

agile Netzsteuerung zur Erhöhung der Resilienz der Kritischen Infrastruktur Wasserversorgung

BMFTR-Forschungsvorhaben **aKtlv**, Förderkennzeichen: 13N16394

Projektlaufzeit: 01.10.2022 – 31.12.2025



Ergebnisbericht

Handlungsempfehlungen und Points to Consider



Gefördert durch:



Projektpartner

Wasserversorgung Rheinhessen-Pfalz GmbH
Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung
Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen
Universität Trier, Institut für Deutsches und Europäisches Wasserwirtschaftsrecht
iSAtech water GmbH
Eberhard Karls Universität Tübingen, Internationales Zentrum für Ethik in den Wissenschaften
RWTH Aachen Universität, Lehrstuhl für Wirtschaftswissenschaften für Ingenieure und Naturwissenschaftler
TH Lübeck, Elektrotechnik und Informatik, Kompetenzzentrum CoSA

Assoziierte Partner

Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK)
Brand- und Katastrophenschutzinspekteur Landkreis Alzey-Worms (BKI)
Ministerium des Innern und für Sport Rheinland-Pfalz (Mdi RLP)
Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität Rheinland-Pfalz (MKUEM)

Koordination

Wasserversorgung Rheinhessen-Pfalz GmbH, Natalie Pikos
Rheinallee 87, 55294 Bodenheim
Telefon: 06249 90808-16, E-Mail: n.pikos@wvr.de
Versorgungslinien mit Kontaminationsrisiken und/oder Vorlaufzeiten einhergehen können.

Autoren

Natalie Pikos¹, Clarisse Umugwaneza¹, Arathy Pillai¹, Jörg Grischy¹, Ronald Roepke¹,
Elimar Precht², Monica Ionita², Benjamin Trummer³, Manuel Beh⁴, Emanuel Mey⁵,
Florian Wiesweg⁵, Friedrich Gabel⁶, Jonathan Lübke⁶, Maren Romer⁷, Sebastian Kruse⁷,
Sven Leugner⁸

¹ Wasserversorgung Rheinhessen-Pfalz GmbH (wvr), ² Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI), ³ Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen (IIS), ⁴ Universität Trier, Institut für Deutsches und Europäisches Wasserwirtschaftsrecht, ⁵ iSAtech water GmbH (iSAtech), ⁶ Universität Tübingen, Internationales Zentrum für Ethik in den Wissenschaften (IZEW), ⁷ RWTH Aachen Universität, Lehrstuhl für Wirtschaftswissenschaften für Ingenieure und Naturwissenschaftler (RWTH), ⁸ TH Lübeck, Elektrotechnik und Informatik, Kompetenzzentrum CoSA

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	
	Wasserversorgung im Klimawandel:	
	Möglichkeit von Engpasssituationen und Mangellagen	4
1.1	Problembeschreibung	4
1.2	Lösungsansatz und Projektinformatik	8
1.3	Ziel der Publikation	10
2	Digitaler Zwilling	11
2.1	Voraussetzungen	12
2.2	Datenflüsse und -ströme	13
2.3	Erweiterte Systemkenntnis: Monitoring von Wasserdargebot und -bedarf	16
2.4	Erstellung und Nutzung von Prognosen mit Hilfe des Einsatzes von KI	19
2.5	Optimierung der Netzsteuerung zur Entscheidungsunterstützung	24
2.6	Investitionskosten	29
3	Sozio-technische Mechanismen zur Entnahmesteuerung	31
3.1	Maßnahmen zur Bewusstseinsbildung	32
3.2	Nutzung von Wasserampeln	33
3.3	Einsatz von Appellen	35
3.4	Nutzung dynamischer Entgelte	36
3.5	Aussprache von Entnahmeverboten	38
3.6	Durchführung von Rationierungen oder Priorisierungen	40
4	Handlungsempfehlungen für Akteur*innen im Wassersektor	43
4.1	Handlungsempfehlungen für Wasserversorger	44
4.2	Handlungsempfehlungen für Behörden	45
4.3	Handlungsempfehlungen für Gesetzgebung	45
4.4	Handlungsempfehlungen für Abnehmer*innen	46
4.5	Handlungsempfehlungen für Forschung und Entwicklung	46
5	Literatur	47

1 Einleitung

Wasserversorgung im Klimawandel: Möglichkeit von Engpasssituationen und Mangellagen

