://ris.wuppertal.de/getfile.asp?id=328022&type=do> [Letzter Abruf am 19.12.2024].

Wischhusen, R., Lippstreu, C. (2017). Wasserbedarfsprognose. Hg. v. Stadtwerke Delmenhorst GmbH. [https://www.delmenhorst.de/medien/bindata/leben/umwelt-abfall/wasserwirtschaft/Kapitel\\_02\\_Wasserbedarfsprognose\\_27.02.2017.pdf](https://www.delmenhorst.de/medien/bindata/leben/umwelt-abfall/wasserwirtschaft/Kapitel_02_Wasserbedarfsprognose_27.02.2017.pdf) [Letzter Abruf am 26.09.2024].

## **Landwirtschaft**

Aus der Beek, T., Flörke, M., Lapola, D. M., Schaldach, R., Voß, F., Teichert, E. (2010). Modelling historical and current irrigation water demand on the continental scale. *Europe*. In. *Adv. Geosci.* 27, S. 79–85. <https://doi.org/10.5194/adgeo-27-79-2010>.

Bernhardt, J.J., Rolfes, L., Kreins, P., Henseler, M. (2022). Ermittlung des regionalen Bewässerungsbedarfs für die Landwirtschaft in Bayern. Braunschweig. Johann Heinrich von Thünen-Institut, 138 p, Thünen Rep 96, <https://doi.org/10.3220/REP1657029754000>.

Drastig, K., Libra, J., Kraatz, S., & Koch, H. (2016b). Relationship between irrigation water demand and yield of selected crops in Germany between 1902 and 2010. a modeling study. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6235-8>

Drastig, K., Prochnow, A., Libra, J., Koch, H., & Rolinski, S. (2016a). Irrigation water demand of selected agricultural crops in Germany between 1902 and 2010. *The Science of the Total Environment*, 569–570, 1299–1314. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.206>

Egerer, S., Puente, Fajardo, A., Peichl, M., Rakovec, O., Samaniego, L., Schneider, U. (2023). Limited potential of irrigation to prevent potato yield losses in Germany under climate change. In. *Agricultural Systems* 207, S. 103633. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103633>

Kreins, P., Henseler, M., Anter, J., Herrmann, F., & Wendland, F. (2015). Quantification of climate change impact on regional agricultural irrigation and groundwater demand. *Water Resources Management*, 29, 3585-3600. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1017-8>

Maier, N., Dietrich, J. (2016). Using SWAT for strategic planning of basin scale irrigation control policies. a case study from a humid region in Northern Germany. *Water Resources Management*, 30, 3285-3298. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1348-0>

McNamara, I., Flörke, M., Uschan, T., Baez-Villanueva, O. M., Herrmann, F. (2024). Estimates of irrigation requirements throughout Germany under varying climatic conditions. In. *Agricultural Water Management* 291, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108641>

NMUEBK (Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz) (2022). Wasserversorgungskonzept Niedersachsen. <https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/wasser/wasserversorgungskonzept-niedersachsen-210626.html> [Letzter Abruf am 15.09.2025]

Potts, F., Bernhardt, J.J., Zinnbauer, M. (2025). Ermittlung des Bewässerungsbedarfs und dessen Sicherstellung für die Landwirtschaft (einschließlich Garten- und Weinbau) in Hessen (BEW-HE). Endbericht. [https://literatur.thuenen.de/digbib\\_extern/dn070262.pdf](https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn070262.pdf) [Letzter Abruf am 15.09.2025]

Riediger, J., Breckling, B., Nuske, R., & Schröder, W. (2014). Will climate change increase irrigation requirements in agriculture of Central Europe? A simulation study for Northern Germany. *Environmental Sciences Europe*, 26. <https://doi.org/10.1186/s12302-014-0018-1>

Riediger, J., Breckling, B., Svoboda, N., & Schröder, W. (2016). Modeling regional variability of irrigation requirements due to climate change in Northern Germany. *The Science of the Total Environment*, 541, 329-340. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.043>

Schaldach, R., Koch, J., aus der Beek, T., Kynast, E., Flörke, M. (2012). Current and future irrigation water requirements in pan-Europe. An integrated analysis of socio-economic and climate scenarios. In. *Global and Planetary Change* 94-95, S. 33-45. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.06.004>.

Schulz, E., Scharun, C. (2023). Bestimmungsfaktoren für landwirtschaftliche Bewässerungsbedarfe und regionale Governance-Ansätze zur Konfliktreduktion in Niedersachsen und Sachsen-Anhalt. In. *Grundwasser (Berlin)* 28 (2), S. 189-205. <https://doi.org/10.1007/s00767-023-00543-8>.

