

Infrastruktursystem Wasser

Ergebnisse aus dem Resilienz-Radar



Downloadversion
foresight.tab-beim-bundestag.de

September 2025
Foresight-Report

Foresight-Report zum Infrastruktursystem Wasser, September 2025, Downloadversion

Die TAB Foresight-Reports fassen die Ergebnisse des Resilienz-Radars zusammen und erscheinen seit 2024 jährlich auf der Microsite <https://foresight.tab-beim-bundestag.de>.

Das [Resilienz-Radar](#) dient der Identifikation und Bewertung von Entwicklungen, die mit systemischen Risiken für kritische Infrastrukturen verbunden sind. Neben der Analyse zentraler Trends liegt der Fokus auf der Einschätzung von systemischen Risiken mit potenziell weitreichenden Auswirkungen, um die Gefährdungslage einzelner Infrastruktursysteme fundiert zu bewerten. Zudem werden jeweils infrastrukturspezifische Fokusthemen vorgeschlagen, die von besonderer Relevanz für eine vertiefende Untersuchung sind. Die Ergebnisse werden jährlich in den Foresight-Reports zusammengefasst.



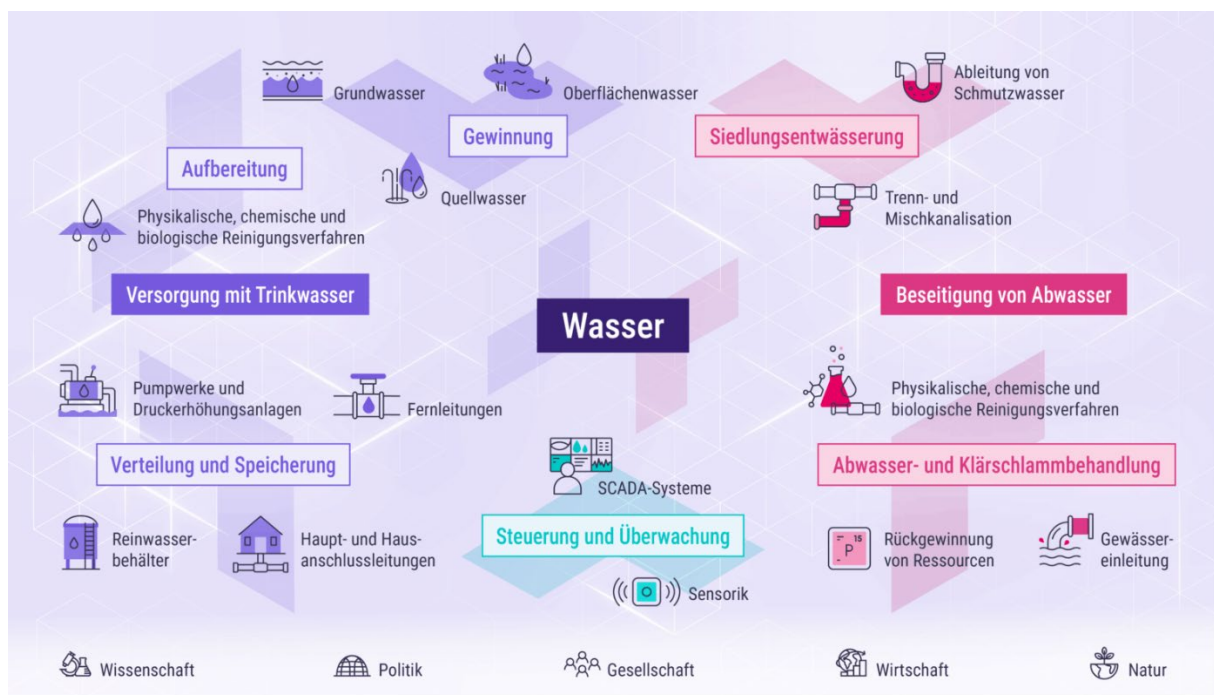
Das TAB analysiert im Auftrag des Deutschen Bundestages umfassend und vorausschauend die Potenziale wissenschaftlich-technischer Entwicklungen und ihre Auswirkungen auf die Gesellschaft.

Inhalt

Infrastruktursystem Wasser	2
Überblick über aktuelle Trends.....	7
Wassernutzungskonkurrenz und Klimawandelanpassung	9
Belastung der Qualität von Trinkwasserressourcen	15
Digitalisierung und Vernetzung der technischen Infrastrukturen...	22
Systemische Risiken und ihre Auswirkungen auf das Infrastruktursystem Wasser	28
Status quo der Gefährdungslagen.....	28
Entwicklungsdynamiken ausgewählter systemischer Risiken und Gefährdungslagen.....	35
Gefährdungslagen im Zuge der Transformation.....	44
Fokusthemen	51
Fokusthema 1: Wasserspeicherung: intelligente Wasserspeicher, Schwammstädte, Gewässerstärkung und Grundwasseranreicherung.....	51
Fokusthema 2: Monitoring und Erhalt der Wasserqualität von Trinkwasserressourcen	52
Fokusthema 3: Cybersicherheit im Kontext digitaler Transformation	53
Methodik und Vorgehen	54

Infrastruktursystem Wasser

Wasser ist die Grundlage allen Lebens und dient dem Menschen nicht nur als Trinkwasser, sondern wird auch als Betriebsmittel für die Industrie und zur Energiegewinnung benötigt. Die Aufgaben von Trinkwasserversorgung und Abwasserentsorgung liegen neben der verlässlichen Versorgung mit Trinkwasser bzw. der Entsorgung von Abwasser insbesondere auch in der Erhaltung der Gewässer- und Trinkwasserqualität sowie dem Schutz der Gewässer vor negativen menschlichen Einflüssen [1].



Systembild des Infrastruktursystems Wasser

Die Stärkung der Resilienz im Infrastruktursystem Wasser ist vor dem Hintergrund klimatischer Veränderungen, demografischer Entwicklungen, alternder Infrastrukturen und zunehmender Schadstoffbelastung von wachsender Bedeutung. Zu den zentralen Herausforderungen zählen erstens die **Erneuerung und Ertüchtigung wasserwirtschaftlicher Infrastrukturen** im Sinne einer umfassenden Modernisierung. Neben der kontinuierlichen Instandhaltung des Leitungsnetzes und der Anlagen müssen die wasserwirtschaftlichen Infrastrukturen im Zuge der Klimaanpassung und Digitalisierung substanziell verändert werden, um zukünftigen Belastungen standzuhalten. Zweitens macht die zunehmende **Gefährdung durch Extremwetterereignisse und Wasserknappheit** eine konsequente

Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen erforderlich. Dazu zählen die Reduktion von Wasserverbräuchen, die Sicherung der Wasserqualität, der Ausbau von Rückhaltekapazitäten und ein vorausschauendes Ressourcenmanagement. Drittens bedarf es eines **integrierten und sektorübergreifenden Wassermanagements**, das auf systemische Kooperation zwischen Wasserwirtschaft, Stadt- und Raumplanung, Landwirtschaft, Industrie und weiteren Akteuren setzt – wie es das Integrationsprinzip der Nationalen Wasserstrategie vorsieht [2]. Politische Strategien wie die Nationale Wasserstrategie 2023 [3], die geplante EU-Wasserresilienzstrategie [4] und innovationsorientierte Programme (z. b. **Innovationsatlas Wasser**) liefern wichtige Impulse für die Transformation hin zu einem widerstandsfähigen, nachhaltigen Wassersystem.

Wasserversorgung und Abwasserentsorgung sind in Deutschland zentrale Aufgaben der öffentlichen Daseinsvorsorge. In der Regel sind sie als Pflichtaufgaben der Kommunen definiert. Die Gemeinden entscheiden, wie die Aufgaben organisiert werden. Die Akteurslandschaft des Infrastruktursystems ist entsprechend vielfältig mit sowohl öffentlich- als auch privatrechtlichen Organisationsformen. 5.999 Unternehmen sicherten 2022 die Trinkwasserversorgung, und 6.461 Kanalnetzbetreiber und 8.891 Kläranlagen sorgten für die Ableitung und Behandlung von Abwasser [5]. Die Aufgaben lassen sich entlang der Wertschöpfungsstufen beschreiben:

Trinkwasserversorgung

Gewinnung

Die Gewinnung von Trinkwasser umfasst die wasserwirtschaftlichen Prozesse der Förderung und Anreicherung von Rohwasser. In Abhängigkeit vom Wasserdargebot sowie von den geologischen, hydrologischen und klimatischen Verhältnissen wird Rohwasser aus Grundwasser, Quellwasser, Oberflächenwasser oder Uferfiltrat gewonnen. Das gewonnene Rohwasser soll gesetzlich definierte physikalische, chemische und mikrobiologische Eigenschaften aufweisen und möglichst naturnah sein.

Aufbereitung

Die Trinkwasseraufbereitung umfasst je nach Wasserqualität physikalische, biologische und chemische Verfahren. Je nach mikrobiologischer und chemischer Belastung kommen unterschiedliche Verfahren zum Einsatz.

Verteilung und Speicherung

Einmal aufbereitet – und ggf. gespeichert – wird das Trinkwasser mithilfe eines Transport- (Zubringer- und Fernleitungen) und eines Versorgungssystems (Haupt-, Versorgungs- und Hausanschlussleitungen) an die Endverbraucher verteilt. Pumpwerke und Druckerhöhungsanlagen gewährleisten den erforderlichen Wasserdruck. Eine zentrale Aufgabe der Wasserversorgung ist es, die Verbraucher/innen jederzeit mit den von ihnen benötigten Wassermengen zu versorgen. Dabei spielen Wasserspeicherungsanlagen eine große Rolle, die insbesondere dazu dienen, Verbrauchsschwankungen auszugleichen und die Versorgung bei Betriebsstörungen sicherzustellen.

Abwasserbeseitigung

Siedlungsentwässerung

Die Aufgabe der Abwassersammlung und -ableitung umfasst die Fortleitung des nach Gebrauch entstandenen Schmutzwassers. Dies erfolgt entweder mithilfe einer Mischkanalisation, über die Schmutzwasser gemeinsam mit Niederschlagswasser abgeleitet wird, oder durch eine Trennkanalisation mit separaten Kanälen für Schmutz- und Niederschlagswasser. Kanalnetzbetreiber müssen die Kapazitätsgrenzen fachgerecht steuern, für die regelmäßige Spülung der Rohre zur Vorbeugung von Korrosion sorgen und das Rohrnetz auch sonst instandhalten.

Abwasserbehandlung und Gewässereinleitung

Nach Einsammlung wird das Schmutzwasser in einer Kläranlage mit speziellen Reinigungsverfahren behandelt. Für die Abwasserbehandlung werden mechanisch-physikalische, biologische und chemische Prozesse genutzt. Zusätzliche Reinigungsstufen können eingebaut werden, um Mikroverunreinigungen anthropogener Herkunft zu eliminieren, die sich selbst in sehr geringen Konzentrationen toxisch auf Wasserlebewesen auswirken können. Der aus dem Behandlungsprozess entstandene Klärschlamm wird ebenfalls behandelt und ggf. zur Energiegewinnung verwendet.

Kernergebnisse

Drei Trendcluster

prägen gemäß der Trendanalyse derzeit das Infrastruktursystem: Wassernutzungskonkurrenz und Klimawandelanpassung, Belastung der Qualität von Trinkwasserressourcen, Digitalisierung und Vernetzung der technischen Infrastrukturen.

Aufkommende Technologien

sind unter anderem Technologien zum Recycling von Abwasser zur Grundwasseranreicherung oder für die industrielle Produktion, innovative Entsalzungstechnologien sowie Technologien zum Monitoring von Wasserentnahmen.

Status quo der Gefährdungslagen

Die aktuelle Gefährdung Infrastruktursystems durch systemische Risiken ist insgesamt als eher gering einzustufen. Wetterextreme und globale Erwärmung gefährden jedoch derzeit in vergleichsweise höherem Maße die Funktionsfähigkeit und Stabilität des Infrastruktursystems.

Entwicklungsdynamiken

Die Gefährdungslagen durch Wetterextreme und globale Erwärmung nehmen im Zuge des Klimawandels deutlich zu. Gleichzeitig steigen durch die fortschreitende Digitalisierung und unzureichende Sicherheitsstrukturen die Risiken durch Cyberkriminalität sowie Technikversagen und eingeschränkte Technikbeherrschbarkeit.

Gefährdungslagen im Zuge der Transformation

Die Umsetzung der zentralen Transformationsziele Ertüchtigung und Erneuerung des Infrastruktursystems, Klimaanpassung sowie Einrichtung eines integrierten und sektorübergreifenden Wassermanagements wird durch technologische und politisch-regulatorische Pfadabhängigkeiten erschwert.

Fokusthemen

Für eine Vertiefung im Rahmen des Resilienz-Checks werden drei Fokusthemen vorgeschlagen: (1) Wasserspeicherung durch intelligente Speicherlösungen, Schwammstädte, Gewässerstärkung und Grundwasseranreicherung, (2) Monitoring und Erhalt der Wasserqualität

von Trinkwasserressourcen sowie (3) Cybersicherheit im Kontext digitaler Transformation des Infrastruktursystems Wasser.

Referenzen

1. TAB (2023): Chancen und Risiken der Digitalisierung kritischer kommunaler Infrastrukturen an den Beispielen der Wasser- und Abfallwirtschaft. Endbericht zum TA-Projekt. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, Berlin, [DOI: 10.5445/IR/1000163177](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:tab-1000163177)
2. BMUV (2023): EU-Umweltrat einigt sich auf Verbesserungen bei der Behandlung kommunalen Abwassers. Pressemitteilung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, www.bmuv.de/ (13.8.2024)
3. Bundesregierung (2023): Nationale Wasserstrategie – Kabinettsbeschluss vom 15. März 2023. Berlin
4. Roswall, J. (2025): EU Water Resilience Strategy. Vortrag auf der Veranstaltung „Towards an EU Water Resilience Strategy: Innovating for a Water Efficient Future“. Brüssel
5. Destatis (2022): Öffentliche Wasserversorgung 2022: Über 5,32 Milliarden Kubikmeter Wasser gefördert. Statistisches Bundesamt, www.destatis.de/ (27.2.2025)

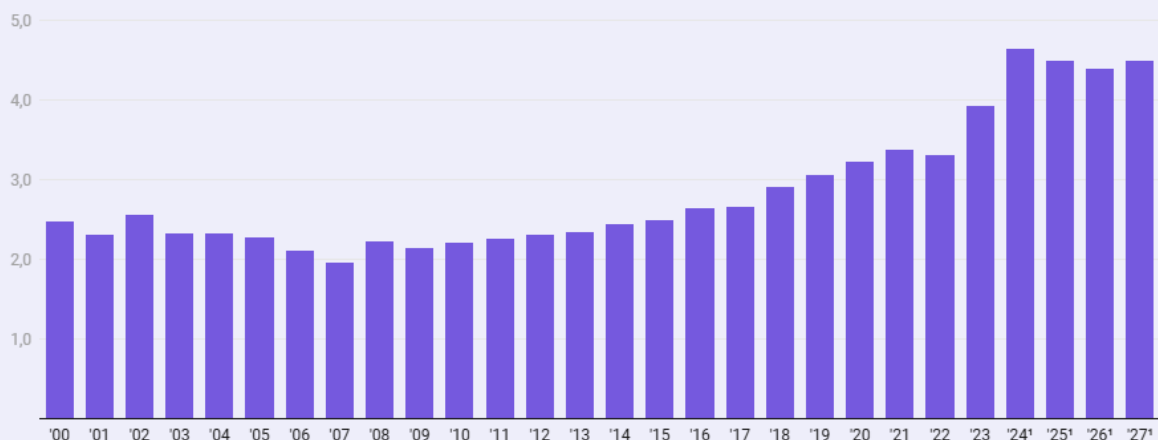
Überblick über aktuelle Trends

Die Erneuerung der Infrastrukturen stellt Wasserver- und Abwasserentsorger vor große Herausforderungen. Dies prägt das Infrastruktursystem maßgeblich. Darüber hinaus lassen sich die zentralen Trends im Wassersektor in drei Cluster zusammenfassen. Wassernutzungskonkurrenzen stellen punktuell Herausforderungen für Infrastrukturen dar. Diese werden an neue klimatische Bedingungen angepasst. Die Qualität von Trinkwasserressourcen ist durch Schadstoffe belastet. Die Digitalisierung und Vernetzung der Infrastrukturen macht Investitionen in Modernisierungsmaßnahmen erforderlich, wodurch der wachsende Druck auf die Erneuerung der Infrastrukturen weiter steigt.

In Großstädten sind die Kanalisationssysteme zur Entwässerung teils vor über 100 Jahren entstanden [\[1\]](#) und 40 % der Trinkwasserleitungen sind älter als 50 Jahre [\[2\]](#). Das bringt hohe Investitionserfordernisse mit sich, hinzu kommen sinkende Einnahmen ([Datengrafik](#)). So nehmen der tägliche Pro-Kopf-Verbrauch von Trinkwasser und damit auch die Einnahmen aus der Wasserabgabe tendenziell ab. In den letzten 30 Jahren ist der Wasserverbrauch pro Einwohner/in und Tag um 15 % gesunken [\[3\]](#). Dies ist auf den demografischen Wandel, auf Bevölkerungsrückgänge und eine steigende Anzahl an Einpersonenhaushalten, aber auch auf die vermehrte Nutzung wassereffizienter Haushaltsgeräte zurückzuführen [\[4\]](#).

Höhe der Investitionen in die öffentliche Wasserversorgung in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2023 und Plan bis 2027¹

(in Milliarden Euro)



Details: Deutschland; ¹ Vorläufig. Stand: April 2025

Quelle: BDEW. (15. April, 2025). Höhe der Investitionen in die öffentliche Wasserversorgung in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2023 und Plan bis 2027¹ (in Milliarden Euro) [Graph]. In Statista. Zugriff am 17. Juni 2025 • Grafik herunterladen • Erstellt mit Datawrapper

Eine weitere Herausforderung für den Wassersektor betrifft den **Fachkräftemangel**. Die Wasserwirtschaft ist durch ein hohes Durchschnittsalter der Mitarbeiter/innen gekennzeichnet. Neue Technologien machen spezifische Kompetenzen der Beschäftigten erforderlich und Unternehmen haben Schwierigkeiten, qualifizierte Nachwuchskräfte zu finden [5]. Die Wasserwirtschaft zählt zu den **größten Energieverbrauchern** der Kommunen [4]. Neue Anforderungen an die Abwasserbehandlung – beispielsweise die Elimination von Spurenstoffen und die Klärschlammmentsorgung – dürften den Stromverbrauch künftig noch erhöhen. Umso wichtiger ist daher die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen. Zugleich erzeugen einige Kläranlagen mit durch Faulung gewonnenem Klärgas Strom für den Eigenverbrauch. Um zu einer nachhaltigen Wasserwirtschaft [6] beizutragen, bemühen sich Wasserbetriebe, Energieeinsparung und -effizienz voranzutreiben und gleichzeitig den Anteil eigenerzeugter Energie weiter auszubauen [4].