1.1 Problembeschreibung

Aufgrund des Klimawandels und dessen Folgen kann es auch in Deutschland zu kurzfristigen Engpasssituationen oder länger andauernden Mangellagen kommen. Dabei unterscheiden sich die Herausforderungen der zukünftigen Wasserversorgung grundlegend von denen der Vergangenheit: Während über viele Jahrzehnte die Frage im Mittelpunkt stand, wie theoretisch unbegrenzt verfügbares Wasser besser und effizienter verteilt werden kann, sehen sich Wasserversorgungsunternehmen (WVU) heute zunehmend damit konfrontiert, dass Wasser auch in Deutschland knapper wird. Besonders in Hochsommerphasen mit langanhaltend hohen Temperaturen und ausbleibenden Niederschlägen treffen Spitzenbedarfe vielerorts auf sinkende Rohwasserdarangebote. Unter anderem in landwirtschaftlich geprägten Gebieten mit einem großen Anteil an Abnehmern für Bewässerungszwecke kann diese Situation zu drohenden Engpasssituationen führen. Um die Trinkwasserversorgung zuverlässig sicher stellen zu können, müssen bestehende Versorgungsstrukturen entsprechend angepasst und neue Handlungsoptionen entwickelt werden.

Auswirkungen des Klimawandels auf den Rheinabfluss

Im Projekt **aKtlv – agile Netzsteuerung zur Erhöhung der Resilienz der Kritischen Infrastruktur Wasserversorgung** liegt das betrachtete Pilotgebiet am Rhein, der eine wesentliche Rolle bei der Trinkwasserversorgung spielt. Der Rhein ist nicht nur eine der wichtigsten europäischen Wasserstraßen, sondern auch von immenser Wichtigkeit für die Trink- und Nutzwasserversorgung in seinem Einzugsgebiet. Allerdings erfährt der Rhein aufgrund des fortschreitenden Klimawandels erhebliche Veränderungen seiner Abflussmuster, also der zeitlichen Veränderung der abfließenden Wassermenge. Die Analyse langfristiger hydrologischer Daten zeigt ein komplexes Zusammenspiel von Faktoren, die diese Veränderungen beeinflussen. Erhöhte atmosphärische Temperaturen führen zu einer beschleunigten Gletscherschmelze in den Alpenregionen, einer der Hauptquellen des Rheinwassers. Dadurch erhöht sich zunächst der Abfluss im Sommer, doch mit dem Rückgang der Gletscher ist langfristig auch mit einem Rückgang der Sommerabflüsse zu rechnen. Gleichzeitig verändern die Niederschlagsmuster mit häufigeren und intensiveren Niederschlägen in Form von Regen, der nicht oder kürzer als Schnee zwischengespeichert wird, das hydrologische Regime des Flusses.

Im Projekt wurden insbesondere die Auswirkungen dieser Veränderungen auf den Abfluss des Rheins an der Messstation Worms betrachtet. Diese im Mittellauf des Flusses gelegene Station bietet einen wertvollen Einblick in die Auswirkungen des Klimawandels auf den Abfluss des Flusses. Die Untersuchung der monatlichen Abflusstrends in Worms zeigt deutliche saisonale Schwankungen. Die Wintermonate sind durch einen erhöhten Abfluss gekennzeichnet, was auf verstärkte Niederschläge und wärmere Temperaturen zurückzuführen ist, die zu einer geringeren Schneeansammlung und mehr Abfluss führen. Umgekehrt zeigen die Sommermonate einen Trend zu geringeren Abflüssen, was auf einen geringeren Beitrag der Gletscherschmelze und eine erhöhte Evapotranspiration (Verdunstung aus Böden und Pflanzen) aufgrund höherer Temperaturen zurückzuführen ist.

Die monatlichen Trends in Worms lassen sich wie folgt zusammenfassen:

■ Winter (Dezember – Februar)

Die Wintermonate zeigen einen signifikanten positiven Trend des durchschnittlichen monatlichen Abflusses an der Station Worms, mit beobachteten Anstiegen von $+269,57 \text{ m}^3/\text{s}$ im Dezember, $+366,95 \text{ m}^3/\text{s}$ im Januar und einem Spitzenanstieg von $+463,64 \text{ m}^3/\text{s}$ im Februar. Dieser Trend wird auf eine erhöhte Häufigkeit intensiver Niederschlagsereignisse im Winter in Verbindung mit einer geringeren Schneeakkumulation in flussaufwärts gelegenen Einzugsgebieten zurückgeführt (vergleiche [Abbildung 1](#)).