Sehn, V., Blesl, M. (2020). Implications of national climate targets on the energy-water nexus in Germany. A case study. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 9, 0-0. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d8.0344>

Zaun, F., aus der Beek, T., Sturm, S., Vollmer, T., Müller, B. M., Streck, T., Weber, T. (2024). WatDEMAND: Multi-sektorale Wasserbedarfsszenarien für Deutschland und Abschätzung zukünftiger Regionen mit steigender Wasserknappheit Abschlussbericht April 2024. DVGW-Förderkennzeichen W 202124 und W 202307

## Energie

Agrawal, N., Ahiduzzaman, Md, Kumar, A. (2018). The development of an integrated model for the assessment of water and GHG footprints for the power generation sector. In. *Applied Energy* 216, S. 558-575. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.116>.

Bormann, H., Vodegel, S. (2019). Keine Energie ohne Wasser. Zukunftsszenarien und Empfehlungen für die Weiterentwicklung der Wasserwirtschaft unter gravierend veränderten energiewirtschaftlichen

Rahmenbedingungen. Abschlussbericht. Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU-AZ 32804 / 01-23). [https://opac.dbu.de/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-32804\\_01-Hauptbericht.pdf](https://opac.dbu.de/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-32804_01-Hauptbericht.pdf) [Letzter Abruf am 10.08.2025]

BMWK (2023). Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie. Berlin, Juli 2023. [https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/fortschreibung-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=11](https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/fortschreibung-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=11) [Letzter Abruf am 10.08.2025]

BMWE (2025). Klimaneutral werden -wettbewerbsfähig bleiben. [https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Downloads/J-L/klimaneutral-werden-wettbewerbsfaehig-bleiben.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=26](https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Downloads/J-L/klimaneutral-werden-wettbewerbsfaehig-bleiben.pdf?__blob=publicationFile&v=26), [Letzter Abruf am 27.02.2026]

Davies, E.G.R., Kyle, P., Edmonds, J.A. (2013). An integrated assessment of global and regional water demands for electricity generation to 2095. In: *Advances in Water Resources* 52, S. 296–313. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.11.020>.

Destatis (2023) Statistischer Bericht – Umweltökonomische Gesamtrechnung – Wassergesamtrechnung – Berichtszeitraum 2001-2019, [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/rohstoffe-materialfluesse-wasser/\\_inhalt.html#\\_xgpv5m5qyc](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/rohstoffe-materialfluesse-wasser/_inhalt.html#_xgpv5m5qyc) [Letzter Abruf am 10.08.2025]

DVGW (2024). Szenarien der zukünftigen Wassergewinnung aus den natürlichen Süßwasserressourcen für Deutschland. Überblick aus aktuellen DVGW- Studien und statistischen Daten. <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/szenarien-wassergewinnung-dvgw.pdf> [Letzter Abruf am 06.01.2025]

Flörke, M., Kynast, E., Bärlund, I., Eisner, S., Wimmer, F., Alcamo, J. (2013). Domestic and industrial water uses of the past 60 years as a mirror of socio-economic development. A global simulation study. In: *Global Environmental Change* 23 (1), S. 144–156. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.10.018>.

Fraunhofer Umsicht (2024). WHy. Wasser für die grüne Wasserstoffwirtschaft. Internetseite. <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/projekte/why.html> [Letzter Abruf am 08.01.2024].

Jin, Y., Behrens, P., Tukker, A., Scherer, L. (2019). Water use of electricity technologies. A global meta-analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109391. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109391>

Kemmler, A., Kirchner, A., Auf der Maur, A., Ess, F., Kreidelmeyer, S., Piégsa, A., Spillmann, T., Straßburg, S., Wunsch, M., Ziegenhagen, I., Schломann, B., Plötz, P., Lutz, C., Becker, L., Fritsche, U. (2021). *Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050 - Gesamtdokumentation der Szenarien*. [https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/energiewirtschaftliche-projektionen-und-folgeabschaetzungen-2030-2050.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/energiewirtschaftliche-projektionen-und-folgeabschaetzungen-2030-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=1) [Letzter Abruf am 25.03.2025]

Koch, H., Vögele, S., Kaltoven, M., Grünwald, U. (2012). Trends in water demand and water availability for power plants—scenario analyses for the German capital Berlin. In: *Climatic Change* 110 (3-4), S. 879–899. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0110-0>.

Medarac, H., Magagna, D., Hidalgo, I. (2018). Projected fresh water use from the European energy sector. Disaggregated freshwater withdrawal and consumption in the EU up to 2050. Luxembourg. Publications Office of the European Union (JRC technical reports). <https://doi.org/10.2760/30414>.

Saravia, F., Gehrman, S., Schwarz, S., Koch, M. (2024). Gesamtwasserbedarf für die Wasserelektrolyse. Wie groß ist der Wasserfußabdruck einschließlich der Kühlsysteme?, <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/wasserelektrolyse-gesamtwasserbedarf-factsheet-dvgw.pdf> [Letzter Abruf am 25.03.2025]

Terrapon-Pfaff, J., Ortiz, W., Viebahn, P., Kynast, E., Flörke, M. (2020). Water Demand Scenarios for Electricity Generation at the Global and Regional Levels. In. *Water* 12 (9), S. 2482. <https://doi.org/10.3390/w12092482>.