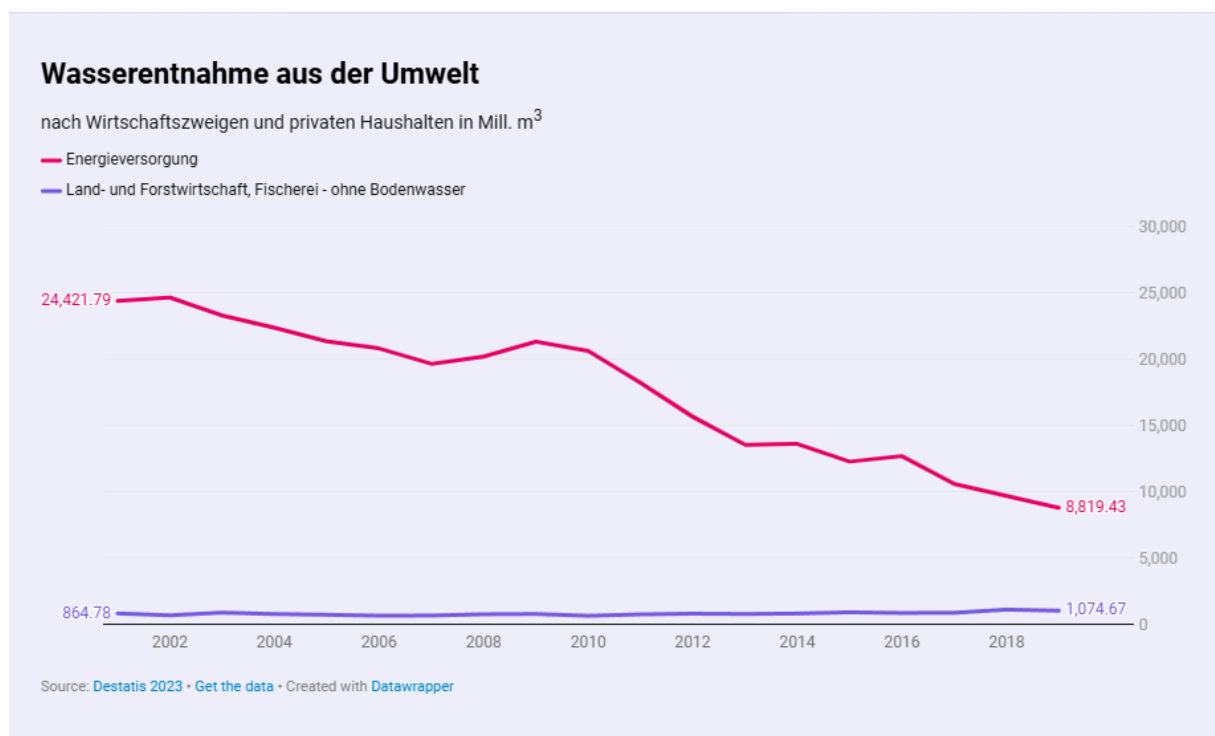
Referenzen

1. Engelhart, M. et al. (2020): Abwassertechnik. In: Wasserwesen, Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik: Technik – Organisation – Wirtschaftlichkeit. Germering, S. 225–283
2. Thaler, S. (2019): Chancen und Risiken der Digitalisierung in der Wasserwirtschaft. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Gutachten für den Deutschen Bundestag – vorgelegt dem Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag,
3. BDEW (2025): Trinkwasser – Täglicher Pro-Kopf-Verbrauch in Deutschland bis 2024. Statista, www.statista.com/ (12.6.2025)
4. Oelmann, M.; Czichy, C. (2019): Gutachten zu den Chancen und Risiken der Digitalisierung kritischer kommunaler Infrastrukturen am Beispiel der Wasserver- und Abwasserentsorgung. Mocons GmbH & Co. KG, Gutachten für den Deutschen Bundestag – vorgelegt dem Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, Mühlheim
5. IFA (2021): Branchenbild Energie- und Wasserwirtschaft. Ausführliches Branchenbild aus dem Risikoobservatorium der DGUV. Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung,
6. UBA (2023): Wasser bewirtschaften. Umweltbundesamt, 10.5.2023, www.umweltbundesamt.de/ (8.6.2025)

Wassernutzungskonkurrenz und Klimawandelanpassung

Durch den Klimawandel und veränderte Nutzungsgewohnheiten nimmt der Wettbewerb um Wasserressourcen zu. Gleichzeitig werden zunehmend Maßnahmen zur Klimawandelanpassung ergriffen.

In den letzten Jahren ist weltweit eine steigende Nachfrage nach Süßwasserressourcen zu verzeichnen [1][2]. In Deutschland sind die Wasserentnahmen aus der Umwelt zwischen 2002 und 2019 auf Grund geringerer Kühlwasserbedarfe in der Energieversorgung zwar gesunken [3] (Datengrafik). Allerdings steigt durch die Verbreitung wasserintensiver Schlüsseltechnologien (z.B. Elektrofahrzeugindustrie, KI, Wasserstoff) der Druck auf die Wasserressourcen auch hierzulande. Die Auslastung der Förderkapazitäten sowie Spitzenbedarfe steigen in vielen Versorgungsgebieten deutlich an [4]. Wassernutzungskonflikte und Versorgungsengpässe treten regional und punktuell verstärkt auf [5] und in den letzten Jahren kam es bereits vereinzelt zu Engpässen in der Trinkwasserversorgung. Die Versorgungssicherheit konnte jedoch bisher weitgehend gewährleistet werden [4].



Der Druck, Wasserinfrastrukturen an die Folgen des Klimawandels anzupassen, nimmt zu [6]. Technische Lösungen für die Klimaanpassung sind bereits vielfach vorhanden und haben einen hohen Reifegrad. Blau-grüne Infrastrukturen wie begrünte Fassaden,

Wände oder Dächer wurden in den letzten Jahren politisch gefördert [7], um eine Zwischenspeicherung von Niederschlagswasser zu ermöglichen. Naturbasierte Lösungen wie die Renaturierung von Flussauen und Feuchtgebieten, Wäldern und Grünflächen, Entsiegelungsmaßnahmen sowie der Einsatz von wasserspeichernden Baumaterialien gehören zu den gängigen Maßnahmen, um den Wasserrückhalt in der Fläche zu stärken („Schwammstadt“). Auch **graue Infrastrukturen** werden zur dezentralen Speicherung von Regenwasser ausgebaut, wobei der Einsatz von Regenwassernutzungssystemen in größerem Maßstab, sei es auf der Ebene einzelner Haushalte oder von Großinfrastrukturprojekten, noch aussteht [8]. Einzelne Städte experimentieren mit innovativen strukturellen Ansätzen wie unterirdischen Baumrigolen, d. h. Versickerungsanlagen, die das Regenwasser zwischenspeichern, langsam in den Boden einsickern lassen, damit es so den Bäumen länger zur Verfügung steht [9].

Neben Maßnahmen zur dezentralen Regenwasserbewirtschaftung gewinnt die **Rückgewinnung von Energie, Nährstoffen und wiederverwendbarem Wasser** aus industriellem und kommunalem Abwasser an Bedeutung. Der Fokus wissenschaftlicher und technologischer Projekte lag bisher auf der Rückgewinnung von Energie sowie von Stickstoff und Phosphor als Nährstoffen. Mit der Novellierung der Klärschlammverordnung wird das Phosphorrecycling in Deutschland künftig zur Pflicht [10]. In den letzten zehn Jahren wurden außerdem verstärkt Technologien zur Rückgewinnung hochwertiger Rohstoffe im Klärprozess entwickelt. Am weitesten entwickelt ist die **Wiederaufbereitung und -verwendung von Abwasser**. Die Anzahl der Pilotprojekte zur Aufbereitung von Abwasser nimmt zu [11]. International bestehen umfassende Erfahrungen mit Technologien zur Aufbereitung von genutztem Wasser für eine **Wiederverwendung im urbanen Raum**, z. B. für die Bewässerung von Grünflächen, aber auch für die Straßenreinigung oder Bauvorhaben [12]. Als erste Stadt Deutschlands setzt Schweinfurt flächendeckend recyceltes Nutzwasser für die Bewässerung städtischen Grüns ein [13]. Neben der Wiederverwendung zur Grünflächenbewässerung wird die **Wasserwiederverwendung für die landwirtschaftliche Bewässerung** verstärkt diskutiert und reguliert. Die Verordnung (EU) 2020/741 (in Kraft ab Sommer 2023) legt neue Mindestanforderungen an die Wasserwiederverwendung und regelt die Wiederverwendung von Abwasser [14]. Darüber hinaus werden die Möglichkeiten der Wasserwiederverwendung bei kommunalem Abwasser zur **Grundwasseranreicherung** sowie in der **industriellen Produktion** und im Gebäudesektor zunehmend erforscht und entwickelt

(vgl. Ergebnisse BMBF-Fördermaßnahme „Wasserwiederverwendung“). Auch die Trennung von Grau- und Schwarzwasser auf Quartiersebene wird in Deutschland untersucht (siehe z. B. [15]).

Oft werden infrastrukturelle Umbaumaßnahmen mit **innovativen Abwasserbehandlungspraktiken** kombiniert. Dazu gehören die Verwendung grüner Chemikalien [16] sowie der Einsatz von Nanotechnologien, um organische Verunreinigungen aus dem Abwasser durch Sonnenlicht energieeffizienter zu entfernen [9]. Zur dezentralen Aufbereitung von Grauwasser, also leicht verschmutztem Abwasser aus Duschen, Bädern oder Waschmaschinen, könnten sich neuartige Sanitärsysteme, wie beispielsweise aktiv belüftete Membranbioreaktoren, zum Abbau von Ammonium und Kohlenstoffverbindungen eignen [17]. Bei Versorgungsunterbrechungen könnten perspektivisch **dezentrale Wasseraufbereitungssysteme** eine Rolle spielen.

Aufkommende technologische Entwicklungen

Recycling von Abwasser zur Grundwasseranreicherung

Um die natürlichen Grundwasserreserven zu schonen, wird in Teilen Europas (z. B. am Mittelmeer oder in London) Regenwasser im Winterhalbjahr oder bei starken Niederschlägen durch kontrollierte Grundwasseranreicherung im Boden gespeichert, damit es zu Dürrezeiten in ausreichender Menge und Qualität für die Trinkwasserversorgung zur Verfügung steht. Die Grundwasseranreicherung ist an sich ein bewährtes Verfahren. Zur gezielten Wiederauffüllung von Grundwasserleitern kommen Methoden wie Uferfiltration, Infiltrationsteiche und Injektionsbrunnen zum Einsatz. Genutzt werden dabei traditionell natürliche Wasserquellen und aufbereitetes städtisches Regenwasser, um die Grundwasserspeicherung zu erhöhen und die Versorgung bei Dürre und in Notfällen sicherzustellen. Diese Ansätze können eine wichtige Rolle beim Ausgleich übermäßiger Wasserentnahmen und bei der Wiederherstellung des Grundwassergleichgewichts spielen, aber auch zur Erhaltung oder Verbesserung der Ökosystemfunktionen und der Grundwasserqualität eingesetzt werden [18]. Aktuell wird die Grundwasserspeicherung für die Wiederverwendung von Abwasser weiterentwickelt [19]. Insbesondere wird untersucht, welche Risiken bei einer kontrollierten und gezielten Grundwasseranreicherung mit gereinigtem Abwasser durch den Eintrag von Spurenstoffen in das

Grundwasser entstehen können [20][21]. Eine Kombination mit anderen Verfahren wie der Oxidation zur Entfernung von gelösten organischen Kohlenstoffen ist ebenfalls Gegenstand laufender Untersuchungen [22].

Recycling von kommunalem Abwasser für die industrielle Produktion

In der Industrie findet die Kreislaufführung von industriell genutztem Wasser bereits punktuell statt und wird weiter erforscht [23]. Während die Wiederverwendung von kommunalem Abwasser für die landwirtschaftliche Bewässerung seit mehreren Jahren intensiv erforscht und erprobt wird [19], ist die Wiederverwendung in der industriellen Produktion ein relativ neuer Ansatz [24]. Erste Konzepte und Vorhaben werden aktuell entwickelt, z. B. für Halbleiter. So plant etwa Samsung, auf einer Produktionsstätte in Südkorea kommunales Abwasser zu nutzen, um die Wasserbedarfe, die durch die steigende Nachfrage nach Halbleitern entstehen, zu befriedigen – 400 Mio. Liter Abwasser sollen gereinigt und täglich zur Herstellung von Elektronikchips verwendet werden [25]. In Deutschland setzen Produzenten wie Tesla in Grünheide zunächst auf die Wiederverwendung von Produktionswasser [26].

Dezentrale Wasseraufbereitungssysteme

Kleine, modulare Wasseraufbereitungsanlagen für entlegene oder wasserarme Regionen, die Techniken wie die Membranfiltration und Nanofiltration einsetzen, können insbesondere in Krisensituationen eine zentrale Rolle bei der Notversorgung mit Trinkwasser spielen. Ein solches Anwendungsszenario hat aktuell für Deutschland nur eine geringe Relevanz. Es könnte aber langfristig an Bedeutung gewinnen, da die eingesetzten Technologien die Möglichkeit bieten, die Wasserverfügbarkeit bei Engpässen, Verunreinigungen und anderen Problemen, die zu einer Unterbrechung der Trinkwasserversorgung führen können, zu erhöhen. Naturkatastrophen und punktuelle Unterbrechungen der öffentlichen Wasserversorgung haben das Interesse an Technologien zur Versorgungssicherung beispielsweise in den USA erhöht [27].

Referenzen

1. Global Commission on the Economics of Water (2023): Turning the Tide. watercommission.org/ (24.6.2024)

2. UNEP (2024): Water as a Circular Economy Resource. United Nations Environment Programme, Foresight Brief 033, DOI: [10.59117/20.500.11822/44782](https://doi.org/10.59117/20.500.11822/44782)
3. Destatis (2023): Wasserentnahme aus der Umwelt zwischen 2010 und 2019 um 14 % gesunken. Statistisches Bundesamt, www.destatis.de/ (24.6.2024)
4. DVGW (2023): Resilienz und Versorgungssicherheit der öffentlichen Wasserversorgung. Ergebnisse der DVGW Online-Umfrage 2022. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., www.dvgw.de/ (27.9.2024)
5. Cullmann, A. et al. (2022): Wertvolle Ressource Wasser auch in Deutschland zunehmend belastet und regional übermäßig genutzt. In: DIW Wochenbericht, 49, S. 651–660, DOI: [10.18723/DIW_WB:2022-49-1](https://doi.org/10.18723/DIW_WB:2022-49-1)
6. LAWA (2024): Fokus Wasser – Folgen des Klimawandels und Maßnahmen zur Anpassung. Beispiele und Lösungsansätze für Wechselwirkungen zwischen Wasserwirtschaft, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Aquakultur und Binnenfischerei. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, Berlin
7. BMWSB (2023): 64 Projekte ausgewählt – Unterstützung für grün-blaue Infrastruktur in Städten. Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, www.bmwsb.bund.de/ (12.8.2024)
8. Wartalska, K. et al. (2024): The Potential of RainWater Harvesting Systems in Europe – Current State of Art and Future Perspectives. In: Water Resources Management (38), S. 4657–4683, DOI: [10.1007/s11269-024-03882-0](https://doi.org/10.1007/s11269-024-03882-0)
9. Kompetenznetzwerk Umweltwirtschaft.NRW (2022): BeGrüKlim: Wasserbewusste Stadtentwicklung durch Einsatz von Baumrigolen. Innovationsradar zur Klimawende, o. O.
10. BMUV (2024): Branchendialog „Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm“. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, 23.1.2024, www.bmuv.de/ (25.6.2024)
11. Zheng, M. et al. (2024): Pathways to advanced resource recovery from sewage. In: Nature Sustainability 7(11), S. 1395–1404, DOI: [10.1038/s41893-024-01423-6](https://doi.org/10.1038/s41893-024-01423-6)
12. Flörke, M. et al. (2024): Auswirkung des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit. Anpassung an Trockenheit und Dürre in Deutschland (WAD-Klim). Umweltbundesamt, Texte 143/2024, Dessau-Roßlau
13. WBGU (2024): Wasser in einer aufgeheizten Welt. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Berlin
14. UBA (2023): Fragen und Antworten zur Wasserwiederverwendung. Umweltbundesamt, www.umweltbundesamt.de/ (8.6.2025)

15. Urban Greenblue Grids (2024): Jenfelder Au, Hamburg. www.urbangreenbluegrids.com/ (8.7.2025)
16. EPRS (2024): Closing the blue loops: responsible and sustainable innovation in the fields of water and ocean. European Parliamentary Research Service, Luxemburg
17. Gaeckle, D. et al. (2023): Dezentrale Grauwasseraufbereitung mit schwerkraftbetriebenen Membransystemen. In: Porth, M. et al. (Hg.): Wasser, Energie und Umwelt. Wiesbaden, S. 669–677, DOI: [10.1007/978-3-658-42657-6_70](https://doi.org/10.1007/978-3-658-42657-6_70)
18. Sprenger, C. et al. (2017): Inventory of managed aquifer recharge sites in Europe: historical development, current situation and perspectives. In: Hydrogeology Journal 25(6), S. 1909–1922, DOI: [10.1007/s10040-017-1554-8](https://doi.org/10.1007/s10040-017-1554-8)
19. BMBF (2024): WavE – Kommunales Abwasser. Wasserwiederverwendung durch Nutzung von behandeltem kommunalem Abwasser. Bundesministerium für Bildung und Forschung, www.bmbf-wave.de/ (10.10.2024)
20. Kompetenzzentrum Wasser Berlin (2024): DEMEAU: Behandlung organischer Spurenstoffe in Wasser und Abwasser. Kompetenzzentrum Wasser Berlin, www.kompetenz-wasser.de/ (12.9.2024)
21. TrinkWave (2025): TrinkWave Transfer. www.wasser.tum.de/ (22.1.2025)
22. Kompetenzzentrum Wasser Berlin (2024): OXIMAR. Kompetenzzentrum Wasser Berlin, www.kompetenz-wasser.de/ (12.9.2024)
23. BMBF (2024): WavE – Industrielles Wasser. Wassertechnologien: Wiederverwendung. Bundesministerium für Bildung und Forschung, www.bmbf-wave.de/ (10.10.2024)
24. Bauer, S.; Wagner, M. (2022): Possibilities and Challenges of Wastewater Reuse—Planning Aspects and Realized Examples. In: Water 14(10), S. 1619, DOI: [10.3390/w14101619](https://doi.org/10.3390/w14101619)
25. Williams, W. (2024): Samsung will use sewage water to quench surging thirst for semiconductors – 400 million liters of waste water to be purified and used daily to manufacture electronic chips. TechRadar, 1.4.2024, www.techradar.com/ (25.6.2024)
26. MIT Technology Review (2024): Wie recyceltes Trinkwasser unser Dürreproblem lösen könnte. t3n Magazin, 26.8.2024, www.t3n.de/ (11.9.2024)
27. EPA (2019): Atmospheric Water Generation Technology. Technical Brief. U.S. Environmental Protection Agency, o. O.