■ Frühjahr (März – Mai)

Der Frühlingsabfluss an der Station Worms zeigt einen positiven, wenn auch weniger ausgeprägten Trend im Vergleich zum Winter, mit monatlichen Anstiegen von $+275,64 \text{ m}^3/\text{s}$ im März, $+84,11 \text{ m}^3/\text{s}$ im April und $+125,45 \text{ m}^3/\text{s}$ im Mai. Diese Schwankungen spiegeln das komplexe Zusammenspiel von Zeitpunkt und Intensität der Schneeschmelze sowie der Niederschlagsmuster im Frühjahr wider. Insbesondere die Spitzenabflüsse, die historisch mit der Schneeschmelze verbunden sind, treten tendenziell früher auf.

■ Sommer (Juni – August)

Die Sommermonate zeigen einen signifikanten negativen Trend des durchschnittlichen monatlichen Abflusses an der Station Worms mit Rückgängen von $-31,22 \text{ m}^3/\text{s}$ im Juni, $-277,79 \text{ m}^3/\text{s}$ im Juli und $-342,22 \text{ m}^3/\text{s}$ im August. Dieser stetige Rückgang wird auf ein Zusammenspiel mehrerer Faktoren zurückgeführt, darunter ein geringerer Beitrag der Gletscherschmelze, erhöhte Evapotranspirationsraten aufgrund gestiegener Temperaturen und ein Rückgang der Sommerniederschläge (vergleiche [Abbildung 1](#)).

■ Herbst (September – November)

Die Herbstabflüsse an der Station Worms zeigen ein variables Muster, das durch die stochastische Natur der Herbstniederschläge beeinflusst wurde. Insbesondere wird ein signifikanter negativer Trend beim durchschnittlichen monatlichen Abfluss beobachtet, der im September mit $-386,43 \text{ m}^3/\text{s}$ seinen Höhepunkt erreicht. Dieser Rückgang schwächt sich im Oktober auf $-229,92 \text{ m}^3/\text{s}$ ab und geht im November weiter auf $-25,22 \text{ m}^3/\text{s}$ zurück.

Die in Worms beobachteten Trends decken sich mit den allgemeineren Auswirkungen des Klimawandels auf das Rheineinzugsgebiet. Diese Veränderungen haben erhebliche Auswirkungen auf die Schifffahrt, die Wasserversorgung, die Gesundheit der Ökosysteme und das Hochwasserrisikomanagement. Der prognostizierte langfristige Rückgang der Sommerabflüsse in Verbindung mit erhöhten Winterabflüssen erfordert Anpassungsstrategien, um die nachteiligen Auswirkungen dieser hydrologischen Veränderungen zu mildern. Kontinuierliche Überwachung und Modellierung sind entscheidend für das Verständnis und die Vorhersage künftiger Abflussmuster und die Entwicklung wirksamer Pläne für die Bewirtschaftung der Wasserressourcen.