Wada, Y., Flörke, M., Hanasaki, N., Eisner, S., Fischer, G., Tramberend, S. et al. (2016). Modeling global water use for the 21st century. the Water Futures and Solutions (WFaS) initiative and its approaches. In. *Geosci. Model Dev.* 9 (1), S. 175–222. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-175-2016>.

Wasserstoff-Kompass (2024). Elektrolysekapazität. <https://www.wasserstoff-kompass.de/> [Letzter Abruf am 08.01.2024].

## Wirtschaft

Bijl, D.L., Bogaart, P. W., Kram, T. Vries, B.J.M. de, van Vuuren, D.P. (2016). Long-term water demand for electricity, industry and households. In. *Environmental Science & Policy* 55, S. 75–86. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.09.005>.

Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (Hg.) (2025). Stand und Entwicklung des Rechenzentrumsstandorts Deutschland. Gutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz. [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Technologie/stand-und-entwicklung-des-rechenzentrumsstandorts-deutschland.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=10](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Technologie/stand-und-entwicklung-des-rechenzentrumsstandorts-deutschland.pdf?__blob=publicationFile&v=10) [Letzter Abruf am 10.02.2025].

Destatis (2023a). Statistischer Bericht – Umweltökonomische Gesamtrechnung – Wassergesamtrechnung – Berichtszeitraum 2001-2019, [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/rohstoffe-materialfluesse-wasser/\\_inhalt.html#\\_xgpmv5qyc](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/rohstoffe-materialfluesse-wasser/_inhalt.html#_xgpmv5qyc) [Letzter Abruf am 26.09.2024]

Büringer, H. (1995). Prognose des Wasserbedarfs der baden-württembergischen Industrie bis zum Jahr 2005. Hg. v. Statistisches Landesamt Baden-Württemberg. <https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/8597/1/525buehr.pdf> [Letzter Abruf am 26.09.2024].

DVGW (2024). Szenarien der zukünftigen Wassergewinnung aus den natürlichen Süßwasserressourcen für Deutschland. Überblick aus aktuellen DVGW- Studien und statistischen Daten. <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/szenarien-wassergewinnung-dvgw.pdf> [Letzter Abruf am 06.01.2025]

Flörke, M., Kynast, E., Bärlund, I., Eisner, S., Wimmer, F., Alcamo, J. (2013). Domestic and industrial water uses of the past 60 years as a mirror of socio-economic development. A global simulation study. In. *Global Environmental Change* 23 (1), S. 144–156. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.10.018>.

Hillenbrand, T., Sartorius, C., Walz, R. (2008). Technische Trends der industriellen Wassernutzung. Arbeitspapier. Hg. v. Fraunhofer ISI. Karlsruhe. <https://publica.fraunhofer.de/bitstreams/c43ebd8d-81a9-4962-9d84-23093eafc47c/download> [Letzter Abruf am 26.09.2024].

Liehr, S., Schulz, O., Kluge, T., Sunderer, G., Wackerbauer, J. (2016). Aktualisierung der integrierten Wasserbedarfsprognose für Hamburg bis zum Jahr 2045. [https://www.researchgate.net/profile/johann-wackerbauer/publication/298706966\\_update\\_of\\_the\\_integrated\\_water\\_demand\\_forecast\\_for\\_the\\_city\\_of\\_hamburg\\_until\\_2045-part\\_1\\_foundation\\_and\\_methodology/links/56f3c0008ae81582becf90b/update-of-the-integrated-water-demand-forecast-for-the-city-of-hamburg-until-2045-part-1-foundation-and-methodology.pdf](https://www.researchgate.net/profile/johann-wackerbauer/publication/298706966_update_of_the_integrated_water_demand_forecast_for_the_city_of_hamburg_until_2045-part_1_foundation_and_methodology/links/56f3c0008ae81582becf90b/update-of-the-integrated-water-demand-forecast-for-the-city-of-hamburg-until-2045-part-1-foundation-and-methodology.pdf) [Letzter Abruf am 20.08.2024].

Meißner, S. (2021). The Impact of Metal Mining on Global Water Stress and Regional Carrying Capacities—A GIS-Based Water Impact Assessment. In. *Resources* 10.12, S. 120. <https://doi.org/10.3390/resources10120120>.

Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz (NMUEBK) (Hg.) (2022). Hintergrunddokument zum Wasserversorgungskonzept Niedersachsen.

[https://www.umwelt.niedersachsen.de/download/183415/Hintergrunddokument\\_zum\\_Wasserversorgungskonzept\\_Niedersachsen.pdf](https://www.umwelt.niedersachsen.de/download/183415/Hintergrunddokument_zum_Wasserversorgungskonzept_Niedersachsen.pdf) [Letzter Abruf am 19.12.2024].