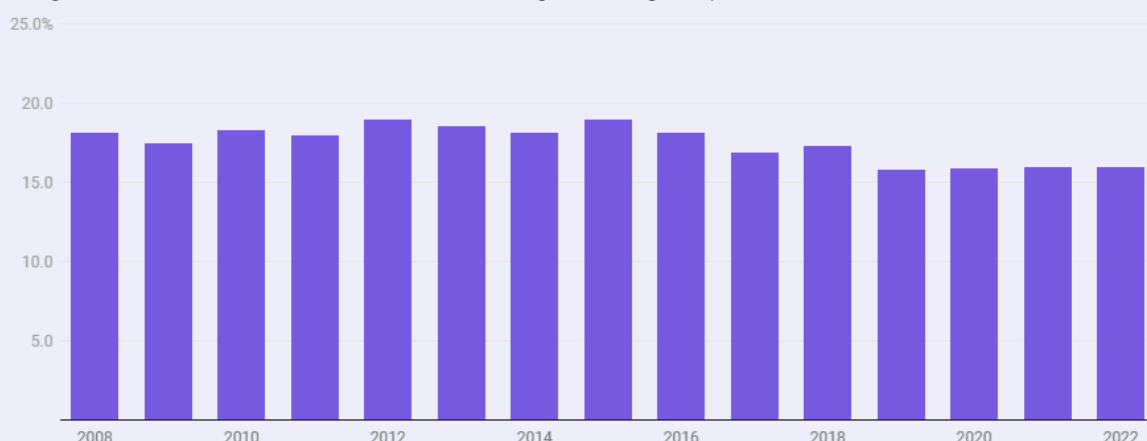
Belastung der Qualität von Trinkwasserressourcen

Der Zustand von Oberflächengewässern hat sich in den letzten Jahren insgesamt verbessert, weist aber noch erhebliche Defizite auf, beispielsweise hinsichtlich der Nitratbelastung, der Belastung mit Mikroplastik sowie mit persistenten mobilen und toxischen Stoffen und Antibiotika. Außerdem steigt die Versalzung der Trinkwasserressourcen in Küstengebieten an.

Die ökologische Qualität der Flüsse, Seen und Küstengewässer in Deutschland hat sich in den letzten Jahren verbessert [1]. Allerdings sind die Wasserressourcen zunehmend belastet und regional übermäßig genutzt [2]. Nur 9 % der Oberflächengewässer erreichten 2021 einen guten ökologischen Zustand [3]. Außerdem weist noch immer jeder fünfte Grundwasserkörper in Deutschland zu hohe Nitratwerte auf und die Zahl der Grundwassermessstellen mit nachgewiesener Überschreitung der Nitratkonzentration ist seit 2018 konstant [4] (Datengrafik). Zudem sind zahlreiche Gewässer mit Pflanzenschutzmitteln über die gesetzlich zulässigen Konzentrationen hinaus kontaminiert [5]. Wetterextreme und die globale Erwärmung können dazu beitragen, dass Stoffe in die Gewässer gelangen und deren Qualität weiter gefährden.

Anteil der Grundwasser-Messstellen mit nachgewiesener Überschreitung der Nitratkonzentration in den Jahren von 2008 bis 2022

Bei etwa 16 Prozent der Grundwasser-Messstellen in Deutschland ist eine Überschreitung des Nitratgrenzwertes im Jahr 2022 nachgewiesen worden. Der Grenzwert der Nitratkonzentration liegt bei 50 Milligramm pro Liter Grundwasser.



Details: Deutschland

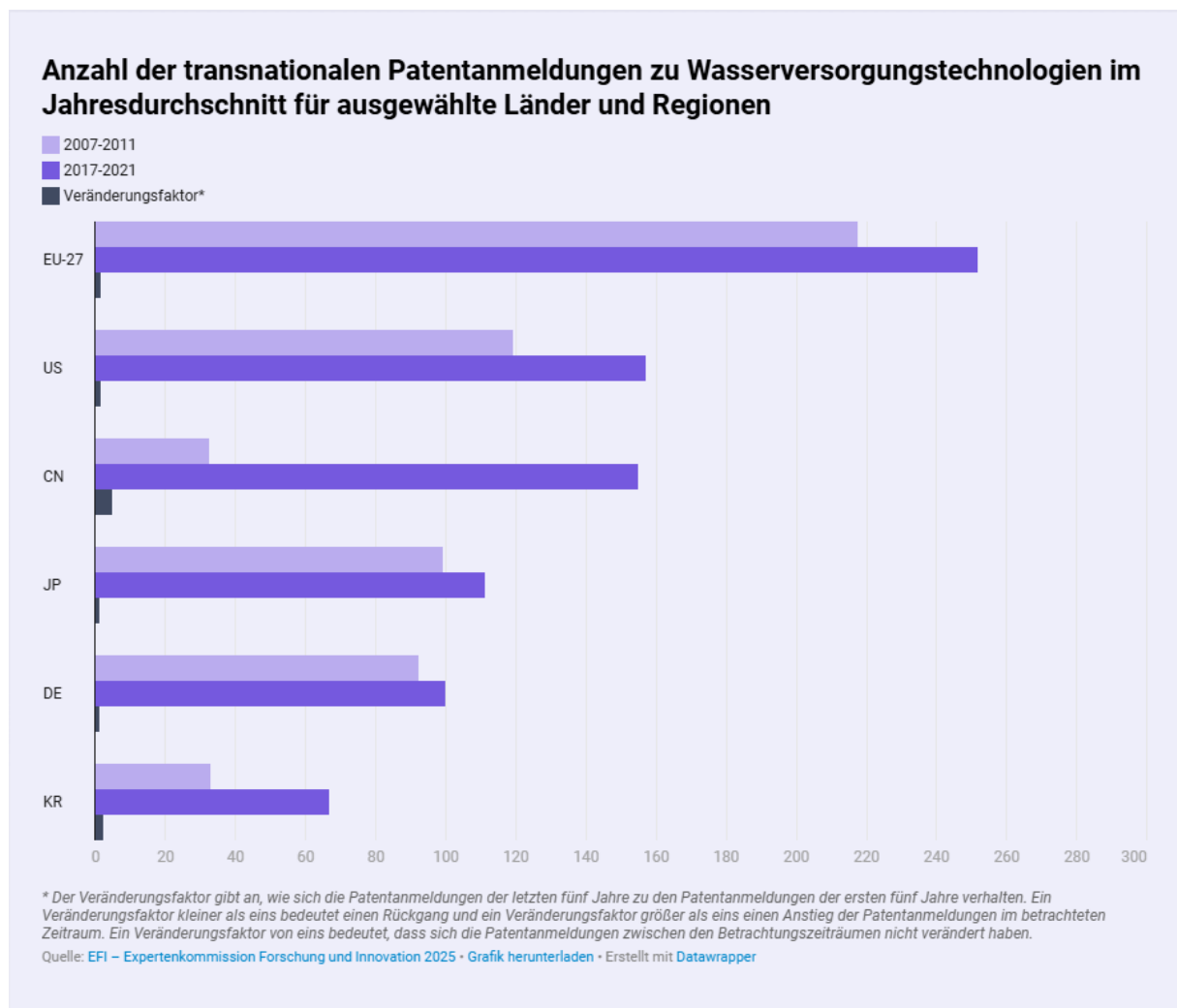
Source: Umweltbundesamt, (16. Januar, 2024). Anteil der Grundwasser-Messstellen mit nachgewiesener Überschreitung der Nitratkonzentration in den Jahren von 2008 bis 2022 [Graph]. In Statista. Zugriff am 17. Juni 2025 • Download image • Created with Datawrapper

Die Trinkwasserressourcen sind zunehmend mit **Mikro- und Nanoplastik** belastet [6]. Dabei sind Nanokunststoffe – Partikel mit einem Durchmesser kleiner als 70 Mikrometer – in deutlich höheren Mengen im Trinkwasser vorhanden als bisher angenommen [7] und reichern sich in Nieren, Leber und vor allem im Gehirn von Menschen an [8]. Technologische Lösungen zur Entfernung von Mikro- und Nanoplastik aus dem Trinkwasser umfassen sowohl solche, die dazu beitragen, dass Plastik gar nicht erst ins Abwasser gelangt (z. B. Filter in Waschmaschinen), als auch solche, die Plastik aus dem Abwasser entfernen (z. B. Membrantechnologien in Kläranlagen) oder aus Gewässern (Luftblasenvorhänge).

Schwer abbaubare und mobile Chemikalien kommen in Gewässern und Trinkwassereinzugsgebieten deutlich häufiger vor als bisher angenommen. Sie lassen sich mit den vorhandenen Techniken kaum entfernen [9][10]. Im Fokus stehen derzeit poly- und perfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS), für die in einigen urbanen Gebieten erhöhte Werte festgestellt wurden [11] bis hin zu Überschreitungen von Grenzwerten in ca. 4 bis 6,5 % der Trinkwasserproben [12]. Einige Arten von PFAS haben sich als schädlich für die Gesundheit von Menschen und Wildtieren erwiesen. Unter anderem wurde ein Zusammenhang mit bestimmten Krebsarten, geschwächten Reaktionen auf Impfungen sowie Schilddrüsenerkrankungen festgestellt. Noch sind nicht für alle kritischen Anwendungen (z. B. in der Medizin oder in den Sektoren Energie und IKT) Alternativen zu PFAS vorhanden [13].

Die Schwellenwerte für die erlaubte Antibiotikakonzentration im Abwasser werden derzeit häufig überschritten; insbesondere an und in der Nähe von Produktionsstätten werden Überschreitungen der festgelegten maximalen Wirkstoffkonzentrationen im Produktionsabwasser festgestellt [14]. Die erhöhten Antibiotikakonzentrationen in Abwässern begünstigt die Ausbreitung **antimikrobieller Resistenzen** [15]. So wurden entlang von Vorflutern, wo der Anteil an eingeleiteten Klärwässern besonders hoch ist, Bakterien und Gene mit Resistenzen gegenüber verschiedenen Antibiotika nachgewiesen [16][5] (s. **Gesundheitsbelastungen im Wandel**). In herkömmlichen Kläranlagen ohne vierte Reinigungsstufe werden Antibiotika bisher kaum entfernt [17]. Mit der Aktualisierung der Europäischen Kommunalabwasserrichtlinie sollen größere Anlagen sowie Anlagen, die besonders anfällig für Grenzwertüberschreitungen sind, besser ausgerüstet werden [18]. In den letzten Jahren ist in Deutschland ein Anstieg der transnationalen Patentanmeldungen für Wasserversorgungstechnologien zu verzeichnen [19] (**Datengrafik**).

Hervorzuheben sind solche Innovationsbereiche, die für die **Aufrechterhaltung der Qualität von Trinkwasserressourcen** relevant sind.



Ein weiteres Problem ist die **Versalzung der Trinkwasserressourcen**, die in Küstengebieten zunimmt. Betroffen ist vor allem Norddeutschland, wo große Landflächen unter dem Meeresspiegel liegen, was die Versalzung des Grundwassers zu einem drängenden Problem macht [20]. Es ist zu erwarten, dass mit dem weiteren **Anstieg des Meeresspiegels** diese Flächen größer werden und die Chloridkonzentrationen vor allem im Küstenbereich deutlich zunehmen werden. In manchen Grundwasserkörpern Norddeutschlands werden die Grenzwerte der deutschen Trinkwasserverordnung für Chlorid bereits überschritten, sodass das Wasser teilweise nicht als Trinkwasser geeignet ist [21]. Außerdem können **Korrosionsschäden an der Infrastruktur** [22] sowie ein erhöhter Aufwand bzw. Kosten für die Trinkwasseraufbereitung entstehen. Entsprechend steigt die Bedeutung des Schutzes gegen Versalzung, aber auch von **innovativen Entsalzungstechnologien**.

Aufkommende technologische Entwicklungen

Innovative technologische Ansätze zur Verbesserung der Qualität von Trinkwasserressourcen

Um den Herausforderungen im Zusammenhang mit der Belastung der Trinkwasserressourcen zu begegnen, werden technologische Lösungen zur Erkennung und möglichst kostengünstigen Entfernung von Schadstoffen aus dem Wasser entwickelt. Für die Identifikation von Schadstoffen werden Verfahren zur nicht zielgerichteten Stoffanalytik entwickelt und erprobt, um Informationen über die in einer Wasserprobe enthaltenen Substanzen zu sammeln (z. B. Molekülmassen und -ladungen, Stoffkonzentrationen) [23]. In der Trinkwasseraufbereitung werden sogenannte Ultra- und Nanofiltrationssysteme immer häufiger angewendet, um sowohl resistente Bakterien als auch Resistenzgene zu entfernen [24]. Zu den neuen Technologien für die Behandlung von Abwasser gehört die Kombination von Spurenstoff- und weitgehender Phosphorelimination [25]. Zu den fortschrittlichsten Verfahren gehören Umkehrosmose, UV-Oxidation auf LED-Basis sowie alternative biologische und elektrochemische Verfahren [26]. Zu nennen sind außerdem innovative Membrantechnologien zur Entfernung von Mikroplastik, Schwermetallen, Medikamentenrückständen und anderen persistenten Stoffen sowie biologische Abbauprozesse, wobei für den Abbau persistenter organischer Verbindungen (z. B. PFAS oder Antibiotika) speziell gezüchtete Mikroorganismen eingesetzt werden.

Allerdings stoßen technologische Lösungen an ihre Grenzen. Aktuelle Erkenntnisse deuten darauf hin, dass zahlreiche Chemikalien, die sich im Trinkwasser oder Abwasser befinden, nicht identifiziert werden können [15] und dementsprechend nicht gezielt aus dem Wasser entfernt werden können. Außerdem sind manche Verschmutzungen nahezu unumkehrbar (z. B. Kunststoffe am Meeresboden) oder beeinträchtigen die Wasserqualität auch noch Jahre nach Einführung einer Maßnahme zur Verringerung der Einträge in Gewässer, so im Fall der Verringerung der N-Verschmutzung durch Düngemittel [27]. Daher werden Hersteller zunehmend in die Pflicht genommen, Einträge an der Quelle zu reduzieren. „Benign-by-design“-Ansätze [28] können beispielsweise dazu beitragen, dass Stoffe in nicht-toxische Abbauprodukte umgewandelt werden, beispielsweise durch Mineralisierung.

Innovative Entsalzungstechnologien

Um der Versalzung von Grundwasser in Küstengebieten entgegenzuwirken, können technische, naturbasierte und koordinative Maßnahmen eine Rolle spielen. Solche Maßnahmen beziehen sich sowohl auf Brunnenmanagement, Wasserrückhalteflächen, Grundwasseranreicherung als auch die Nutzung von Oberflächen- und Brauchwasser. Zu den technischen Maßnahmen gehören unter anderem Membran- und Filtrationstechniken sowie hydrologische Barrieren oder Salzwasserintrusionssperrbrunnen. Die meisten unterirdischen Infrastrukturen sind jedoch nicht in der Lage, das Eindringen von Meerwasser in das Grundwasser wirksam zu verhindern, und könnten bei einem Anstieg des Meeresspiegels sogar das Risiko für das Grundwasser an der Küste erhöhen [29].

Große Fortschritte wurden bei den Techniken zur Entsalzung von Meereswasser für die Trinkwasserversorgung erzielt. Zu den Entsalzungstechnologien gehören beispielsweise Niederdruck-Membranfiltration und Umkehrosmose [26]. In Europa – vor allem im Mittelmeerraum – wurden in den letzten Jahren zahlreiche Entsalzungsanlagen in Betrieb genommen [30]. Um Entsalzungsanlagen trotz des hohen Energieverbrauchs wirtschaftlich betreiben zu können, könnten perspektivisch die thermische Entsalzung durch Abwärmenutzung und solarbetriebene Entsalzungsanlagen eingesetzt werden. Darüber hinaus könnten energieeffiziente Technologien wie die kapazitive Entionisierung oder osmotische Verfahren zur Entfernung von Salz aus Trinkwasser die Energiebedarfe deutlich senken. Bei der Meerwasserentsalzung werden ergänzend Möglichkeiten erforscht, salzhaltige Lauge zu entsorgen bzw. zu verwerten. Zu den Lösungen gehören Aquakulturen und Landwirtschaft auf salzigen Böden bzw. mit salzwasserbasierter Bewässerung sowie industrielle Verfahren, die Brack- oder Salzwasser nutzen können. Zwar stellt die Entsalzung von Meereswasser für die Trinkwasserversorgung in Deutschland aktuell keine relevante Option dar. Allerdings wird in Berlin und Brandenburg der Import von Salzwasser aus der Ostsee und dessen Entsalzung zur Aufbereitung als Trinkwasser bereits diskutiert und im Rahmen einer Machbarkeitsstudie untersucht [31].

Referenzen

1. UBA (2023): Stoffeinträge in Gewässer. Umweltbundesamt, www.umweltbundesamt.de/
2. Cullmann, A. et al. (2022): Wertvolle Ressource Wasser auch in Deutschland zunehmend belastet und regional übermäßig genutzt. In: DIW Wochenbericht 49, S. 651–660, DOI: [10.18723/DIW_WB:2022-49-1](https://doi.org/10.18723/DIW_WB:2022-49-1)

3. BMUV; UBA (2023): Umweltzustandsbericht des bundes 2023. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicher und Verbraucherschutz; Umweltbundesamt, Berlin, www.bmu.de/
4. UBA (2024): Nitrat im Grundwasser: Messstellen mit Grenzwertüberschreitung bis 2022. Umweltbundesamt; Statista, de.statista.com/ (21.6.2024)
5. WBGU (2024): Wasser in einer aufgeheizten Welt. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Berlin
6. Könnölä, T. et al. (2021): Healthy Oceans, Seas, Inland and Coastal Waters – Foresight on Demand. 25.11.2021, www.foresight-on-demand.eu/ (9.7.2024)
7. Lücke, N. (2024): Forschende enthüllen: Viel mehr Plastik in Trinkwasser als bisher gedacht. ingenieur.de, 10.1.2024, www.ingenieur.de/ (13.8.2024)
8. Nihardt et al. (2025): Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. In: *Nature medicine*, 1114-1119. DOI: [10.1038/s41591-024-03453-1](https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1)
9. Arp, H. P. H. et al. (2023): PMT/vPvM assessment of REACH registered Substances Detected in Wastewater Treatment Plant Effluent, Freshwater Resources and Drinking Water. Umweltbundesamt, UBA/TEXTE 20/2023, Dessau-Roßlau
10. UBA (2023): Wasserressourcen müssen besser geschützt werden. Umweltbundesamt, 31.8.2023, www.umweltbundesamt.de/ (10.10.2024)
11. Ingold, V. et al. (2023): Screening for 26 per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in German drinking waters with support of residents. In: *Eco-Environment & Health* 2(4), S. 235–242, DOI: [10.1016/j.eehl.2023.08.004](https://doi.org/10.1016/j.eehl.2023.08.004)
12. UBA (2024): Empfehlung des Umweltbundesamtes. PFAS im Trinkwasser – Sachstand und Aspekte zur Bewertung Empfehlung des Umweltbundesamtes nach Anhörung der Trinkwasserkommission. Umweltbundesamt, www.umweltbundesamt.de/ (17.1.2025)
13. POST UK (2025): Regulation and remediation of ‘forever’ chemicals (Autor/innen: Toolan & Wentworth). POSTnote 747, London
14. UBA (2023): Antibiotikaresistenzen: Studie zeigt hohen Handlungsdruck. Umweltbundesamt, 9.11.2023, www.umweltbundesamt.de/ (10.10.2024)
15. UNEP; International Science Council (2024): Navigating New Horizons: A global foresight report on planetary health and human wellbeing. Nairobi, DOI: [10.59117/20.500.11822/45890](https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45890)
16. Hiller, C. X. et al. (2019): Antibiotic microbial resistance (AMR) removal efficiencies by conventional and advanced wastewater treatment processes: A review. In: *Science of The Total Environment* 685, S. 596–608, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2019.05.315](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.315)