PfK Ansbach GmbH (2019). Wasserbedarfsberechnung. Sanierung der Wasserversorgung. Hg. v. Zweckverband WV Unteres Inntal. <https://www.landkreis-passau.de/media/9675/a4-anlage-6-wasserbedarfsberechnung.pdf> [Letzter Abruf am 19.08.2024].

Uhlmann, W., Zimmermann, K., Kaltofen, M., Gerstgraser, C., Grosser, F., Schützel, C. (2023). Wasserwirtschaftliche Folgen des Braunkohleausstiegs in der Lausitz. Abschlussbericht. Hg. v. Umweltbundesamt. <https://doi.org/10.60810/openumwelt-6403>

Verband der chemischen Industrie e.V. (VCI) (2017). Beiträge der Chemie zur Wasserversorgung der Zukunft aus Sicht der Forschungs- und Technologiepolitik. Hintergrundpapier. <https://www.vci.de/langfassungen/langfassungen-pdf/2017-12-15-vci-position-beitraege-der-chemie-zur-wasserversorgung-der-zukunft.pdf> [Letzter Abruf am 30.09.2024].

Wada, Y., Flörke, M., Hanasaki, N., Eisner, S., Fischer, G., Tramberend, S. et al. (2016). Modeling global water use for the 21st century. the Water Futures and Solutions (WFaS) initiative and its approaches. In. *Geosci. Model Dev.* 9 (1), S. 175–222. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-175-2016>.

## **Tourismus**

Becken, S. (2014). Water equity – Contrasting tourism water use with that of the local community. In. *Water Resources and Industry*, 7–8, S. 9–22. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2014.09.002>

European Environment Agency (EEA) (2021). Water resources across Europe – confronting water stress. an updated assessment, Copenhagen.

Gössling, S., Peeters, P. (2015). Assessing tourism’s global environmental impact 1900–2050. *Journal of Sustainable Tourism*, 23(5), 639–659. <https://doi.org/10.1080/09669582.2015.1008500>

Gössling, S., Hall, C., Scott, D. (2015a). Measuring Water Use in Tourism. In. *Tourism and Water*. Bristol, Blue Ridge Summit. Channel View Publications. <https://doi.org/10.21832/9781845415006>

Gössling, S., Hall, C., Scott, D. (2015b). The Future. Water Security and Tourism Development. In. *Tourism and Water*. Bristol, Blue Ridge Summit. Channel View Publications. <https://doi.org/10.21832/9781845415006>

Gössling, S., Peeters, P., Hall, C., Ceron, J., Dubois, G., Lehmann, L., Scott, D. (2012). Tourism and water use. Supply, demand, and security. An international review. *Tourism Management*, 33(1), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2011.03.015>

Klug, H., Cadus, S., Hermann, M. (2012). Analyse des Wasserverbrauchs im Alpenraum am Beispiel der lokalen Bevölkerung und des Tourismus. Beitrag zur Konferenz. *Angewandte Geoinformatik 2012*, 502-511.

Reintinger, C., Berghammer, A., Schmude, J. (2016). Simulating changes in tourism demand. a case study of two German regions. *Tourism Geographies*, 18.3, 233-257, <https://doi.org/10.1080/14616688.2016.1169312>

Sax, M., Schmude, J., Dingeldey, A. (2016). Water Demand in Tourism Facilities. In. W. Mauser & M. Prasch, *Regional assessment of global change impacts*. Springer eBooks, 153-158. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16751-0>

Schmude, J., Sax, M. (2004). Wasser als touristische Ressource. Ein Ansatz zur Modellierung des touristischen Wasserverbrauchs. *Tourismus Journal* 8/2004, 557-573.

Soboll, A., Dingeldey, A. (2011). The future impact of climate change on Alpine winter tourism. a high-resolution simulation system in the German and Austrian Alps. *Journal of Sustainable Tourism*, 20(1), 101–120. <https://doi.org/10.1080/09669582.2011.610895>

## Ökosysteme/ökologischer Mindestabfluss

Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (Hg.) (2019). Herleitung von ökologisch begründeten Orientierungswerten die Mindestwasserführung von Fließgewässern. Projekt O 8.17 des Länderfinanzierungsprogramms „Wasser, Boden und Abfall“.  
[http://www.laenderfinanzierungsprogramm.de/static/LFP/Dateien/LAWA/AO/O%208.17\\_Mindestwasser\\_Endbericht.pdf](http://www.laenderfinanzierungsprogramm.de/static/LFP/Dateien/LAWA/AO/O%208.17_Mindestwasser_Endbericht.pdf) [Letzter Abruf am 26.08.2024].

DVGW (2024) Szenarien der zukünftigen Wassergewinnung aus den natürlichen Süßwasserressourcen für Deutschland. Überblick aus aktuellen DVGW- Studien und statistischen Daten.  
<https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/szenarien-wassergewinnung-dvgw.pdf> [Letzter Abruf am 07.01.2025]

Johannes, F., Petry, U., Wriedt, G., Tönnies-Lohmann, A. (2023). Globaler Klimawandel. Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für die Grundwasserstände in Niedersachsen. KliBiW Phase 7 – Abschlussbericht. Hg. v. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (LWKN) (Band 60).  
[https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/201939/Grundwasser\\_Band\\_60\\_2023\\_-\\_Gesamtbericht\\_des\\_Projektes\\_KliBiW\\_Themenbereich\\_Grundwasser\\_Globaler\\_Klimawandel\\_Wasserwirtschaftliche\\_Folgenabschaetzung\\_fuer\\_das\\_Binnenland\\_Download\\_PDF\\_24\\_57\\_MB\\_.pdf](https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/201939/Grundwasser_Band_60_2023_-_Gesamtbericht_des_Projektes_KliBiW_Themenbereich_Grundwasser_Globaler_Klimawandel_Wasserwirtschaftliche_Folgenabschaetzung_fuer_das_Binnenland_Download_PDF_24_57_MB_.pdf) [Letzter Abruf am 07.01.2025].

Land Brandenburg (Hg.) (2021). Landesniedrigwasserkonzept Brandenburg.  
<https://mluk.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/Landesniedrigwasserkonzept-Brandenburg.pdf> [Letzter Abruf am 26.09.2024].

Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) (2019). Mindestwasserführung - Handlungsanleitung zur Festlegung und Überwachung des Mindestabflusses. [https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/10039-Handlungsanleitung\\_zur\\_Festlegung\\_und\\_%C3%9Cberwachung\\_des\\_Mindestabflusses.pdf](https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/10039-Handlungsanleitung_zur_Festlegung_und_%C3%9Cberwachung_des_Mindestabflusses.pdf) [Letzter Abruf am 26.08.2024].

Pastor, A. V., Ludwig, F., Biemans, H., Hoff, H., Kabat, P. (2014). Accounting for environmental flow requirements in global water assessments. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18 (12), S. 5041–5059.  
<https://doi.org/10.5194/hess-18-5041-2014>.

Riedel, T., Nolte, C., aus derBeek, T., 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. Hg. v. Umweltbundesamt. <https://doi.org/10.60810/openumwelt-6165>.

Ruhrverband (2023). Wegen Trockenheit. NRW-Umweltministerium genehmigt Absenkung der gesetzlichen Mindestwasserführung in der Ruhr. Pressemitteilung.  
<https://ruhrverband.de/presse/pressemitteilungen/detailansicht/news///wegen-trockenheit-nrw-umweltministerium-genehmigt-absenkung-der-gesetzlichen-mindestwasserfuehrung-i/> [Letzter Abruf am 26.09.2024]

Sarzaeim, P., Bozorg-Haddad, O. Fallah-Mehdipour, E., Loáiciga, Hugo A. (2017). Environmental water demand assessment under climate change conditions. In: *Environmental Monitoring and Assessment* 189 (7), S. 359.  
<https://doi.org/10.1007/s10661-017-6067-3>.

Smakhtin, V., Revenga, C., Döll, P. (2004). A Pilot Global Assessment of Environmental Water Requirements and Scarcity. In: *Water International* 29 (3), S. 307–317. <https://doi.org/10.1080/02508060408691785>.

Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz (TMUEN) (Hg.) (2022). Thüringer Niedrigwasserstrategie. Ergänzungsband zum Landesprogramm Gewässerschutz.

[https://umwelt.thueringen.de/fileadmin/001\\_TMUEN/Aktuelles/Topthemen/Trockenheit\\_und\\_Niedrigwasser/Thueringer\\_Niedrigwasserstrategie.pdf](https://umwelt.thueringen.de/fileadmin/001_TMUEN/Aktuelles/Topthemen/Trockenheit_und_Niedrigwasser/Thueringer_Niedrigwasserstrategie.pdf) [Letzter Abruf am 08.01.2025].

Waterloo, M. J., Gevaert, A., Kersbergen, A., Hegnauer, M., Becker, B., Roover, S. A. W. de (2019). Wetland restoration impact on streamflow in the Rhine River Basin. Hg. v. Wetlands International.

<https://europe.wetlands.org/download/1468/?tmstv=1739270592> [Letzter Abruf am 11.02.2025].