17. UBA (2023): FAQ: Antibiotika und Antibiotikaresistenzen in der Umwelt. Umweltbundesamt, 14.11.2023, www.umweltbundesamt.de/ (24.6.2024)
18. BMUV (2023): EU-Umweltrat einigt sich auf Verbesserungen bei der Behandlung kommunalen Abwassers. Pressemitteilung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, www.bmuv.de/ (13.8.2024)
19. EFI (2025): Gutachten zu Forschung, Innovation und Technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands 2025. Expertenkommission Forschung und Innovation, Berlin
20. Karrasch, L. et al. (2023): Groundwater salinization in northwestern Germany: A case of anticipatory governance in the field of climate adaptation? In: Earth System Governance 17, S. 100179, DOI: [10.1016/j.esg.2023.100179](https://doi.org/10.1016/j.esg.2023.100179)
21. González, E. et al. (2021): Current and future state of groundwater salinization of the northern Elbe-Weser region. In: Grundwasser 26(4), S. 343–356, DOI: [10.1007/s00767-021-00496-w](https://doi.org/10.1007/s00767-021-00496-w)
22. Habel, S. et al. (2024): Hidden Threat: The Influence of Sea-Level Rise on Coastal Groundwater and the Convergence of Impacts on Municipal Infrastructure. In: Annual Review of Marine Science (16), S. 81–103, DOI: [10.1146/annurev-marine-020923-120737](https://doi.org/10.1146/annurev-marine-020923-120737)
23. TAB (2023): Chancen und Risiken der Digitalisierung kritischer kommunaler Infrastrukturen an den Beispielen der Wasser- und Abfallwirtschaft. Endbericht zum TA-Projekt. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), Berlin, <https://doi.org/10.5445/IR/1000163177>
24. Stelmaszyk, L. (2022): Nachweis von Antibiotikaresistenzen in Rohwässern und Elimination durch Aufbereitungsverfahren. Dissertation. KIT, Karlsruhe
25. Zettl, U. (2023): Zur Kombination von Spurenstoff- und weitestgehender Phosphorelimination. In: Porth, M. et al. (Hg.): Wasser, Energie und Umwelt. Wiesbaden, S. 693–701, DOI: [10.1007/978-3-658-42657-6_72](https://doi.org/10.1007/978-3-658-42657-6_72)
26. EPRS (2024): Closing the blue loops: responsible and sustainable innovation in the fields of water and ocean. European Parliamentary Research Service, Luxemburg
27. Liu, X. et al. (2024): Impact of groundwater nitrogen legacy on water quality. In: Nature Sustainability 7(7), S. 891–900, DOI: [10.1038/s41893-024-01369-9](https://doi.org/10.1038/s41893-024-01369-9)
28. Diamond, M. L. et al. (2024): Exploring Outputs of the Intergovernmental Science-Policy Panel on Chemicals, Waste, and Pollution Prevention. In: Environmental Science & Technology Letters 11(7), S. 664–672, DOI: [10.1021/acs.estlett.4c00294](https://doi.org/10.1021/acs.estlett.4c00294)

29. Su, X. et al. (2024): Shoreline barriers may amplify coastal groundwater hazards with sea-level rise. In: Scientific Reports 14(1), S. 15559, DOI: [10.1038/s41598-024-66273-w](https://doi.org/10.1038/s41598-024-66273-w)
30. Macher, J. (2024): Trinkwasser aus dem Meer? Das Parlament, www.das-parlament.de/ (17.1.2025)
31. euwid (2023): Berlin und Brandenburg prüfen Nutzung von Ostsee-Wasser für Trinkwasserversorgung. 29.8.2023, www.euwid-wasser.de/ (4.7.2025)

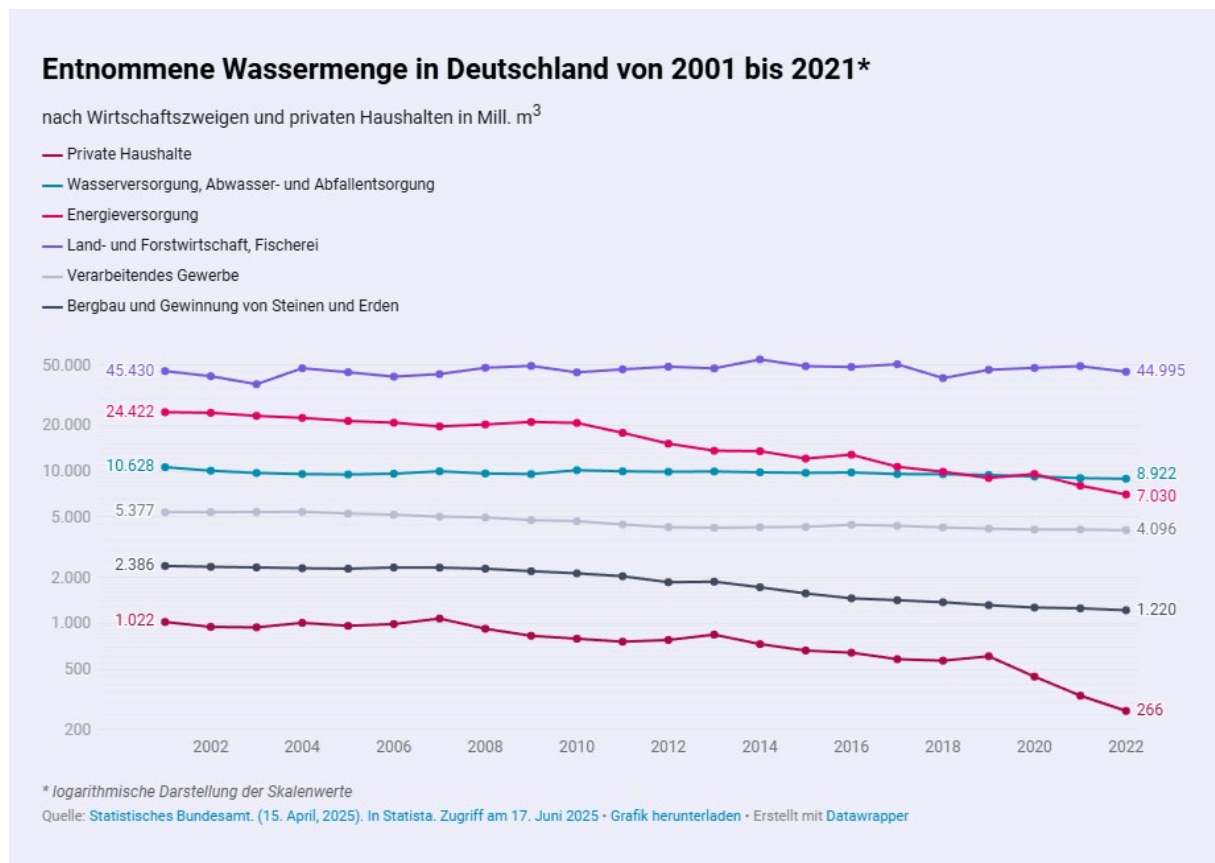
Digitalisierung und Vernetzung der technischen Infrastrukturen

Die Wasserwirtschaft gehört bislang zu den weniger digitalisierten Infrastruktursystemen, doch der Grad der Digitalisierung und damit auch die Vernetzung der technischen Infrastrukturen nehmen kontinuierlich zu.

Digitale Lösungen werden in der Wasserwirtschaft einerseits für **Mess- und Analyseprozesse** und andererseits für die **Anlagensteuerung** sowohl in der Trinkwasserversorgung als auch in der Abwasserentsorgung eingesetzt, wobei der Nutzungsgrad zwischen den im Infrastruktursystem Wasser tätigen Unternehmen stark variiert [1]. Unterschiede mit Blick auf den Digitalisierungsgrad zeigen sich auch nach Wertschöpfungsstufen und Aufgaben: Während die Trinkwasserverteilung und die Abwasserbehandlung in den meisten Unternehmen hochautomatisiert gesteuert wird [2][1], erfolgt die Überwachung der Wasserqualität häufig manuell. Proben werden per Hand entnommen und zeitlich entkoppelt im Labor analysiert [3]. Gleichzeitig werden digitale Lösungen in vielen Unternehmen auch für verbesserte **Datenmanagement- und Verwaltungsprozesse** sowie Kundendienstleistungen eingesetzt [1]. Angesichts der wachsenden Datenmengen steigt die Anzahl der Wasserversorgungsunternehmen, die **cloudbasierte Lösungen** einsetzen [4]. Durch das Bestreben nach umfassenderen Analysen und Überwachung der Anlagen steigt die **Konvergenz von IT und OT**, sprich die Integration von Informationstechnologie (IT) und Betriebstechnologie (Operational Technology, OT) [5][1].

Auch wenn die häufig noch analog erfassten Betriebsdaten zunehmend aggregiert, integriert und archiviert werden und mit der Nationalen Wasserstrategie Ziele zum Aufbau einer integrierten Infrastruktur formuliert wurden, sind die meisten Datenbestände noch

stark **fragmentiert**, lückenhaft und wenig standardisiert [6]. Selbst Daten zu Wasserentnahmen werden nicht überall in Deutschland gleichermaßen erfasst [7]. Daten fehlen deswegen an Granularität (**Datengrafik**). Dadurch können fortschrittliche Analysemethoden und ein umfassendes **datengestütztes Umweltmonitoring** für wasserwirtschaftliche und politische Entscheidungen noch nicht systematisch umgesetzt werden [8].



Systeme zur **Überwachung der Wasserqualität in Echtzeit** werden für das Monitoring von Oberflächengewässern und Grundwasser [9], aber auch für die Überwachung der Wasserqualität in Trinkwasserverteilnetzen entwickelt. Allerdings ist die **Datendichte** in manchen Regionen zu gering, um detaillierte Modelle zu erzeugen und Parameter mit hoher Variabilität zu überwachen. Die dezentrale Datenhaltung, das Fehlen von Datenschnittstellen sowie von günstigen und verlässlichen Sensortechnologien mit langen Akkulaufzeiten und weiträumiger Funkübertragung stellen zentrale Hindernisse dar [1]. Perspektivisch könnten Sensoren und Systeme zur Echtzeit-Datenanalyse direkt an der Infrastruktur (z. B. Pumpstationen, Leitungen) an Bedeutung gewinnen, um schnelle Reaktionszeiten zu ermöglichen und die zentralen Systeme zu entlasten. Um Sensoren für verschiedenste Anwendungen über das gesamte Versorgungsgebiet kostengünstig und energieeffizient einzusetzen, könnten

sogenannte **LoRaWAN-Netze** ausgebaut werden. Diese speziellen Funknetze ermöglichen es, Sensorsignale auch durch dicke Betonwände und weiträumig zu übertragen. Vielerorts ist LoRaWAN schon verfügbar oder die Installation ist in Planung [1].

Digitale Lösungen verbessern auch die Fähigkeit, **Wasserangebot und -nachfrage in Echtzeit vorherzusagen**. Sowohl das Monitoring des Wasserdargebots als auch die Prognosefähigkeit z. B. von Extremwetterereignissen (z. B. Starkregen, Monitoring von Dürre) gewinnen an Präzision [10][11]. Dabei spielen neue Überwachungsmöglichkeiten durch satellitengestützte hochaufgelöste **Fernerkundung** und fortschrittliche [12] KI eine zentrale Rolle. Sowohl Erdobservationssatelliten als zunehmend auch Forschungsdrohnen sammeln große Mengen an umweltbezogenen Daten [13], die mit Informationen aus Bodensensoren kombiniert werden können [3]. Die großen Datenbestände können dann mithilfe von **Künstlicher Intelligenz** immer stärker automatisch und in Echtzeit verarbeitet, übertragen und visualisiert werden [3]. Für eine genauere Prognose der Wassernachfrage wären die Zuverlässigkeit, die Echtzeitfähigkeit und die Kosten digitaler Sensoren zu verbessern und die Dichte von Sensornetzen zu erhöhen [1].

Große Erwartungen werden in ein verbessertes Monitoring und die Entscheidungsunterstützung in Echtzeit gesetzt [1]. **Adaptive Steuerungssysteme**, die zum Ziel haben, Anlagen an variable Wassernachfrage bzw. Abwasseranfall unter Berücksichtigung von Witterungs- und Klimaveränderungen semi-automatisch anzupassen, gewinnen in der Wasserwirtschaft entsprechend an Bedeutung [1]. Perspektivisch könnten einzelne Pumpwerke und Wasseraufbereitungsanlagen mit KI-gestützten Steuerungssystemen versehen werden, um die Effizienz und Anpassungsfähigkeit bei Schwankungen in der Nachfrage oder klimatischen Bedingungen zu erhöhen [14]. In der Abwasserwirtschaft nehmen die integrierte Überwachung und adaptive Echtzeitsteuerung von **Kläranlagen und Kanal- und Regenwassernetzen** zu [8]. Ziel ist es, vor allem Regenwasserausleitungen und Mischwasserüberläufe aus dem Kanalnetz in die Gewässer zu reduzieren. Bisher wurde die Echtzeitsimulation zur optimalen Bewirtschaftung von Speicherräumen im Kanalnetz vor allem im Rahmen von Forschungsprojekten in einzelnen Städten implementiert, zum Beispiel in Freiburg [15].

Die **vorausschauende Wartung der Infrastrukturen** wird zunehmend digital unterstützt. An Bedeutung gewinnen die Zustandserfassung von Infrastrukturen mittels Sensoren, die Fernwartung und die Auswertung

großer Datenmengen mittels KI. Systeme zur **automatischen Erkennung von Geräteausfällen und Leckagen** werden zunehmend entwickelt, eingesetzt und erprobt [2]. **Virtual- und Augmented-Reality-Tools** werden pilothaft zu Schulungs- und Wartungszwecken eingesetzt, z. B. zur Visualisierung unterirdischer Leitungsnetze oder zur Bedienung komplexer Anlagen [16]. In einzelnen Städten werden **digitale Abbilder** des Trinkwasser- oder des Kanalnetzes entwickelt, um lange unentdeckte Leckagen zu identifizieren [17] oder die Inspektion und Reinigung zu automatisieren [18]. Eine breite Anwendung von Systemen zur vorausschauenden Instandhaltung der wasserwirtschaftlichen Infrastruktur, die sowohl aus historischen Daten als auch aus Echtzeitdaten lernt, scheitert allerdings bislang häufig an unzureichender IT-Infrastruktur, Datenverfügbarkeit sowie mangelnden Kompetenzen und Ressourcen [19].

Aufkommende technologische Entwicklung

Monitoring von Wasserentnahmen

Für ein umfassendes und integriertes Wassermanagement werden verlässliche Daten zu Wasserentnahmen und -verbräuchen benötigt. Dies gilt sowohl für Wasserentnahmen durch Individuen als auch durch Großverbraucher. Auf Basis dieser Daten könnten beispielsweise Handlungsspielräume in Dürreperioden identifiziert werden. Neue Wege der Informationsbereitstellung könnten Transparenz schaffen und das Verhalten von Verbraucher/innen beeinflussen [20]. Allerdings fehlt es bisher zumindest in bestimmten Sektoren (z. B. Landwirtschaft) und Bundesländern an Daten zur Wasserentnahme [7]. Auch digitale Zwillinge ganzer Städte können helfen, Wasserverbräuche genauer nachzuverfolgen, zu bewerten und anzupassen. Während ein Modellprojekt in Gelsenkirchen den Fokus auf öffentliche Gebäude legt, wo neben Strom- und Wärme- auch Wasserverbrauchsdaten mittels Sensoren erhoben und abgebildet werden, hat die Stadt Bochum ein Gründachkataster angelegt. Damit können beispielsweise eingesparte Abwassermengen abgeschätzt werden. In einem weiteren Projekt werden die Wasserbedarfe von Stadtbäumen in Abhängigkeit von Bewässerung und Witterung abgebildet [21]. Für eine breite Erfassung von Wasserverbräuchen sind digitale Wasserzähler notwendig, die eine zeitlich hochaufgelöste Ermittlung des Wasserverbrauchs aller Endverbraucher ermöglichen. Da die Integration wasserwirtschaftlicher Daten eine Hürde darstellt [8], sind außerdem eine einheitliche Systematik und die Bereitstellung der Daten über eine zentrale

Plattform erforderlich. Für eine darauf aufbauende Steuerung wäre der rechtliche Rahmen (spezifische Nutzungspriorisierungen für die Wasserentnahme in Trockenzeiten) weiterzuentwickeln [22].

Referenzen

1. TAB (2023): Chancen und Risiken der Digitalisierung kritischer kommunaler Infrastrukturen an den Beispielen der Wasser- und Abfallwirtschaft. Endbericht zum TA-Projekt. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), DOI: [10.5445/IR/1000163177](https://doi.org/10.5445/IR/1000163177)
2. Daniel, I. et al. (2023): A survey of water utilities' digital transformation: drivers, impacts, and enabling technologies. In: npj Clean Water 6(1), S. 1–9, DOI: [10.1038/s41545-023-00265-7](https://doi.org/10.1038/s41545-023-00265-7)
3. Michalak, A. M. et al. (2023): The frontiers of water and sanitation. In: Nature Water 1(1), S. 10–18, DOI: [10.1038/s44221-022-00020-1](https://doi.org/10.1038/s44221-022-00020-1)
4. Hein, A.; Lévai, P. (2023): Wo steht die Wasserversorgung bei der Cloud-Nutzung? Erste Erkenntnisse einer Blitzumfrage unter deutschen Wasserversorgern. www.dvgw.de/ (17.1.2025)
5. Pirsing, A. et al. (2024): Picture of the Future für die digitalisierte Wasserwirtschaft im Jahr 2035. www.innovationsatlas-wasser.de/ (17.1.2025)
6. LAWA (2024): Fokus Wasser – Folgen des Klimawandels und Maßnahmen zur Anpassung. Beispiele und Lösungsansätze für Wechselwirkungen zwischen Wasserwirtschaft, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Aquakultur und Binnenfischerei. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, Berlin
7. WBGU (2024): Wasser in einer aufgeheizten Welt. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Berlin
8. EPRS (2024): Closing the blue loops: responsible and sustainable innovation in the fields of water and ocean. European Parliamentary Research Service, Luxemburg
9. Kramer, A. (2022): Managing the invisible – Trends in sustainable groundwater development. Trend Observatory on Water, Bern
10. GAO (2023): Artificial Intelligence in Natural Hazard Modeling: Severe Storms, Hurricanes, Floods, and Wildfires. Government Accountability Office, 14.12.2023, www.gao.gov/ (20.12.2024)
11. Thapa, K. K. et al. (2024): Attention-Based Models for Snow-Water Equivalent Prediction. In: Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence 38(21), S. 22969–22975, DOI: [10.1609/aaai.v38i21.30337](https://doi.org/10.1609/aaai.v38i21.30337)
12. Nature Water Editorial (2023): Measuring water from space. In: Nature Water 1(2), S. 123–123, DOI: [10.1038/s44221-023-00042-3](https://doi.org/10.1038/s44221-023-00042-3)

13. ITA; AIT (2022): Fernerkundung mit KI. Foresight und Technikfolgenabschätzung. Monitoring von Zukunftsthemen für das Österreichische Parlament. Institut für Technikfolgenabschätzung; Austrian Institute of Technology, Wien
14. DVGW (2024): Smartes Brunnenbetriebsmanagement. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., www.dvgw.de/ (17.1.2025)
15. Bachmann-Machnik, A. (2020): Optimierung des Betriebs von Kanalnetzen im Mischsystem auf Basis von Online-Messdaten. TU Kaiserslautern, Schriftenreihe Band 7, Kaiserslautern
16. de-hub (2025): The digital course of water. de:hub digital ecosystems, www.de-hub.de/ (21.1.2025)
17. Jungwirth, J. (2023): Die Kompetenzen der kommunalen Unternehmen nutzen, um nachhaltige Stadtentwicklung zu sichern. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Beschleunigter Wandel und Resilienz, Bonn
18. Fraunhofer ENERGIE (2024): Energie / Klima / Umwelt – Wasserinfrastruktursysteme. Fraunhofer-Allianz Energie, 4.10.2024, www.energie.fraunhofer.de/ (4.10.2024)
19. DVGW (2024): TRINK-Predict – Entwicklung anwendungsorientierter Predictive Maintenance Ansätze (DVGW Zukunftsprogramm Wasser – W 202406). Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., www.dvgw.de/ (17.1.2025)
20. FORENV (2022): Synthesis Report: Delivering a zero pollution ambition by 2050 – input towards strategic foresight. www.environment.ec.europa.eu/ (14.2.2025)
21. Schweitzer, E. et al. (Hg.) (2023): Beschleunigter Wandel und Resilienz: Leitlinien für die Entwicklung resilienter Städte im digitalen Zeitalter (Langfassung): Nationale Dialogplattform Smart Cities. Bonn www.smart-city-dialog.de/
22. Flörke, M. et al. (2024): Auswirkung des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit. Anpassung an Trockenheit und Dürre in Deutschland (WAD-Klim). Umweltbundesamt, Texte 143/2024, Dessau-Roßlau

Systemische Risiken und ihre Auswirkungen auf das Infrastruktursystem Wasser

Die Versorgung mit sauberem Trinkwasser ist ein grundlegender Teil der Daseinsvorsorge. Untrennbar damit verbunden sind sowohl die Abwasserbeseitigung und -klärung sowie der Schutz von Gewässern. Das Infrastruktursystem ist entscheidend für die Versorgung der Bevölkerung mit sauberem Wasser, gleichzeitig spielt es eine wichtige Rolle für die Erhaltung der Hygiene und die Krankheitsprävention. Auch Gewerbe und Industrie benötigen Wasser, unter anderem als Betriebsmittel. Darüber hinaus ist eine gute ökologische Wasserqualität wichtig für die Erhaltung der natürlichen Lebensgrundlagen, die Klimaanpassung und den Schutz von Ökosystemen. Systemische Risiken können die Funktionsfähigkeit und Stabilität des Infrastruktursystems Wasser grundlegend beeinträchtigen, vor allem im Hinblick auf das Schutzziel der Versorgungssicherheit. Zudem können sie die Umsetzung notwendiger Maßnahmen zur Klimaanpassung und zum Klimaschutz gefährden.

[Systemische Risiken](#) bezeichnen komplexe Gefahren oder Bedrohungen, die nicht nur auf bestimmte Einzelteile eines Infrastruktursystems wirken, sondern das gesamte System betreffen. Zudem gefährden sie unterschiedliche Infrastruktursysteme oftmals gleichzeitig, da multikausale Wechselwirkungen und Kaskadeneffekte auftreten.

Auf den folgenden Seiten behandeln wir aus der Perspektive der systemischen Risiken die folgenden Fragen: Wie ist der gegenwärtige Stand der Gefährdungslagen für das Infrastruktursystem Wasser mit Bezug auf alle relevanten systemischen Risiken, welche Bereiche des Systembilds sind besonders betroffen und wie robust ist das Infrastruktursystem? Welche systemischen Risiken entwickeln sich besonders dynamisch und mit welchen Folgen für das Infrastruktursystem? Welche Rolle spielen Pfadabhängigkeiten als Risiko bei der Transformation des Infrastruktursystems Wasser?

Status quo der Gefährdungslagen

Gefährdungslagen für das Infrastruktursystem Wasser können sowohl einzelne Teile des Systems als auch das gesamte System

beeinträchtigen. Die aktuelle Gefährdung des Infrastruktursystems durch systemische Risiken ist – auf Grundlage der ausgewerteten Quellen sowie der Ergebnisse der durchgeführten Fachgespräche – insgesamt als eher gering einzustufen. Wetterextreme und globale Erwärmung gefährden jedoch derzeit in vergleichsweise höherem Maße die Funktionsfähigkeit und Stabilität des Infrastruktursystems.

Die Wasserwirtschaft in Deutschland ist dezentral, wenig digitalisiert und hinsichtlich des Wasserdargebots ökologisch noch in einer günstigen Lage. Dadurch sind die aktuellen Gefährdungslagen meistens gering, jedoch wird bei einigen systemischen Risiken ein deutlicher Anstieg erwartet. Um den systemischen Risiken und ihren Folgen zu begegnen, ist die Robustheit des Infrastruktursystems entscheidend, d.h. der Grad, zu dem es für den Fall des Eintretens der Risiken vorbereitet und widerstandsfähig ist. Die Gesamtrobustheit des gegenwärtigen Infrastruktursystems Wasser wird in unserer Befragung im Rahmen des Resilienz-Radars derzeit als mittel eingeschätzt. Es gibt jedoch Unterschiede zwischen den einzelnen Risiken. Aufkommende Störereignisse und Krisen müssen frühzeitig erkannt und die vorhandenen Erkenntnisse zur Entwicklung innovativer Maßnahmen und zur Steigerung der Resilienz genutzt werden.

Das Infrastruktursystem Wasser wird durch systemische Klima- und Umweltrisiken, insbesondere durch die globale Erwärmung und die damit verbundenen **Wetterextreme**, derzeit in einem mittleren Ausmaß gefährdet. Veränderungen in der Niederschlagsverteilung haben weitreichende Folgen für das Wassersystem, sowohl für den Bereich der Trinkwasserversorgung als auch für den Bereich der Abwasserbeseitigung. Bei Starkregen ist die Entwässerungsinfrastruktur teilweise nicht ausreichend dimensioniert und daher überfordert, die großen Mengen Wasser abzuführen, was immer wieder zu lokalen Überflutungen führt.

Abwasseraufbereitungsanlagen können ebenfalls überlastet werden, mit der Folge, dass unbehandeltes Abwasser in Gewässer eingeleitet wird [1][2]. Großräumige Hochwasserereignisse können Rohrleitungsnetze und Anlagen beschädigen [1][3]. Zudem beeinträchtigen Hochwasser, Abschwemmung und Erosion die Wasserqualität, beispielsweise durch den Eintrag von Nährstoffen und Pflanzenschutzmitteln oder Krankheitserregern ins Oberflächengewässer und Grundwasser [1][4][5].

Dürren und Trockenperioden können aktuell die Gewinnung von Wasser im Teilbereich der Trinkwasserversorgung lokal gefährden. In heißen Sommern fallen Trockenperioden mit Wasserbedarfsspitzen

zusammen, während der Wasserbedarf, etwa für Hitzeschutz und Bewässerung, insgesamt steigt [6][7]. In den letzten Jahren kam es vereinzelt zu Engpässen in der Trinkwasserversorgung, die Versorgungssicherheit konnte jedoch weitgehend aufrechterhalten werden [8]. Auch die Abwasserbeseitigung ist in heißen und trockenen Sommern betroffen: Durch die unveränderte Einleitung von Schadstofffrachten bei geringem Wasserstand steigen die Konzentrationen in den Gewässern, was die Wasserqualität beeinträchtigt [7][2]. Zudem nehmen die Konzentrationen anderer Stoffe im Wasser bei niedrigen Wasserständen während Trockenperioden zu [2].

Die **globale Erwärmung** wirkt sich durch die im Mittel steigenden Temperaturen auch direkt auf das Infrastruktursystem Wasser aus. Temperaturveränderungen beeinflussen die Wasserqualität und damit die Gewinnung und Aufbereitung von Trinkwasser: Höhere Wassertemperaturen begünstigen die Eutrophierung und verstärken damit verbundene ökologische Folgen wie das übermäßige Wachstum von Algen und Wasserpflanzen. Zugleich verschlechtern sie die physikalisch-chemische und mikrobiologische Wasserbeschaffenheit [2][9]. Auch der Bereich der Verteilung ist betroffen, da höhere Temperaturen in Leitungssystemen die Keimbildung begünstigen können [2]. Zudem steigen die Anforderungen an Abwasseraufbereitungsanlagen und Probleme wie Geruchsbildung können sich verschärfen [7][2].

Das Infrastruktursystem Wasser ist aufgrund des derzeit noch geringen Digitalisierungsgrads der Wasserversorgung nur in geringem Maße durch **Cyberkriminalität** sowie durch **Technikversagen und eingeschränkte Technikbeherrschbarkeit** gefährdet. Digitale Lösungen werden in der Trinkwasserversorgung und der Abwasserbeseitigung unter anderem für Mess- und Analysensysteme, Anlagensteuerungsprozesse, Datenmanagement, Verwaltung und Kundendienste eingesetzt. Dadurch ergibt sich prinzipiell eine Gefährdungslage im Hinblick auf Cyberangriffe, die diese Prozesse beeinträchtigen können. Einige Cyberangriffe zielen auf die Manipulation technischer Systeme wie Anlagen und Steuerungsprozesse ab [10][4][7]. Ein weiteres Angriffsziel ist die große Menge sensibler Daten, die von Wasserversorgungs- und Abwasserbetrieben verwaltet werden [4][7]. Abwasserbetriebe verfügen über private Verbrauchsdaten (z.B. Wasserverbrauch, Anzahl von Wohneinheiten), während Wasserversorgungsunternehmen zunehmend intelligente Messsysteme einsetzen, die Verbräuche erheben.

Umfangreiche Datenschutzmaßnahmen sind daher zentral [7]. Ein konkretes Beispiel für einen direkten Angriff auf den Wassersektor ist der Cyberangriff auf American Water, eines der größten Wasser- und Abwasserversorgungsunternehmen in den USA. Im Oktober 2024 wurden dabei die Computernetzwerke des Unternehmens infiltriert, was unter anderem zur Abschaltung des Kundenportals führte [11]. In einem anderen Fall im Januar 2024 in Texas wurden durch einen Cyberangriff für ca. 45 Minuten Wassertanks zum Überlaufen gebracht [11]. In Deutschland kamen im Jahr 2024 von insgesamt 726 Meldungen zu Cyberangriffen aus den KRITIS-Sektoren an das Bundesamt für Informationssicherheit 22 Meldungen aus dem Sektor Wasser (2023 waren es 16 von 490) [12][13]. Neben Cyberangriffen können in digital gesteuerten Systemen auch IT-Störungen, z.B. der Regel- und Messtechnik, eine erhebliche Gefährdung darstellen. Ein Störfall bei der Abwassereinleitung könnte sowohl die Gewässerqualität beeinträchtigen als auch in Einzugsgebieten von Trinkwassergewinnungsanlagen direkte Konsequenzen für die Trinkwasserversorgung haben [7]. Finanzierungsengpässe bei gleichzeitig hohem Wartungs- und Modernisierungsbedarf können zur Verstärkung der Gefährdungslage sowohl durch Technikversagen als auch Cyberkriminalität beitragen.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines flächendeckenden und langandauernden Blackouts in Deutschland ist derzeit gering [14][15]. Sollte es jedoch zu einer solchen Unterbrechung der Stromversorgung kommen, besteht für das Infrastruktursystem Wasser eine akute Gefährdungslage, da die Trinkwasserversorgung von der Stromversorgung abhängig ist. Strom wird für unterschiedliche Teile des Systems benötigt, z.B. Pumpen und Druckerhöhungsanlagen [1]. Die häusliche Abwasserentsorgung wiederum hängt von der Wasserversorgung ab und wäre im Fall einer Unterbrechung daher auch gefährdet [1]. Zudem ist infolge zusätzlicher Schritte in der Abwasseraufbereitung sowie strengerer Grenzwerte beim Trinkwasser mit einem höheren Energiebedarf für die Abwasserreinigung und Trinkwasseraufbereitung zu rechnen – und damit auch mit einer zunehmenden Abhängigkeit von einer zuverlässigen Energieversorgung [16].

Hinsichtlich **geopolitischer Konflikte** und **Versorgungsengpässe** bei Energie und kritischen Rohstoffen ist die Gefährdungslage für das Infrastruktursystem Wasser aktuell gering. Deutschland verfügt derzeit insgesamt über ausreichende Trinkwasserreserven und ist nicht auf den Import von Wasser angewiesen. Internationale Abhängigkeiten

bestehen jedoch bei notwendigen Betriebsmitteln, deren Verfügbarkeit durch geopolitische Konflikte beeinträchtigt werden kann (BMUV 2023). Der russische Angriffskrieg auf die Ukraine hatte beispielsweise Auswirkungen auf die Verfügbarkeit von Betriebsmitteln – etwa Fäll- und Flockungsmitteln – für die Trinkwasseraufbereitung und Abwasserbehandlung. Dies führte temporär zu Lieferkettenengpässen, auf die Kläranlagen und Wasserwerke aufgrund unzureichender Lagerhaltung nicht ausreichend vorbereitet waren [4]. Eine weitere Gefahr sind terroristische Anschläge oder Handlungen in kriegerischen Auseinandersetzungen, die auf die physische Beschädigung oder Zerstörung von Wasserinfrastruktur abzielen, beispielsweise des Verteilungsnetzes oder Aufbereitungsanlagen. Faktisch gab es in der Vergangenheit bereits konkrete Drohungen, toxische Substanzen in das Wassersystem einzuführen [1]. Die Dezentralität des deutschen Wasserinfrastruktursystems reduziert die potenziellen Schadwirkungen jedoch auf räumlich eng begrenzte Gebiete.

Die Gefährdung des Infrastruktursystems Wasser infolge von **Biodiversitätsverlusten** ist derzeit in Deutschland gering und betrifft primär die Gewinnung von Trinkwasser. Der Verlust von Biodiversität gefährdet Ökosystemdienstleistungen: Biodiversität in Gewässern leistet einen wichtigen Beitrag zur Wasserqualität und hohe Bodenbiodiversität trägt zu einer hohen Wasserspeicherkapazität bei [4][17]. Zudem wird die Grundwasserneubildung durch Bodendegeneration, die z.B. Erosion aber auch Verluste der Biodiversität umfasst, beeinträchtigt [4]. Umgekehrt sind ökologisch intakte Gewässer sehr wichtig für Biodiversität [2][17].

Die durch **Epidemien und Pandemien** verursachte Gefährdungslage für das Infrastruktursystem Wasser ist in Deutschland aktuell als gering einzuschätzen. Der Umgang mit pathogenen Keimen ist eine Kernaufgabe der Abwasserbehandlung und Trinkwasseraufbereitung, Monitoring und Desinfektion sind wichtige Bestandteile des Prozesses [10][4]. Auch die Dezentralität des Infrastruktursystems reduziert in Deutschland das Ausmaß der Schadwirkungen. Pandemien und Epidemien können eine Verschiebung der Wassernachfragemuster bewirken. Während der COVID-19 Pandemie wurde beispielsweise in Norddeutschland von Haushalten ca. 14,3% mehr Wasser am Tag nachgefragt, mit veränderten Nachfragespitzen über den Tag. Veränderungen der Wassernachfrage können herausfordernd für die Planung und Dimensionierung der Verteilungsinfrastruktur sein [18]. Abwassersysteme können ihrerseits einen Einfluss auf Pandemien und

Epidemien haben, indem sie z.B. zur Verbreitung von antimikrobiellen Resistenzen beitragen [10][7][4].

Mit Blick auf Deutschland ist die Gefährdungslage durch **Machtkonzentrationen** für das Infrastruktursystem Wasser derzeit gering. Die Wasserwirtschaft ist stark reguliert und es dominieren öffentlich-rechtliche sowie kleine Unternehmen [10]. Durch die Abhängigkeit von digitalen Technologien sind Unternehmen der Trinkwasserversorgung und Abwasserbeseitigung jedoch mittelbar durch Machtkonzentrationen in digitalen Geschäftsfeldern betroffen.

Aktuell besteht keine unmittelbare Gefährdungslage für das Infrastruktursystem Wasser infolge gesellschaftlicher **Polarisierung**. Langfristig kann Polarisierung jedoch die Leistungsfähigkeit des Systems beeinträchtigen, indem sie zu einer Fragmentierung der politischen Willensbildung führt und konsensorientierte, strategische Entscheidungen erschwert. Besonders betroffen sind Investitionen in langfristige Vorsorgemaßnahmen, etwa den klimaresilienten Ausbau der Wasserinfrastruktur oder den Schutz ökologischer Funktionen. In einem polarisierten gesellschaftlichen Klima steigt somit das Risiko, dass notwendige Anpassungsprozesse verzögert oder verhindert werden, wodurch die systemische Verwundbarkeit beispielsweise gegenüber Umweltveränderungen zunimmt.

Einschätzung der Robustheit

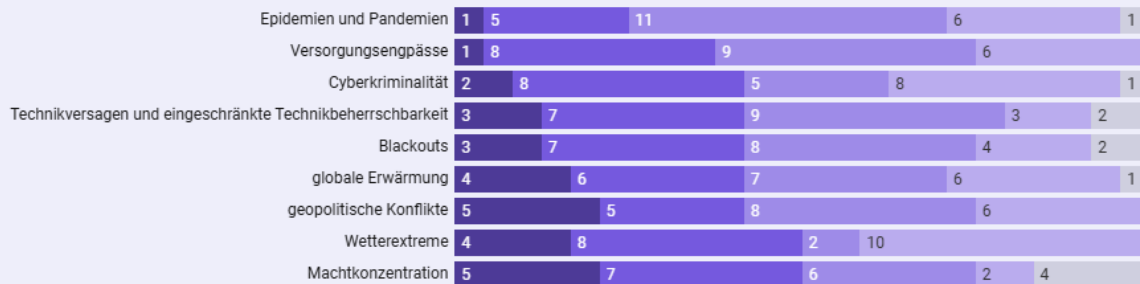
Die Robustheit des Infrastruktursystems Wasser im Status quo gegenüber systemischen Risiken wurde im Rahmen einer Expert/innenbefragung bewertet. Robustheit beschreibt die Widerstandsfähigkeit eines Systems gegenüber externen Störungen, während die Gefährdungslage den aktuellen Grad der Bedrohung durch ein konkretes Risiko bezeichnet. Im Kontext systemischer Risiken bedeutet dies, dass ein System trotz hoher Gefährdungslage robust sein kann – oder umgekehrt, dass eine geringe Gefährdungslage ein nicht-robustes System trotzdem anfällig machen kann.

Die Gesamtbewertung der Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung über alle systemischen Risiken liegt bei einer mittleren Robustheit. Bei der Bewertung einzelner systemischer Risiken zeigen sich jedoch deutliche Unterschiede. Insbesondere wird die Robustheit gegenüber **Biodiversitätsverlust** und **gesellschaftlicher Polarisierung** von etwa zwei Dritteln der Expert/innen als gering oder eher gering eingeschätzt. Beinahe zwei Drittel der Befragten schätzen die

Robustheit gegenüber **Versorgungsengpässen**, etwas über zwei Drittel die Robustheit gegenüber **Pandemien und Epidemien** als hoch oder eher hoch ein.

Wie schätzen Sie derzeit den Grad der Robustheit des Infrastruktursystems Wasser in Bezug auf die folgenden systemischen Risiken ein?