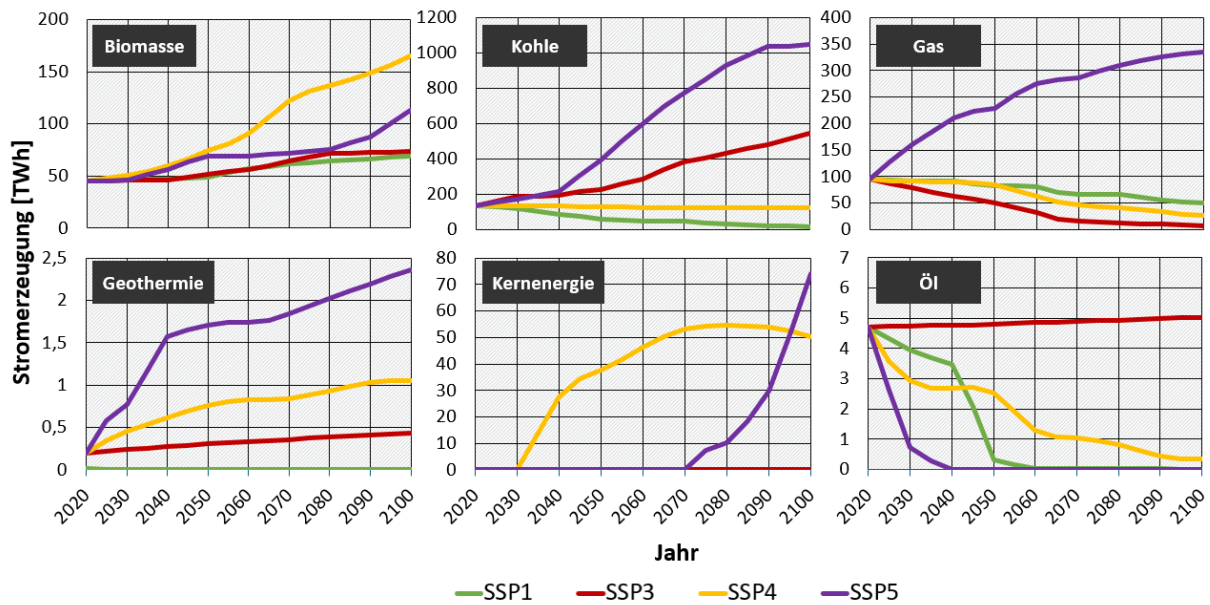
Wenzel, Jan Lukas, Schmidt, Gerd, Usman, Muhammad, Conrad, Christopher, Volk, Martin (2021). Long-term baseflow estimation and environmental flow assessment in a mining-impacted catchment in Central Germany. In: Hercynia 54 (2).

## **A Anlage A: Literaturrecherche**

Siehe Excel Tabelle

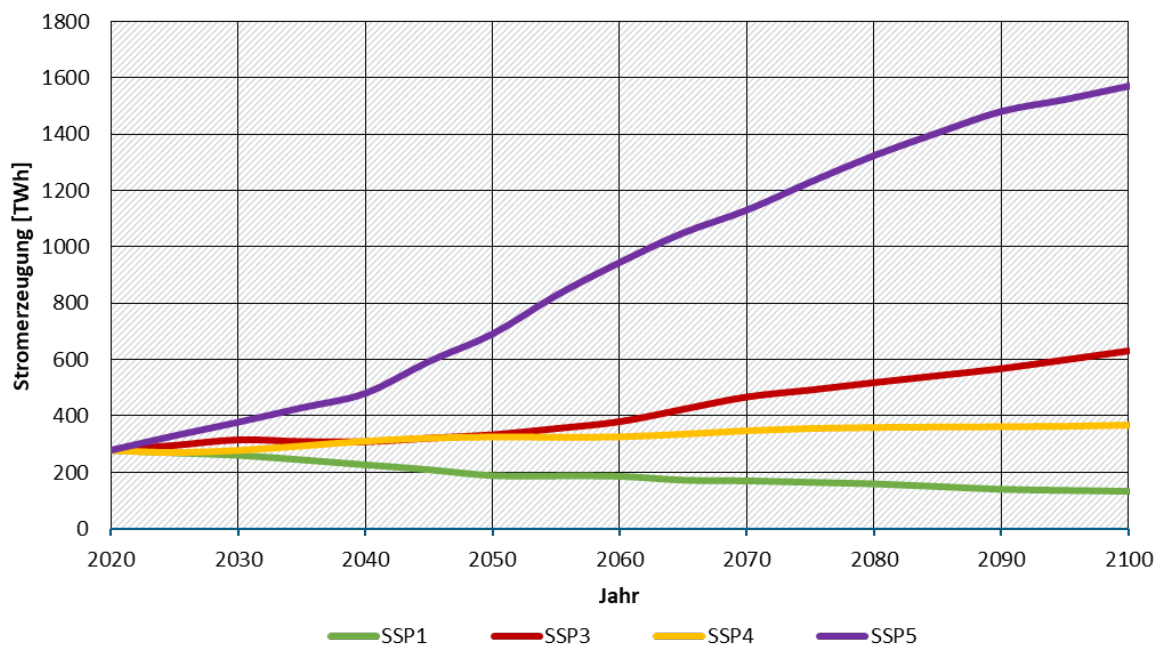
## B Anlage B: Darstellung projizierter Entwicklungen in den im Rahmen des Vorhabens entwickelten SSP-Szenarien