■ gering ■ eher gering ■ eher hoch ■ hoch ■ keine Angabe



Ergebnisse der Expert/innenbefragung (n=24)

Source: TAB, Resilienz-Radar 2024/25 · Created with Datawrapper

Referenzen

1. BBK (2019): Sicherheit der Trinkwasserversorgung. Risikoanalyse. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Bonn
2. UBA (2021b): Climate Impact and Risk Assessment 2021 for Germany. Summary. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
3. IWARU (2023): Klimawandel – Trockenheit und Starkregen im urbanen Raum. Tagungsband der 7. Wassertage Münster 2023. Institut für Infrastruktur Wasser Ressourcen Umwelt, Münster
4. BMUV (2023): Nationale Wasserstrategie – Kabinettsbeschluss vom 15. März 2023. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, Berlin
5. Derx, J. et al. (2021): Genetic Microbial Source Tracking Support QMRA Modeling for a Riverine Wetland Drinking Water Resource. In: Frontiers in microbiology 12, S. 668778, [DOI: 10.3389/fmicb.2021.668778](https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.668778)
6. Köster, S.; Beier, M. (2023): Wasser in der Stadt. Leibniz Universität Hannover, Hannover
7. IWW et al. (2019): Analyse zum Stand und zur Entwicklung der Wasserwirtschaft in NRW. Institut für Wasserforschung gGmbH, Mülheim an der Ruhr
8. DVGW (2023): Resilienz und Versorgungssicherheit der öffentlichen Wasserversorgung. Ergebnisse der DVGW Online-Umfrage 2022. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Bonn
9. TZW: DVGW; IWW (2024): KLIWAQ – Wie wirkt sich der Klimawandel auf die Qualität von Wasserressourcen aus? Deutscher Verein des Gas-

- und Wasserfachs: Technologiezentrum Wasser; IWW Institut für Wasserforschung gGmbH, Karlsruhe
10. TAB (2023): Chancen und Risiken der Digitalisierung kritischer kommunaler Infrastrukturen an den Beispielen der Wasser- und Abfallwirtschaft. Endbericht zum TA-Projekt. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, Berlin
 11. Kerner, S. M. (2024): The American Water Cyberattack: Explaining how it happened. TechTarget, 18.7.2024, www.techtarget.com/
 12. BSI (2024): Die Lage der IT-Sicherheit in Deutschland 2024. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, Bonn
 13. BSI (2023): Die Lage der IT-Sicherheit in Deutschland. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, Bonn
 14. Bundesregierung (2025): Stromausfall – eine Risikoanalyse. www.bundesregierung.de/ (4.7.2025)
 15. Bundesnetzagentur (2025): Droht der Blackout? Über die Stromversorgung in Deutschland. www.bundesnetzagentur.de/ (4.7.2025)
 16. DVGW; DWA (2023): Roadmap 2030. Handlungsagenda für die Zukunft der Wasserwirtschaft. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Bonn
 17. Weitere, M. et al. (2020): Wasserqualität und Biodiversität – eine enge wechselseitige Beziehung. In: Kandarr, J. et al. (Hg.): Biodiversität im Meer und an Land. Vom Wert biologischer Vielfalt. Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam, S. 54-57, [DOI: 10.2312/eskp.2020.1.2.4](https://doi.org/10.2312/eskp.2020.1.2.4)
 18. Lüdtke, D. U. et al. (2021): Increase in Daily Household Water Demand during the First Wave of the Covid-19 Pandemic in Germany. In: Water 13(3), S. 260, [DOI: 10.3390/w13030260](https://doi.org/10.3390/w13030260)

Entwicklungsdynamiken ausgewählter systemischer Risiken und Gefährdungslagen

Systemische Risiken unterliegen einer zum Teil starken Entwicklungsdynamik. Sowohl die Eintrittswahrscheinlichkeit als auch die konkrete Form der durch sie ausgelösten Gefährdungslagen für das Infrastruktursystem Wasser können sich verändern. Die globale Erwärmung, häufigere Wetterextreme, der fortschreitende Verlust der Biodiversität, die weltweit zunehmende Cyberkriminalität sowie Technikversagen und eingeschränkte Technikbeherrschbarkeit gewinnen – wie im Folgenden erläutert – an Dynamik und verschärfen die Gefährdungslage für das Infrastruktursystem Wasser.

Zu den sich dynamisch entwickelnden Risikofaktoren für die Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung in Deutschland zählen **Wetterextreme**, insbesondere Veränderungen der Niederschlagsverteilung. Sowohl Anzahl als auch Intensität von Starkregenereignissen, Überschwemmungen, Dürren und Hitzewellen nehmen zu, und dies auch in Gebieten, in denen sie bislang wenig vorkamen. Beispielsweise sind in Hamburg vor 1994 mindestens zwei Wochen andauernde Hitzeperioden mit einem Tagesmaximum von jeweils mindestens 30 Grad nicht vorgekommen, seit 1994 jedoch bereits sieben Mal [\[1\]](#).

Starkregen und resultierende Hochwasserereignisse stellen eine Gefährdung für das Rohrleitungsnetz dar. Die Überflutung von Aufbereitungsanlagen und Pumpstationen kann deren Ausfall verursachen und damit Versorgungsunterbrechungen nach sich ziehen. Im Zuge des Ahrtal-Hochwassers im Jahr 2021 wurden beispielsweise Gewinnungs- und Leitungsanlagen der Wasserversorgung über mehrere Kilometer zerstört. Auch die Stromversorgung war an vielen Orten unterbrochen und konnte selbst durch Notstromaggregate nicht aufrechterhalten werden [\[2\]](#). Ähnliche Auswirkungen gab es bereits bei früheren Hochwasserereignissen, beispielsweise 2002 in Dresden sowie 2013 in Dresden und Passau, als Anlagen abgeschaltet und die Wasserversorgung unterbrochen wurde [\[13\]](#).

Hochwasser wirkt sich einerseits auf das Infrastruktursystem Wasser aus, andererseits bestimmen die Ausgestaltung und Dimensionierung des Infrastruktursystems selbst den Verlauf von Hochwasserereignissen mit: Reguläre Niederschlagsmengen werden in Siedlungsgebieten zum Großteil über das Kanalnetz abgeführt. Bei starken Niederschlägen reichen die vorhandenen Einlauföffnungen in versiegelten Flächen jedoch oft nicht mehr aus, was zu urbanen Sturzfluten und Überschwemmungen von Straßen sowie Wohn- und Geschäftsgebäuden führt [\[4\]\[5\]](#). Das steigende Überflutungsrisiko durch die Zunahme von Starkregenereignissen wird durch die zunehmende Bodenversiegelung verstärkt [\[6\]\[7\]\[4\]](#). Wenn der Niederschlag die Infiltrationsrate so weit übersteigt, dass weder Gewässerläufe noch die Kanalisation bzw. Entwässerungssysteme das Wasser vollständig aufnehmen können, kommt es auch bei unversiegelten Flächen zu unkontrolliertem Oberflächenabfluss. Die Zunahme von Starkregenereignissen wirft die Frage auf, welche Dimensionierung und Gestaltung der Kanalsysteme für Regenwasser in Zukunft angemessen ist [\[5\]\[8\]](#).

Die kurz- und mittelfristig zunehmenden Starkregen- und Hochwasserereignisse gefährden die Wasserversorgung auch durch eine Beeinträchtigung der Wasserqualität. Durch Abschwemmung, Oberflächenabfluss und Drainage können Stoffeinträge wie Nährstoffe und Pflanzenschutzmittel sowohl in Oberflächengewässer und Talsperren als auch, beispielsweise über überflutete Brunnenschächte, ins Grundwasser gelangen [\[4\]\[2\]\[9\]](#). Rohrbrüche durch Unterspülungen können dazu führen, dass Verunreinigungen ins Trinkwassernetz gelangen und die hygienische Qualität des Wassers beeinträchtigen [\[2\]](#). Der gegenläufige Effekt, dass ein hoher Wasserstand durch Verdünnung zu einer geringeren Nähr- und Schadstoffkonzentration führt, existiert auch, aber Studien zeigen beispielsweise für Phosphor, dass der Gesamteffekt von Starkregen eher eine Erhöhung der Phosphorkonzentration ist [\[10\]](#). In etwa der Hälfte der von van Vliet et al. analysierten internationalen Fallstudien [\[9\]](#) führten Starkregenereignisse und Hochwasser zu einer Verunreinigung von Flüssen. Dies kann zu einer hohen Nährstoffkonzentration bzw. zur Eutrophierung von Gewässern führen, so dass deren biologisches Gleichgewicht gestört ist [\[9\]](#). Auch Hochwasserschäden an Objekten, die schädliche Stoffe beinhalten, wie beispielsweise Heizöltanks, Autos oder Pestizidvorräte von Landwirten, können zu Einträgen in Gewässern führen. Werden Kanalsysteme überlastet oder Kläranlagen überschwemmt, gelangt ungeklärtes Abwasser in die Umwelt und führt zu Wasserverunreinigungen, wodurch Krankheitserreger in Gewässer gelangen können [\[2\]\[11\]](#). Auch Erreger tierischer Herkunft können aus Verunreinigungen im Boden, die durch Regen oder Überflutung gelöst werden, in Trinkwasserquellen gelangen [\[11\]](#). In Mischsystemen, in denen Schmutzwasser z.B. aus Haushalten und Regenwasser gemeinsam in einem Kanal abgeleitet werden, kommt es bei Starkregen regelmäßig zur Einleitung von ungeklärtem Mischwasser in Gewässer: sogenannte Mischwasserentlastung. Durch die Zunahme von Starkregenereignissen ist damit zu rechnen, dass die stoffliche Belastung der Gewässer und hierdurch auch der Wasserversorgung steigt [\[5\]](#).

Auch die Gefährdung des Infrastruktursystems Wasser durch das Ausbleiben von Niederschlag, d.h. durch anhaltende Trockenheit und Dürreperioden, nimmt zu. Im deutschlandweiten Durchschnitt wird weiterhin von einem ausreichenden Wasserdargebot ausgegangen, regional und saisonal werden aber aufgrund zunehmender Dürren und anhaltender Trockenheitsperioden Wasserknappheiten erwartet [\[12\]\[13\]\[7\]\[14\]](#). Zunehmende Wasserknappheiten durch das Ausbleiben von Niederschlag sind von hoher Relevanz für die

Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung. Langanhaltende Trockenperioden führen zu Niedrigwasser oder dem Austrocknen von Gewässern sowie zum temporären Absinken von Grundwasserständen [\[15\]\[14\]](#). Die weiter steigende Bodenversiegelung trägt dazu bei, dass in Niederschlagsperioden weniger Versickerung stattfindet und Grundwasservorräte weniger gut aufgefüllt werden können, existierender Gewässerausbau und Drainagen wirken teilweise der Wasserrückhaltung entgegen [\[5\]\[16\]\[4\]](#). Zudem tragen steigende Spitzenbedarfe in der Wassernachfrage zu Engpässen bei [\[13\]\[14\]](#). In den vergangenen Jahren konnte die Versorgungssicherheit mit Trinkwasser auch in Engpasssituationen gewährleistet werden, in vielen Versorgungsgebieten wurde jedoch während Hitzeperioden eine hohe Auslastung des Systems verzeichnet [\[13\]](#). Das Ende der Braunkohleförderung, beispielsweise in der Lausitz, kann Engpässe in der Trinkwasserversorgung verschärfen, da weniger Grundwasser in Flüsse gepumpt wird und deren Wasserführung zurückgehen wird [\[17\]](#). Für die Spree ist ein Rückgang der Wasserführung bis hin zu einem abschnittswisen Trockenfallen in Trockenperioden zu rechnen, was für die auf einen höheren Pegel der Spree ausgelegte Trinkwasserversorgung sowie Abwasserbeseitigung große Herausforderungen birgt, auch weil in der Region Berlin mit einem wachsenden Wasserbedarf gerechnet wird [\[17\]](#). Im Bereich der Abwasserentsorgung besteht dabei die Gefahr, dass bei niedrigen Wasserständen die ausreichende Verdünnung von Abwässern nicht mehr ausreichend gewährleistet werden kann [\[17\]](#).

Dürren und Trockenperioden sowie Hitzewellen können nicht nur Wasserknappheiten auslösen, sondern auch die Wasserqualität belasten. In etwa zwei Drittel der von van Vliet et al. untersuchten Fallstudien [\[9\]](#) verringert sich die Wasserqualität durch Dürren und Trockenperioden sowie Hitzewellen. Bei gleichbleibender Belastung durch Schadstoffeinträge führt ein Rückgang der Wasserstände zu einer reduzierten Verdünnungskapazität, was in einer erhöhten Konzentration von Schadstoffen resultiert und somit die chemische und ökologische Qualität von Gewässern beeinträchtigt [\[18\]](#). Durch die Kombination von Dürren und Hitzewellen steigt das Risiko für Algenblüten, verbunden mit negativen Folgen für die Qualität von Gewässern [\[9\]](#). Die Kombination von Trockenperioden mit nachfolgenden Regenfällen birgt ebenfalls Risiken für die Wasserqualität, da es zu verstärkten Stoffeinträgen durch Abschwemmung kommen kann, beispielsweise im Fall von Phosphor [\[10\]](#). Auch im Abwassersystem kommt es durch Dürren und Trockenperioden sowie Hitzewellen teilweise zu Problemen: Bei

Mischwasserkanälen, in denen Schmutz- und Regenwasser gemeinsam abgeleitet werden, kann es bei zeitweise ausbleibendem Niederschlag durch geringe Abwassermengen und Fließgeschwindigkeiten zu Geruchsbildung, Bakterienwachstum und Korrosion kommen [5].

Die **globale Erwärmung** wirkt sich nicht nur über die häufiger auftretenden Wetterextreme, sondern auch direkt durch sich verändernde Temperaturen auf das Infrastruktursystem Wasser aus. Die im Mittel steigenden Luft- und Bodentemperaturen gehen mit einem Anstieg der Wassertemperatur von Oberflächengewässern einher und führen langfristig zu einer höheren Grundwassertemperatur. Höhere Wassertemperaturen begünstigen biologische Umsetzungsprozesse und fördern eine übermäßige und unnatürliche Ansammlung von Nährstoffen [18][19], die wiederum Methanbildung in Gewässern fördert, welches bei Emission durch die hohe Treibhauswirkung erheblich zum Klimawandel beiträgt [4]. Erhöhte Temperaturen können zudem die Keimbildung in Wasserleitungen unterstützen und dadurch die Wasserqualität gefährden [18]. Eine Befragung von Wasserversorgern in Deutschland zeigt, dass zwar stellenweise bereits Veränderungen der Wassertemperatur und -qualität beobachtet werden, dass aber die Gefährdung der Wasserqualität in der Wahrnehmung bisher eine deutlich geringere Rolle spielt als die Gefährdung der Wasserquantität [20]. Durch klimatische Veränderungen wandelt sich auch die Wassernachfrage. Dies gilt nicht nur für Spitzenbedarfe in akuten Dürrephasen. Auch eine Verschiebung von Niederschlägen hin zu den Wintermonaten und wärmere, trockenere Sommer können zu einem Anstieg der Wassernachfrage beitragen, beispielsweise ist mit einer Erhöhung der Nachfrage von Haushalten und Gewerben sowie für Freizeitaktivitäten zu rechnen [5]. Zudem steigt auch in der Landwirtschaft der Bewässerungsbedarf, der in Deutschland bisher vergleichsweise gering ist, voraussichtlich weiter an, in manchen Regionen möglicherweise um ein Vielfaches: Prognosen zufolge könnte er beispielsweise in Nordrhein-Westfalen bis ins Jahr 2100 um das 20-fache steigen [4].

Indirekte Effekte der globalen Erwärmung wirken sich ebenfalls auf die Wasserqualität aus. So kann Waldsterben in den Einzugsgebieten von Talsperren die Wasserqualität erheblich verschlechtern, da die Wälder ihre Funktion als natürlicher Filter und Nährstoffpuffer verlieren. Dies ist beispielsweise für die Rapbodeltalsperre im Ostharz, die größte Trinkwassertalsperre Deutschlands, relevant, da 50% des umliegenden Waldes in den letzten Jahren abgestorben sind [21]. Ein weiteres

Beispiel für indirekte Effekte sind steigende Meeresspiegel, die zu einer Versalzung von Grundwasser in Küstennähe führen können [\[18\]](#).

Im Zusammenhang und in Wechselwirkung mit der globalen Erwärmung stehen die weiter zunehmenden **Biodiversitätsverluste**, die in Deutschland Gewässer und Auenlandschaften besonders betreffen [\[22\]](#). Durch die abnehmende Biodiversität werden Ökosystemdienstleistungen, wie die Selbstreinigung von Gewässern, zunehmend gefährdet. Unterschiedliche Arten, Tiere, Pflanzen und Mikroorganismen tragen zur Selbstreinigung von Gewässern bei: Sie filtern und bauen Algen, Pflanzenreste, organische Verunreinigungen und Schadstoffe ab und verhindern eine übermäßige Ausbreitung von Bakterien und Krankheitserregern. Dies gilt analog für Arten im Grundwasser und deren Grundwasserreinigungsfunktion. Nimmt die Selbstreinigung der Gewässer ab, leidet die Wasserqualität und die Trinkwassergewinnung wird erschwert [\[23\]\[22\]](#). Die zunehmende globale Erwärmung und steigende Wetterextreme machen Ökosystemdienstleistungen, die auch bei Veränderungen wirksam bleiben, besonders wertvoll: Pflanzen in Auenlandschaften und Fließgewässern tragen beispielsweise dazu bei, Gewässer widerstandsfähiger gegenüber Hochwasser und Überschwemmungen zu machen, indem sie die Wasserqualität durch verbesserte Reinigung sowie die Filtrierung und den Rückhalt von stickstoffhaltigen Partikeln fördern [\[22\]](#). Zudem bieten sie Erosionsschutz [\[22\]](#) (Wirth et al. 2024). Zunehmende Biodiversitätsverluste werden einerseits Gewässer immer stärker belasten, umgekehrt sind ökologisch intakte Gewässer und Vermeidung von Eutrophierung aber auch sehr wichtig für die Biodiversität [\[24\]\[23\]](#).

Eine weitere Entwicklungsdynamik ist durch die zunehmende Digitalisierung des Infrastruktursystems Wasser in nahezu allen Bereichen geprägt, wodurch sich die Angriffsfläche für **Cyberkriminalität** in der Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung erhöht. Darüber hinaus tragen die Professionalisierung von Cyberkriminalität sowie zunehmende geopolitische Konflikte zur dynamischen Entwicklung dieses systemischen Risikos bei [\[19\]](#). Neben einem erwarteten Anstieg direkter Angriffe auf das Infrastruktursystem steigt auch die Bedrohung durch indirekte Angriffe, insbesondere auf IT-Dienstleistungen sowie Hard- und Softwareprodukte von Drittanbietern. Dies ist ein zentraler Aspekt, da die Betreiber von wasserwirtschaftlichen Anlagen hinsichtlich der Sicherheit der Komponenten stark von den Herstellern von Hard- und Softwarekomponenten abhängig sind [\[19\]](#). Mit dem

zunehmenden Einsatz smarter Wasserverbrauchs-Messsysteme nehmen auch die Möglichkeiten für Datendiebstahl oder Datenmanipulation zu [\[19\]\[5\]](#). Vor allem im Zusammenhang mit staatlichen Akteuren ist auch das Pre-Positioning ein neues Bedrohungsszenario, d.h. Cyberkriminelle verschaffen sich Zugang zu internen IT- oder OT-Netzen, nutzen diesen Zugang aber zunächst nicht zur Manipulation oder Erpressung, sondern warten dort unbemerkt ab. Im Fall eines Konfliktes kann der Zugang für kriegerische Handlungen genutzt werden [\[25\]](#).

Die zunehmende Konvergenz von digitalen Netzwerken für OT (operative Technologie für Anlagensteuerung etc.) und Büro-IT (für Verwaltung etc.) stellt eine weitere Angriffsfläche in Wasserinfrastrukturen dar. Es gibt immer mehr Schnittstellen, beispielsweise um Sicherheitsupdates über das Internet durchzuführen oder Daten zu übertragen [\[19\]](#). Angriffe über das Internet könnten sich so beispielsweise direkt auf technische Anlagen auswirken. Darüber hinaus sind Sicherheitsmaßnahmen nur teilweise von Büro-IT auf OT übertragbar, so dass für beide Bereiche jeweils spezifische Maßnahmen und Fachwissen benötigt werden. Zudem sind die Lebenszyklen von OT-Komponenten teilweise lang (bis zu 20 Jahren), was dazu führt, dass Altsysteme in Betrieb sind, die einerseits nicht über aktuelle Sicherheitsmechanismen verfügen und andererseits ungenügendes Fachwissen zur Wartung der alten Komponenten vorhanden ist [\[26\]\[19\]](#).

Im Zuge der Digitalisierung werden zwar auch Maßnahmen zur Cybersicherheit ergriffen, ob diese jedoch für die steigenden Bedrohungslagen in der Fläche ausreichend sind, ist offen. Der Grad der Digitalisierung ist bei größeren wasserwirtschaftlichen Unternehmen höher, gleichzeitig fällt es ihnen strukturell leichter, umfassende Vorkehrungen gegen Cyberkriminalität zu treffen [\[19\]](#). Kleinere Unternehmen haben weniger Ressourcen, um starke Cybersicherheitsvorkehrungen zu planen und umzusetzen; sie fallen nicht unter die KRITIS-Vorschriften, machen aber gleichzeitig den Großteil der Wasserversorgungsunternehmen in Deutschland aus. Während ein erfolgreicher Angriff auf ein einzelnes kleines Unternehmen in der Regel nur begrenzte Schadwirkungen hat, stellt ein gleichzeitiger Angriff auf viele kleine Unternehmen ein systemisch relevantes Risiko dar [\[19\]](#). Durch zunehmende digitale Vernetzung sowie im Falle einer Nutzung von gleichen technischen Komponenten oder derselben Software nehmen die Möglichkeiten für solche gleichzeitigen Angriffe zu.

Auch die Gefährdungslage durch das systemische Risiko **Technikversagen und eingeschränkte Technikbeherrschbarkeit** nimmt im Zuge der Digitalisierung des Infrastruktursystems Wasser zu. Die Systemkomplexität steigt durch viele zunehmend vernetzte und in der Fläche verteilten Anlagen, auch in kleinen Unternehmen [\[19\]](#). In OT-Umgebungen findet sich häufig eine breite Vielfalt von Komponenten, die sich hinsichtlich Hersteller, Architektur und Technologiegenerationen unterscheiden [\[19\]](#). Technische Störfälle können entsprechend komplexe Abläufe aufweisen und sich von Teilsystemen auf das Gesamtsystem auswirken – die Gefährdungspotenziale steigen daher. Zudem besteht im zunehmend vernetzten und automatisierten Infrastruktursystem das Risiko sich breiter auswirkender Schadwirkungen durch menschliches Versagen, beispielsweise durch Bedienfehler. Die zunehmende Automatisierung bei der Störfallbehebung kann dazu führen, dass operative und diagnostische Kompetenzen beim Personal sukzessive abnehmen. Dies birgt das Risiko, dass im Falle eines unerwarteten Systemausfalls oder eines erforderlichen manuellen Eingriffs nicht ausreichend qualifiziertes Personal zur Verfügung steht, was die Reaktionsfähigkeit und die Sicherheit des Betriebs beeinträchtigen kann [\[19\]](#). Das Problem mangelnder Kompetenzen wird durch den Fachkräftemangel verschärft, der die Wasserwirtschaft insgesamt betrifft, aber insbesondere relevant ist bei der Suche nach qualifizierten Fachkräften mit Kenntnissen sowohl im wasserfachlichen als auch Informationssicherheitsbereich [\[19\]\[5\]\[27\]](#).

Referenzen

1. DWD; Extremwetterkongress (2024): Was wir 2024 über das Extremwetter in Deutschland wissen. Deutscher Wetterdienst; Extremwetterkongress, Offenbach am Main
2. DVGW (2021): Hochwasserkatastrophe: Große Herausforderungen bei Instandsetzung der Gas- und Trinkwasserversorgung. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Bonn
3. BBK (2019): Sicherheit der Trinkwasserversorgung. Risikoanalyse. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Bonn
4. BMUV (2023): Nationale Wasserstrategie – Kabinettsbeschluss vom 15. März 2023. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, Berlin
5. IWW et al. (2019): Analyse zum Stand und zur Entwicklung der Wasserwirtschaft in NRW. Institut für Wasserforschung gGmbH, Mülheim an der Ruhr
6. UBA (2024b): Bodenversiegelung. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

7. IWARU (2023): Klimawandel – Trockenheit und Starkregen im urbanen Raum. Tagungsband der 7. Wassertage Münster 2023. Institut für Infrastruktur Wasser Ressourcen Umwelt, Münster
8. LAWA (2022): Umgang mit Zielkonflikten bei der Anpassung der Wasserwirtschaft an den Klimawandel. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, München
9. van Vliet, M. T. H. et al. (2023): Global river water quality under climate change and hydroclimatic extremes. In: Nature Reviews Earth & Environment 4(10), S. 687-702, [DOI: 10.1038/s43017-023-00472-3](https://doi.org/10.1038/s43017-023-00472-3)
10. Tilahun, A. B. et al. (2024): Perspectives on total phosphorus response in rivers: Examining the influence of rainfall extremes and post-dry rainfall. In: The Science of the total environment 940, S. 173677, [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.173677](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173677)
11. Derx, J. et al. (2021): Genetic Microbial Source Tracking Support QMRA Modeling for a Riverine Wetland Drinking Water Resource. In: Frontiers in microbiology 12, S. 668778, [DOI: 10.3389/fmicb.2021.668778](https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.668778)
12. DVGW (2022): Auswirkungen des Klimawandels auf das Wasserdargebot Deutschlands. Überblick zu aktuellen Ergebnissen der deutschen Klimaforschung. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Bonn
13. DVGW (2023): Resilienz und Versorgungssicherheit der öffentlichen Wasserversorgung. Ergebnisse der DVGW Online-Umfrage 2022. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Bonn
14. UBA (2024a): Auswirkung des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit. Anpassung an Trockenheit und Dürre in Deutschland (WAD-Klim). Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
15. DVGW; DWA (2023): Roadmap 2030. Handlungsagenda für die Zukunft der Wasserwirtschaft. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Bonn
16. UBA (2024b): Bodenversiegelung. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
17. Uhlmann, W. et al. (2023): Wasserwirtschaftliche Folgen des Braunkohleausstiegs in der Lausitz – Abschlussbericht. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
18. UBA (2021b): Climate Impact and Risk Assessment 2021 for Germany. Summary. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
19. TAB (2023): Chancen und Risiken der Digitalisierung kritischer kommunaler Infrastrukturen an den Beispielen der Wasser- und Abfallwirtschaft. Endbericht zum TA-Projekt. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, Berlin
20. TZW: DVGW; IWW (2024): KLIWAQ – Wie wirkt sich der Klimawandel auf die Qualität von Wasserressourcen aus? Deutscher Verein des Gas-

- und Wasserfachs: Technologiezentrum Wasser; IWW Institut für Wasserforschung gGmbH, Karlsruhe
21. Kong, X. et al. (2022): Reservoir water quality deterioration due to deforestation emphasizes the indirect effects of global change. In: Water Research (221), S. 118721
 22. Wirth, C. et al. (Hg.) (2024): Faktencheck Artenvielfalt. Bestandsaufnahme und Perspektiven für den Erhalt der biologischen Vielfalt in Deutschland: Zusammenfassung für die gesellschaftliche Entscheidungsfindung. München
 23. Weitere, M. et al. (2020): Wasserqualität und Biodiversität – eine enge wechselseitige Beziehung. In: Kandarr, J. et al. (Hg.): Biodiversität im Meer und an Land. Vom Wert biologischer Vielfalt. Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam, S. 54-57, [DOI: 10.2312/eskp.2020.1.2.4](https://doi.org/10.2312/eskp.2020.1.2.4)
 24. UBA (2021a): 20 Jahre Wasserrahmenrichtlinie: Empfehlungen des Umweltbundesamtes. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
 25. Check Point Research (2025): The State of Cyber Security 2025. Top threats, emerging trends, and CISO recommendations. O.O.
 26. World Economic Forum (2025): Global Cybersecurity Outlook 2025. Insight Report. Genf
 27. Schramm, E.; Winker, M. (2023): Transformation der Wasserinfrastruktur im Siedlungsbestand als Herausforderung. Institut für sozial-ökologische Forschung, Frankfurt a.M.

Gefährdungslagen im Zuge der Transformation

Das Infrastruktursystem Wasser steht aktuell vor der Herausforderung, drei wesentliche [Transformationsziele](#) umzusetzen. Erstens bedarf es der Ertüchtigung und Erneuerung der alternden technischen Anlagen zur Sicherung der Versorgungssicherheit, einschließlich ihrer Anpassung an die Anforderungen der Digitalisierung und die Folgen des Klimawandels. Zweitens erfordert die Klimaanpassung gezielte Maßnahmen zur Reduktion des Wasserbedarfs, zur Stärkung des Wasserdargebots, zur Sicherung der Wasserqualität sowie zum Schutz vor Wetterextremen. Drittens ist ein integriertes, sektorübergreifendes Wassermanagement nötig, um konkurrierende Nutzungsansprüche koordiniert zu steuern und komplexe Herausforderungen gemeinschaftlich zu bewältigen. Die Umsetzung dieser Transformationen ist herausfordernd und kann durch verfestigte Entwicklungspfade – sogenannte **Pfadabhängigkeiten** – verzögert oder erschwert werden. Im Folgenden werden zentrale Pfadabhängigkeiten im Kontext der drei Transformationsziele entlang

zeitlicher, systemischer und akteursbezogener Dimensionen analysiert. Eine abschließende Risikoperspektive verdeutlicht jeweils die potenziellen Gefahren bei Nicht-Erreichen der Transformationsziele.

Ertüchtigung und Erneuerung des Infrastruktursystems

Wasserversorgungs- und Abwasserbeseitigungssysteme sind zeitlich stark von langfristig bindenden Entscheidungen geprägt. Zu den zentralen Bestandteilen des Wasserinfrastruktursystems zählen die Leitungs- und Kanalnetze, die hohe Anfangsinvestitionen erfordern und über eine lange Nutzungsdauer verfügen. Viele Kanalisationssysteme sind bis zu 100 Jahre alt und ein erheblicher Teil des Netzes wurde zuletzt vor mehr als 50 Jahren grunderneuert. Das durchschnittliche Alter beträgt etwa 37 Jahre [1][2]. Die langfristigen Investitions- und Erneuerungszyklen erschweren Anpassungen an veränderte Anforderungen. Zudem wird eine gezielte Erneuerung durch lückenhafte Dokumentationen der verlegten Leitungen behindert [3], was auch Herausforderungen für die Digitalisierung mit sich bringt.

Aus systemischer Perspektive ist das Wasserinfrastruktursystem stark von technologischen Pfadabhängigkeiten geprägt. Bestehende Kanalisationsnetze sind für erwartete Niederschlagsmengen der Vergangenheit ausgelegt. Sie sind teilweise unterdimensioniert und vielerorts handelt es sich um Mischwassersysteme, bei denen es in Fällen von starkem Niederschlag zu Mischwasserentlastungen, d.h. zur direkten Ableitung von Abwasser in Gewässer, kommt [4]. Die Umstellung auf Trennsysteme, bei denen Mischwasserentlastungen nicht vorkommen, ist aufwändig und mit hohen Kosten verbunden. Separate Leitungsnetze, sowohl im häuslichen als auch im öffentlichen Bereich, sind auch für die Wasserwiederverwendung erforderlich. Weil diese im Bestand meist nicht existieren, sind hier Umbaumaßnahmen nötig, wobei gleichzeitig die Versorgung durchgehend gewährleistet werden muss. Hier bestehen technologische sowie ökonomische Pfadabhängigkeiten [5].

Darüber hinaus wird das bestehende Leitungssystem durch demografische Veränderungen mit neuen Anforderungen konfrontiert. Während in Deutschland wirtschaftsstarke Großstädte, ihr Umland und einige ländliche Regionen weiter wachsen, nimmt die Bevölkerungszahl in strukturschwachen Gegenden abseits der Metropolen bis 2045 voraussichtlich weiter ab [6]. Bei abnehmender Auslastung in den Gebieten mit Bevölkerungsrückgang ist das Leitungsnetz entsprechend überdimensioniert, was zu Problemen und zu besonders hohen

Instandhaltungskosten führt, die in ländlichen Gebieten mit flächig verstreuter Bebauung generell höher sind [7][8].

Aus Sicht der Akteure existieren widersprüchliche Anreize bei der Finanzierung der technischen Wasserinfrastruktur. Diese wird häufig über verbrauchsabhängige Gebühren finanziert, was bedeutet, dass eine höhere Effizienz und sinkender Verbrauch – beides zentrale Ziele der Klimaanpassung – finanzielle Herausforderungen für die Versorger mit sich bringen. Während die Einnahmen zurückgehen, steigen gleichzeitig die Investitionsbedarfe für die Ertüchtigung und Erneuerung der Infrastruktur sowie für Maßnahmen der Klimawandelanpassung [1]. Zudem fehlt es vor allem in kleinen und mittleren Unternehmen häufig an Fachkompetenz und Fachpersonal für den Ausbau einer digitalisierten Wasserinfrastruktur [1][5].

Bei ausbleibender Instandhaltung und Ertüchtigung verstärken sich die Gefährdungen durch Wetterextreme. So steigt beispielsweise die Gefahr von Überflutungen durch eine unzureichend dimensionierte Kanalisation, was wiederum die Stabilität anderer Infrastruktursysteme wie Energie oder Verkehr gefährden kann. Auch die Gefährdung durch die globale Erwärmung und abnehmende Biodiversität erhöht sich. Zudem führt eine unzureichend umgesetzte Digitalisierung oder ein Mangel an IT-Kompetenzen und Fachpersonal zu einem erhöhten Risiko durch Cyberkriminalität sowie Technikversagen und eingeschränkter Technikbeherrschbarkeit.

Klimaanpassung

Die Prägung des Infrastruktursystems Wasser durch langfristige Investitions- und Erneuerungszyklen erschwert schnelle Anpassungen an die sich verändernden Bedingungen des Klimawandels. Über Jahrhunderte hinweg lag der Fokus im Umgang mit Gewässern auf der Entwässerung – Wasser wurde für Siedlungen und die Landwirtschaft abgeleitet, Flächen trockengelegt [10][11]. Heute stehen Renaturierung und Wasserrückhalt im Mittelpunkt, um sowohl besser mit Wasserknappheit als auch mit Starkregen umgehen zu können. Diese Umstellung wird jedoch durch bestehende Flächennutzung sowie bauliche Strukturen wie Drainagen, Entwässerungsgräben, versiegelte Flächen und verdichtete Böden erschwert [10][11]. Notwendige Um- und Rückbaumaßnahmen stoßen zudem auf ökonomische und institutionelle Pfadabhängigkeiten, beispielsweise wenn aufwändige ressortübergreifende Genehmigungsprozesse durchlaufen oder Grundstücke eigens für den Rückbau aufgekauft werden müssen [12].

Neben der Stärkung des Wasserdargebots, der Reduktion von Wasserbedarfen und dem angemessenen Umgang mit Starkregenereignissen ist die Sicherung der Wasserqualität wichtig. Auch die heutige Wasserqualität wird von zurückliegenden Entwicklungen geprägt, da beispielsweise Chemikalien, die in der Vergangenheit in Gewässer gelangt sind und weiterhin gelangen, teilweise schwer abbaubar und damit sehr langlebig sind [13]. Dies gilt ebenso für antimikrobielle Resistenzen, die sich auch auf das Infrastruktursystem Gesundheit auswirken.

Aus systemischer Perspektive wirken derzeit einige politisch-regulatorische Rahmenbedingungen einer Steigerung der Wassernutzungseffizienz entgegen. So werden Wasserentnahmeentgelte nur in manchen Bundesländern und nicht für alle Sektoren erhoben; eine bundesweite Harmonisierung ist zwar in Diskussion [10][11], wurde jedoch noch nicht umgesetzt. Die Einführung von einheitlichen Wasserentnahmeentgelten wird dadurch erschwert, dass Wasserentnahmen zum Teil nicht systematisch erfasst werden [14]. Auch Maßnahmen zur Wasserwiederverwendung stoßen auf Hürden: Je nach Art des Wassers und Verwendungszweck gelten unterschiedliche, teils sehr aufwändige regulatorische Auflagen, deren Einhaltung teils erheblichen Aufwand erfordert. Die Neuregulierung der Wasserwiederverwendung (auch von kommunalem Abwasser) für landwirtschaftliche Nutzung wird derzeit auf Basis der EU-Verordnung 2020/741 diskutiert. Gesellschaftliche Pfadabhängigkeiten können die Akzeptanz solcher Maßnahmen beeinträchtigen und damit die Umsetzung notwendiger Klimaanpassungsmaßnahmen erheblich erschweren. So kann etwa bei der Einführung von flächendeckenden Wasserentnahmeentgelten und dynamischen Wasserpreisen, die eine flexible Reaktion auf Wasserknappheit ermöglichen würden, mit Vorbehalten zu rechnen – insbesondere weil die Wasserentnahme und Nutzung bisher kostenfrei oder zu günstigen Konditionen möglich ist [14].

Gestaltet sich die Klimaanpassung unzureichend oder wird sie stark verzögert, steigt die Gefährdungslage für das Infrastruktursystem Wasser insbesondere durch die systemischen Risiken globale Erwärmung und Wetterextreme sowie Biodiversitätsverluste weiter stark an. Starkregen kann vor allem in besiedelten Gebieten durch Mischwasserentlastungen die Wasserqualität durch den **Eintrag von ungeklärtem Abwasser** erheblich beeinträchtigen. Zudem ergeben sich durch fehlende Klimaanpassungsmaßnahmen wie Renaturierung und verbesserter Wasserrückhalt Auswirkungen auf die Wasserquantität,

wodurch sich Wasserknappheitssituationen in Zukunft verschärfen könnten.

Integriertes und sektorübergreifendes Wassermanagement

In der Vergangenheit wurde Wasser in Deutschland als sicheres und stets verfügbares Gut wahrgenommen. Wasserthemen werden auch heute nur bei starkem Hochwasser oder extremen Trockenperioden gesellschaftlich aufgegriffen und medial diskutiert, verschwinden jedoch meist schnell wieder aus dem Bewusstsein der Bevölkerung [2].

Aus systemischer Perspektive wirken politisch-institutionelle Pfadabhängigkeiten als Hemmnis für die Transformation hin zu einem integrierten und sektorübergreifenden Wassermanagement. Die traditionell sektorale Planung wasserwirtschaftlicher Maßnahmen ohne ausreichende Abstimmung mit anderen Bereichen – etwa Landwirtschaft, Energie oder Stadtentwicklung – kann zu Konflikten führen [15]. Gleichzeitig erschwert die hohe institutionelle Fragmentierung innerhalb der Wasserwirtschaft die strategische Zusammenarbeit sowie den zielgerichteten Wissens- und Datenaustausch zwischen relevanten Akteuren [14]. Es fehlen derzeit institutionelle Rahmenbedingungen, die eine sektorübergreifende und räumlich abgestimmte Koordinierung wasserbezogener Maßnahmen ermöglichen. Dies zeigt sich insbesondere auf kommunaler Ebene, wo es an geeigneten Strukturen – etwa interdisziplinärer Gremien – mangelt, in denen Akteure der Wasserwirtschaft systematisch mit Landnutzenden zusammengebracht werden [10]. Für einen sparsamen und zukunftsfähigen Umgang mit Trinkwasser in Siedlungsräumen ist eine Bewirtschaftung auf der Ebene von Flusseinzugsgebieten notwendig. Dabei muss das Umland von Städten verstärkt in wasserwirtschaftliche Planungsprozesse einbezogen werden. Eine integrative, gesamträumliche Planung ist erforderlich, um Nutzungskonflikte zu vermeiden und eine nachhaltige Bewirtschaftung der Ressource Wasser zu gewährleisten [2].