**Abbildung 43: Projektion der thermischen Stromproduktion aus verschiedenen Energieträgern in den SSP-Szenarien bis 2100 (eigene Darstellung, Daten aus Riahi, 2017)**



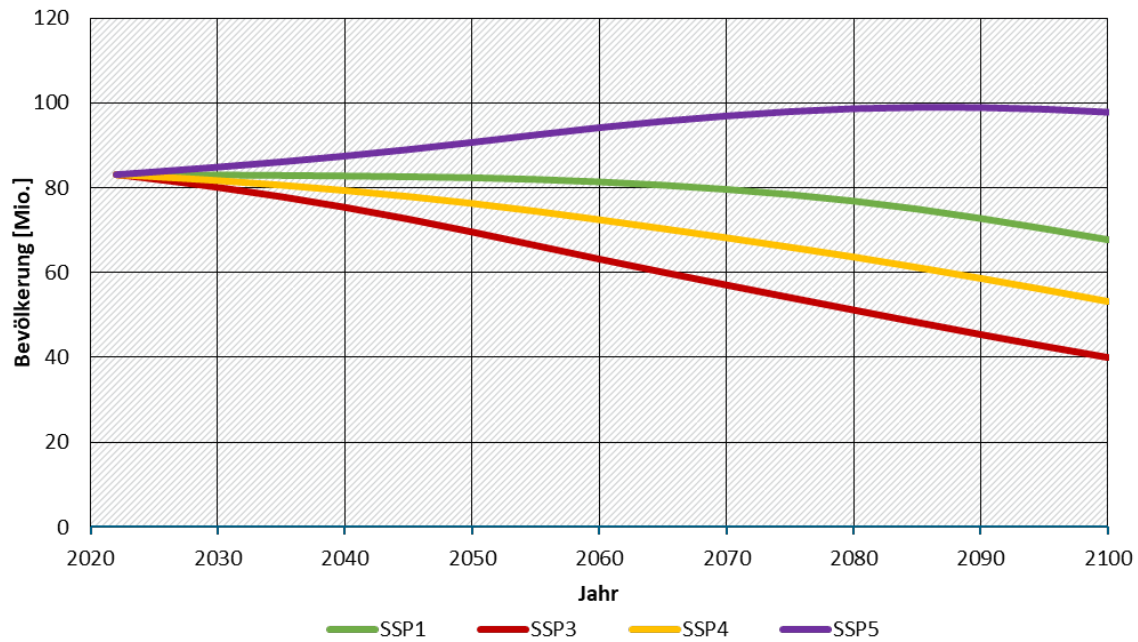
Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

**Abbildung 44: Projektion der gesamten thermischen Stromproduktion in den SSP-Szenarien bis 2100 (eigene Darstellung, Daten aus Riahi, 2017)**



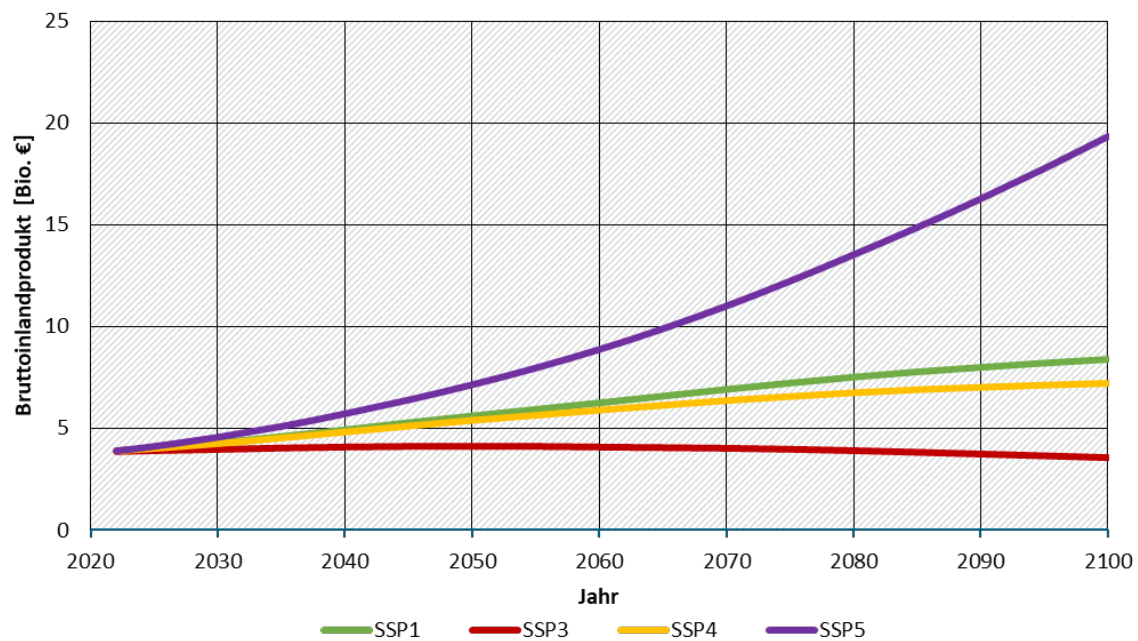
Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