Zudem stehen die Interessen unterschiedlicher Akteure bei vielen Klimaanpassungsmaßnahmen in Konkurrenz zueinander. Beispielsweise befinden sich Flächen, die renaturiert werden sollen, häufig in anderen Nutzungen mit entsprechend heterogenen Eigentums- und Akteursstrukturen. Auch Transformationen in anderen Infrastruktursystemen führen zu neuen Herausforderungen für die Wasserwirtschaft: Konkurrenzen mit der Landwirtschaft und mit anderen Sektoren werden sich voraussichtlich in manchen Regionen

verschärfen. Beispiele sind ein erhöhter Bewässerungsbedarf, der das verfügbare Wasserdargebot strapazieren kann, oder vermehrtes Vorhalten von Löschteichen zur Waldbrandbekämpfung, was mit anderen Wassernutzungen konkurrieren kann [16]. Veränderungen in der Energiewirtschaft führen in einigen Regionen zu veränderten Wasserbedarfen und potenziell neuen Wasserkonflikten, beispielsweise wenn Biomasse und Wasserkraft verstärkt genutzt werden sollen [15]. Dies erfordert verstärkte Kooperationen zwischen den Sektoren sowie integrative Perspektiven und übergreifende Planungsprozesse, die alle Wassernutzungen bedenken.

Wenn es nicht gelingt, ein integriertes und sektorübergreifendes Wassermanagement zu implementieren, erhöhen sich die Gefahren für das Infrastruktursystem Wasser insbesondere im Hinblick auf die systemischen Risiken zunehmender Wetterextreme, globale Erwärmung und den Verlust der Biodiversität. Ohne eine abgestimmte sektorenübergreifende Planung drohen zudem verschärfte Nutzungskonflikte zwischen Landwirtschaft, Industrie, Naturschutz und Siedlungswasserwirtschaft. Gleichzeitig steigt das Risiko von Fehlallokationen finanzieller Mittel, wodurch bestehende Investitions- und Finanzierungsengpässe im Infrastruktursystem weiter verschärft würden.

Referenzen

1. TAB (2023): Chancen und Risiken der Digitalisierung kritischer kommunaler Infrastrukturen an den Beispielen der Wasser- und Abfallwirtschaft. Endbericht zum TA-Projekt. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, Berlin
2. DVGW; DWA (2023): Roadmap 2030. Handlungsagenda für die Zukunft der Wasserwirtschaft. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Bonn
3. DVGW (o.J.): Substanz- und Werterhalt der Wasserinfrastruktur. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., www.dvgw.de/
4. LfU (o.J.): Kanalisation. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, www.lfu.bayern.de/
5. Schramm, E.; Winker, M. (2023): Transformation der Wasserinfrastruktur im Siedlungsbestand als Herausforderung. Institut für sozial-ökologische Forschung, Frankfurt a.M.
6. BBSR (2024): Raumordnungsprognose 2045. Bevölkerungsprognose – aktualisiert anhand der Ergebnisse des Zensus 2022. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Bonn

7. IWW et al. (2019): Analyse zum Stand und zur Entwicklung der Wasserwirtschaft in NRW. Institut für Wasserforschung gGmbH, Mülheim an der Ruhr
8. BMUV (2023): Nationale Wasserstrategie – Kabinettsbeschluss vom 15. März 2023. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, Berlin
9. Schramm, E.; Winker, M. (2022): Transformation der Wasserinfrastruktur im Bestand: Mögliche Pfade und notwendige Instrumente des Wandels. Abschlussbericht. Institut für sozial-ökologische Forschung, Frankfurt a.M.
10. WBGU (2024): Wasser in einer aufgeheizten Welt. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Berlin
11. Leopoldina (2024): Klima – Wasserhaushalt – Biodiversität: für eine integrierende Nutzung von Mooren und Auen. Halle (Saale), [DOI: 10.26164/LEOPOLDINA_03_01185](https://doi.org/10.26164/LEOPOLDINA_03_01185)
12. UBA (2024a): Auswirkung des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit. Anpassung an Trockenheit und Dürre in Deutschland (WAD-Klim). Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
13. UBA (2023): Wasserressourcen müssen besser geschützt werden. Umweltbundesamt warnt vor schwer abbaubaren und mobilen Chemikalien. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
14. EFI (2025): Gutachten zu Forschung, Innovation und Technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands 2025. Expertenkommission Forschung und Innovation, Berlin
15. IWW (2019): Umgang mit Zielkonflikten bei der Anpassung der Wasserwirtschaft an den Klimawandel. Institut für Wasserforschung gGmbH, Mülheim an der Ruhr
16. LAWA (2022): Umgang mit Zielkonflikten bei der Anpassung der Wasserwirtschaft an den Klimawandel. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, München

Fokusthemen

Für eine vertiefende Untersuchung im Resilienz-Check schlagen wir drei alternative Fokusthemen für das Infrastruktursystem Wasser vor. Diese leiten sich aus der Trendanalyse und der Bewertung der Gefährdungslage durch systemische Risiken im Rahmen des Resilienz-Radars, einschließlich der Auswertung der verschiedenen empirischen Erhebungen. Die vorgeschlagenen Fokusthemen stehen in engem Zusammenhang mit den identifizierten Trendclustern sowie den laufenden Transformationsprozessen des Infrastruktursystems. Sie besitzen eine hohe Relevanz für die Entwicklung transformativer Resilienzstrategien. Methodisch eignen sich die spezifischen Themenzuschnitte sowohl für die geplante Partizipation im Resilienz-Check als auch für die Entwicklung von Zukunftsszenarien. Darüber hinaus bieten sie Potenzial für eine vertiefende Bearbeitung im Rahmen weiterer Untersuchungsformate.

Fokusthema 1: Wasserspeicherung: intelligente Wasserspeicher, Schwammstädte, Gewässerstärkung und Grundwasseranreicherung

Die zukünftige Wasserversorgung wird zunehmend durch eine saisonale und regionale Ungleichverteilung von Wasserdargebot und -nachfrage beeinflusst. Wie im Trendcluster [Wassernutzungskonkurrenz und Klimawandelanpassung](#) beschrieben, nimmt der Wettbewerb um Wasserressourcen zu. Um Engpässe zu vermeiden, ist es entscheidend, Wasser länger im System zu halten und nachhaltige Speicher- und Managementstrategien zu entwickeln. Entsprechende Maßnahmen unterstützen nicht nur die resiliente Wasserversorgung, sondern tragen auch zur Klimaanpassung bei, etwa durch Prinzipien einer Schwammstadt, die neben einer verbesserten Wasserverfügbarkeit auch die Lebens- und Gesundheitsqualität in urbanen Räumen fördert. Im Rahmen des Resilienz-Checks sollen, falls dieses Fokusthema zur Vertiefung ausgesucht wird, ausgewählte technologiebasierte und innovative Ansätze der resilienzorientierten Wasserspeicherung fokussiert und szenariobasiert untersucht werden, die sowohl auf technische als auch auf natürliche Speichermechanismen setzen. Dazu gehören: (1) die Wasserspeicherung im Leitungsinfrastruktursystem,

beispielsweise durch neue, intelligente Speichertechnologien, die eine flexiblere Nutzung ermöglichen; (2) Ansätze der urbanen Wasserspeicherung, etwa Schwammstadt-Konzepte für eine wasserbewusste und klimaresiliente Stadtentwicklung, die Niederschlagswasser effizienter nutzt sowie (3) Ansätze zur Speicherung von Wasser in natürlichen Trinkwasserquellen, etwa durch Maßnahmen zur Gewässerstärkung, Wiedervernässung oder gezielte Grundwasseranreicherung.

Das Ziel des Resilienz-Checks auf Grundlage dieses Fokusthemas ist es, einen systematischen Überblick über die verschiedenen Konzepte der Wasserspeicherung zu schaffen und ihre Potenziale für eine resiliente und nachhaltige Wasserversorgung in der Zukunft zu analysieren. Dabei werden nicht nur die individuellen Vorteile der einzelnen Ansätze betrachtet, sondern auch ihre Wechselwirkungen im Gesamtsystem. Zudem werden mögliche neue Risiken untersucht, die mit den jeweiligen Ansätzen verbunden sein könnten und resilienzorientierte Strategien entwickelt, um diesen Herausforderungen wirksam zu begegnen.

Fokusthema 2: Monitoring und Erhalt der Wasserqualität von Trinkwasserressourcen

Die Qualität von Trinkwasserressourcen weist nach wie vor erhebliche Defizite auf, da Schadstoffeinträge aus verschiedenen Quellen die Reinheit des Wassers gefährden, wie im Trendcluster [Belastung der Qualität von Wasserressourcen](#) beschrieben. Während die Vermeidung dieser Einträge oberste Priorität hat, bieten Strategien zum Monitoring der Wasserqualität sowie zu deren Wiederherstellung für eine Steigerung der Resilienz weitere Potenziale – sowohl in natürlichen Gewässern als auch in Kläranlagen. Zudem kann die Differenzierung nach Gebrauchsarten eine Rolle spielen, indem Wasser unterschiedlicher Qualität für verschiedene Zwecke genutzt wird. Im Rahmen des Resilienz-Checks sollen ausgewählte technologiebasierte und innovative Ansätze des Wasserqualitätsmonitorings und -erhalts fokussiert und szenariobasiert untersucht werden. Dazu gehören: (1) neue Ansätze des Wasserqualitätsmonitorings fokussiert, beispielsweise der Einsatz von KI-gestütztem Echtzeit-Monitoring zur kontinuierlichen Überwachung; (2) Maßnahmen zur aktiven Wiederherstellung der Wasserqualität, etwa durch den Einsatz von Wasserpflanzen, speziell gezüchteten Mikroorganismen oder gezielt

eingesetzten Viren zur Kontrolle von Algenblüten sowie neue Filtertechnologien wie biotechnologische Verfahren oder (Nano-)Sorbentien, die dazu beitragen in Kläranlagen Schadstoffe effizienter zu entfernen; (3) dezentrale, mobile Ansätze für Wasseraufbereitungsanlagen als flexible Lösungsmöglichkeiten.

Das Ziel des Resilienz-Checks auf Grundlage dieses Fokusthemas ist es, neue Methoden zur Überwachung und Verbesserung der Wasserqualität und deren Potenziale zur Resilienzsteigerung zu untersuchen. Dabei werden nicht nur die individuellen Vorteile der einzelnen Ansätze betrachtet, sondern auch ihre Wechselwirkungen im Gesamtsystem. Schließlich werden mögliche neue Risiken untersucht, die mit den jeweiligen Ansätzen verbunden sein könnten und resilienzorienteerte Strategien entwickelt, um diesen Herausforderungen wirksam zu begegnen.

Fokusthema 3: Cybersicherheit im Kontext digitaler Transformation

Die Digitalisierung erfasst zunehmend auch das Infrastruktursystem Wasser, wie im Trendcluster [Digitalisierung und Vernetzung der technischen Infrastrukturen](#) dargestellt, wodurch die Bedrohung durch Cyberkriminalität zunimmt. Zwar existieren Maßnahmen im Rahmen des KRITIS-Schutzes, jedoch ist unklar, ob diese ausreichen, um die Resilienz des Infrastruktursystems Wasser auch bei zukünftig verstärkten Bedrohungen zu gewährleisten. Im Rahmen des Resilienz-Checks sollen zwei strategische Themenfelder zur Resilienzsteigerung angesichts von Cyberbedrohungen fokussiert und szenariobasiert untersucht werden: (1) Ansätze zur sicheren Nutzung großer IT-Dienstleister, insbesondere von Cloud-Diensten, um Abhängigkeiten zu minimieren und gleichzeitige Angriffe oder Ausfälle von Software und Hardware zu vermeiden sowie (2) Ansätze und neue Sicherheitsstrategien zum Umgang mit dem Zusammenwachsen von Operational Technology (OT) und Information Technology (IT).

Das Ziel des Resilienz-Checks auf Grundlage dieses Fokusthemas ist es, zentrale Elemente von vorausschauenden und resilienzorientierten Strategien zur Stärkung der Cybersicherheit im Infrastruktursystem Wasser zu untersuchen. Diese sollen auch bei wachsenden Bedrohungslagen und sich verändernden Risiken wirksam bleiben.

Methodik und Vorgehen

Die Umsetzung des Resilienz-Radars erfolgt in drei aufeinander aufbauenden Arbeitsphasen. In allen Phasen wird die Expertise interner und externer Expert/innen einbezogen.

In der ersten Phase wurden vor allem Foresight- und TA-Studien im Umfeld der ausgewählten Infrastruktursysteme erfasst und analysiert. Hierbei wurden insbesondere mittel- bis langfristige Trends identifiziert, die nachweisbare Auswirkungen auf die Infrastruktursysteme haben. Ergänzend wurden unter Berücksichtigung der Ergebnisse des [TA-Projekts](#) „Krisenradar – Resilienz von Gesellschaft, Politik und Wirtschaft durch Krisenvorhersage stärken“ relevante wissenschaftliche Quellen zur Analyse von systemischen Risiken ausgewertet. Diese können eine Gefährdung von Gesellschaften oder Wirtschaftssystemen als Ganzes zur Folge haben und beinhalten damit grundsätzlich auch die Gefahr, dass Funktionsfähigkeit und Stabilität von Infrastruktursystemen erheblich beeinträchtigt werden, wenn sich diese Risiken verwirklichen.

Die Identifikation aufkommender soziotechnischer Trends erfolgte zusätzlich durch den Einsatz von Software- und KI-Technologien. Dafür wurde ein Quellenpool aufgebaut, der einschlägige Datenbanken (z.B. EPTA, ORBIS, Knowledge4Policy, OpenTA), Publikationen (Foresightstudien, Trendberichte, Konferenzsammelbände und Preprints), wissenschaftliche Plattformen (z.B. ScienceDaily) sowie journalistischen Hintergrundanalysen (Tagesspiegel Background, Heise online) umfasst. Die neuesten Veröffentlichungen wurden über eine zentrale Plattform semiautomatisch und kontinuierlich abgerufen. Das Team sichtete die Beiträge regelmäßig und bewertete deren Relevanz für die ausgewählten Infrastruktursysteme. Ergänzend wurde nach Innovationen mithilfe einer Medienanalysesoftware mit Zugang zu 150 Mio. Onlinequellen gesucht. Dabei lag der Fokus vor allem auf Tages- und Wochenzeitungen sowie Onlinenews.

In der zweiten Phase wurden Interviews mit ausgewählten Expert/innen geführt, um deren Fachwissen, Einschätzungen und Meinungen zu wesentlichen Trends und Herausforderungen sowie zu Wirkungszusammenhängen im Kontext systemischer Risiken für die Infrastruktursysteme zu erfassen. Für die Interviews wurde ein einheitlicher Leitfaden und Fragenkatalog erstellt. Auf den Ergebnissen der Interviews aufbauend wurden moderierte infrastrukturspezifische Workshops mit ausgewählten Expert/innen durchgeführt. Hier wurden

erste Arbeitsergebnisse zum Systembild des jeweiligen Infrastruktursystems sowie zu relevanten Trends und möglichen Folgen von systemischen Risiken vorgestellt und diskutiert. Abschließend erfolgte eine Einschätzung hinsichtlich politischer Relevanz und möglicher Vertiefungsthemen. Die Antworten der Befragten sowie weitere Kommentare, Hinweise und detaillierte Ausführungen wurden während der Interviews und Workshops protokolliert und die Ergebnisse anschließend qualitativ ausgewertet.

In der dritten Phase wurde für jedes der Infrastruktursysteme eine explorative Onlineerhebung unter Einbeziehung des Expertenpanels mithilfe der Software SoSci Survey durchgeführt. Aufgabe war es, auf Grundlage der vorangegangenen Schritte Trends auszuwählen und hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Verletzlichkeit und Resilienz des genannten Infrastruktursystems zu bewerten. Außerdem wurden die insgesamt etwa 80 Expert/innen dazu befragt, welche Trends in den nächsten 10 Jahren zu einer erhöhten Resilienz der Infrastruktursysteme beitragen könnten und welche Trends die Transformation der Infrastruktursysteme in Richtung Klimaneutralität besonders hemmen. Darüber hinaus sollten sie einschätzen, wie derzeit der Grad der Robustheit des jeweiligen Infrastruktursystems in Bezug auf prioritäre systemische Risiken eingeschätzt wird. Abschließend wurde für jedes System erfragt, auf welche Schwerpunktthemen die Politik in den nächsten 5 Jahren in Bezug auf die Resilienz des Infrastruktursystems vorrangig fokussieren sollte. Der quantifizierbare Teil der Ergebnisse wurde statistisch ausgewertet, die Kommentare, Hinweise und detaillierten Ausführungen einer qualitativen Analyse unterzogen.

Die Resultate aller drei Arbeitsphasen wurden abschließend integrativ analysiert und in dem vorliegenden Foresight-Report zusammengefasst.

Autorinnen und Autoren

Das Resilienz-Radar sowie der Foresight-Report sind eine gemeinsame Aktivität des TAB-Betreibers ITAS zusammen mit dem Konsortialpartner IZT. Verantwortlich für die Inhalte sind die [folgenden Wissenschaftler/innen](#). Bei inhaltlichen Fragen zum Foresight-Report wenden Sie sich bitte an Michaela Evers-Wölk oder Christoph Kehl.

Beteiligte Expert/innen

Die Umsetzung des [Resilienz-Radars](#) erfolgt in drei aufeinander aufbauenden Arbeitsphasen. In allen Phasen wird die Expertise interner und externer Expert/innen einbezogen. Für die Analyse des Infrastruktursystems Energie wurden u.a. die [folgenden Fachleute](#) im Rahmen von leitfadengestützten Fachgesprächen, moderierten Gruppendiskussionen oder einer explorativen Online-Erhebung eingebunden.

Zitationsvorschlag

Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) (2025): Foresight-Report zum Infrastruktursystem Wasser (Autor/innen: Bledow, N.; Eickhoff, M.; Evers-Wölk, M.; Kahlisch, C.; Kehl, C.; Nolte, R.; Rioussset, P.). Berlin. <https://foresight.tab-beim-bundestag.de/reports/wasser>

Das TAB analysiert im Auftrag des Deutschen Bundestages umfassend und vorausschauend die Potenziale wissenschaftlich-technischer Entwicklungen und ihre Auswirkungen auf die Gesellschaft.

Organisation

Betreiber: [ITAS](#) im [KIT](#)
 Partner: [IZT](#) und [iit](#) in der [VDI/VDE-IT](#)
 Auftraggeber: [Deutscher Bundestag](#)
 Steuerungsgremium: [Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung](#)



Kontakt

[Büro für Technikfolgen-Abschätzung
beim Deutschen Bundestag \(TAB\)](#)

[Mediananfragen](#)