**Abbildung 45: Projektion der Bevölkerungsentwicklung in Deutschland bis 2100 (eigene Darstellung, Daten aus Jones und O'Neill, 2016; Gao, 2017, 2020)**



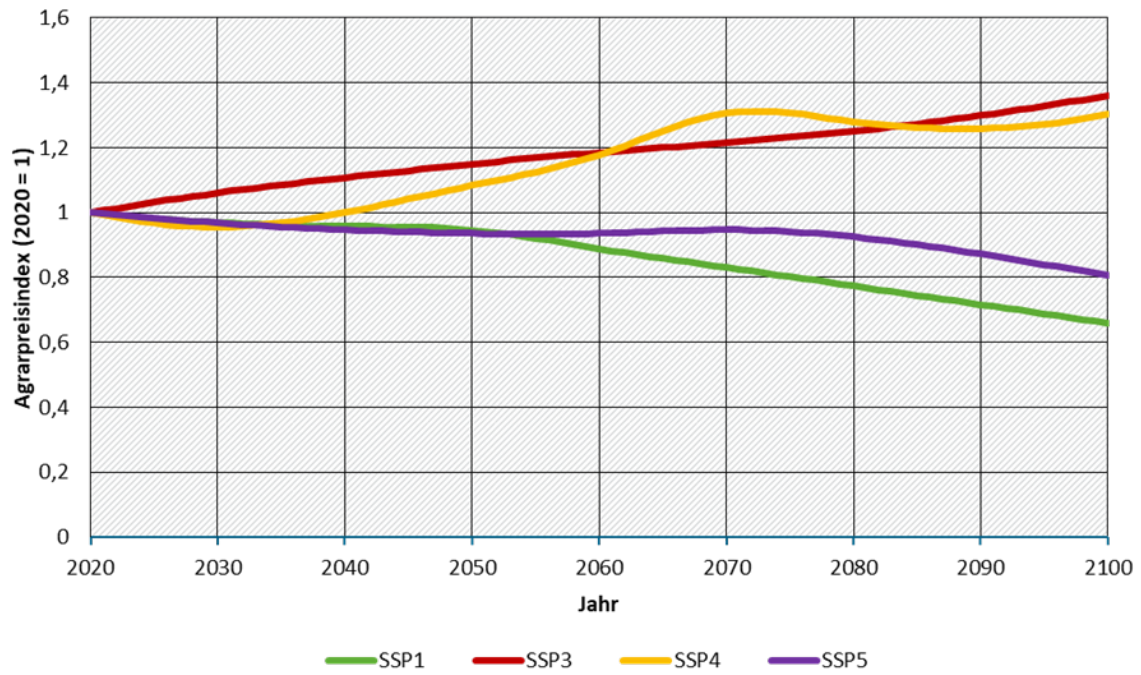
Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

**Abbildung 46: Projektion des Bruttoinlandproduktes in Deutschland bis 2100 (eigene Darstellung, Daten aus Wang & Sun, 2022, 2023)**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

**Abbildung 47: Projektion des Agrarpreisindex in Deutschland bis 2100 (eigene Darstellung, Daten aus Popp et al, 2017 für OECD-Länder)**



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsnehmendenteam

## C Anlage C: Bei den Workshops vertretene Organisationen

Organisation	Anwesend 1. Workshop	Anwesend 2. Workshop
AÖW	x	x
BDEW	x	x
Berliner Wasserbetriebe	x	
BGR	x	x
BMUV	x	
Bundesamt für Naturschutz	x	x
Bundesanstalt für Gewässerkunde	x	x
dena/Leitstelle Wasserstoff	x	
DVGW	x	
DWA	x	
Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI	x	
Fresh Thoughts	x	x
GELSENWASSER AG	x	
Helmholtz Zentrum für Umweltforschung - UFZ	x	x
IHK Berlin	x	
LWG Lausitzer Wasser GmbH & Co. KG	x	
Netplus	x	x
OOWV	x	x
Ruhr-Universität Bochum	x	x
Thünen-Institut	x	

<b>Organisation</b>	<b>Anwesend 1. Workshop</b>	<b>Anwesend 2. Workshop</b>
Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie, Naturschutz und Forsten	x	
Trinkwasserversorgung Magdeburg GmbH	x	
Umweltbundesamt	x	x
Universität Oldenburg	x	
VCI	x	
Verband Deutscher Mineralbrunnen	x	x
VKU	x	
Wasserverbandstag e.V.	x	x