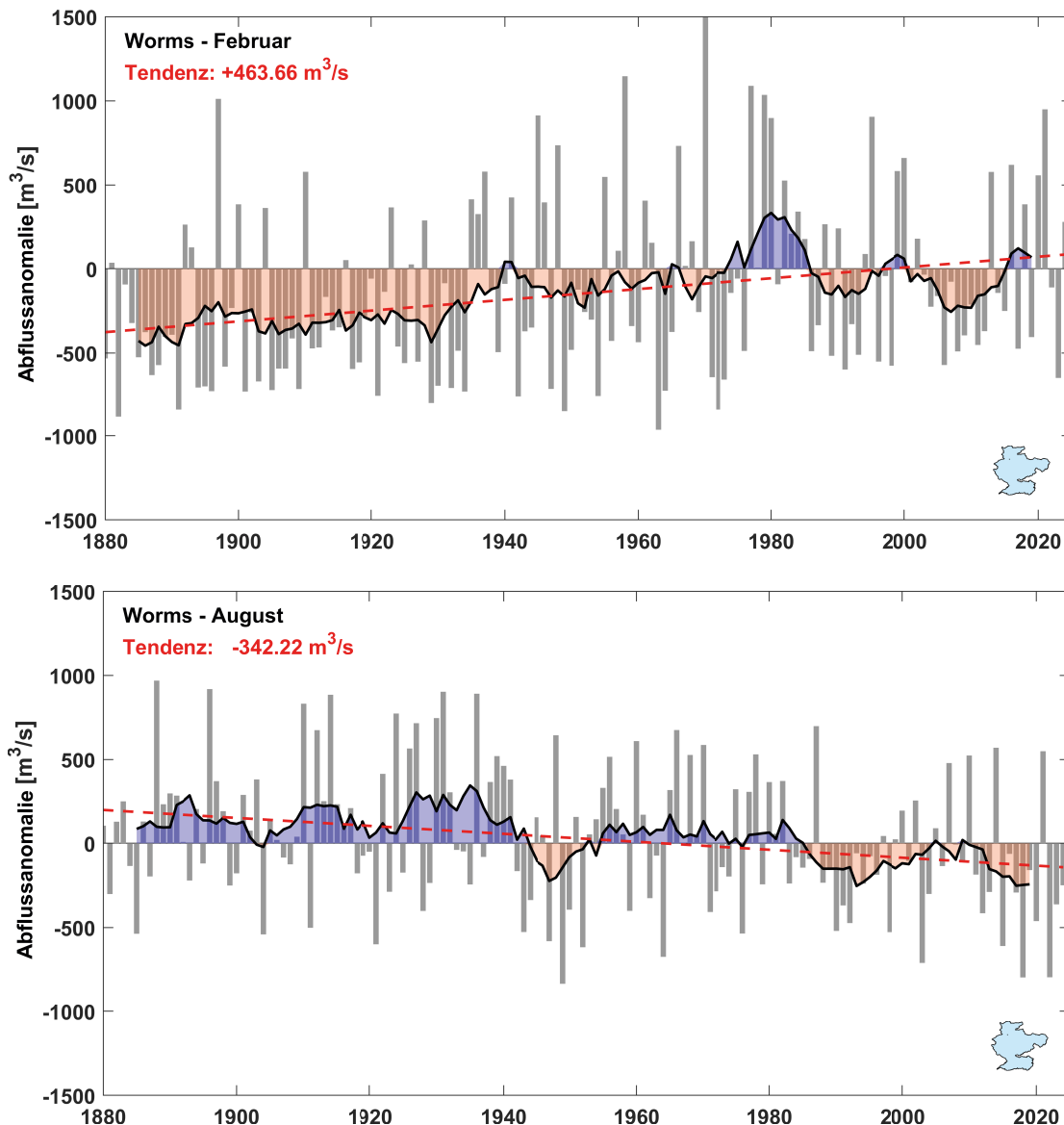


Abbildung 1

Abflussanomalien (m³/s) an der Station Worms des Rheins für 1880-2024 für Februar und August.

Zukunftsszenarien für den Rheinabfluss

Bereits heute erkennbare Trends werden sich in den kommenden Jahren voraussichtlich deutlich verstärken. In der Folge ist mit erheblich veränderten Abflussmustern am Rhein zu rechnen. In den Zukunftsszenarien werden insbesondere die folgenden Haupttrends hervorgehoben:

- **Erhöhte Winterabflüsse:** wärmere Temperaturen werden zu einer geringeren Schneeakkumulation und einem stärkeren Niederschlagsabfluss führen, was einen höheren winterlichen Abfluss zur Folge hat. Dies könnte das Risiko von Winterhochwasser erhöhen, was verbesserte Hochwasserschutzstrategien erforderlich macht. Die projizierten Szenarien zeigen einen signifikanten positiven Trend des Winterabflusses für den Rhein an der Station Worms im nächsten Jahrhundert. Konkret wird ein Anstieg von +377 m³/s erwartet, was einer Zunahme des Abflusses um etwa 26 % entspricht (vergleiche [Abbildung 2](#)).

- **Leicht erhöhter Frühjahrsabfluss:** die projizierten Szenarien deuten auf einen vernachlässigbaren Trend beim Frühjahrsabfluss des Rheins an der Station Worms im nächsten Jahrhundert hin, mit einem erwarteten Anstieg von $+29 \text{ m}^3/\text{s}$, was einem Anstieg des Abflusses um etwa 2 % entspricht. Es wird jedoch eine mögliche Verschiebung des Zeitpunkts der Abflussspitzen erwartet, die durch ein früheres Auftreten aufgrund einer beschleunigten Schneeschmelze und einer erhöhten Abflussvariabilität gekennzeichnet sind (vergleiche [Abbildung 2](#)).
- **Abnehmende Sommerabflüsse:** Die projizierten Szenarien sagen für den Rhein an der Station Worms im nächsten Jahrhundert einen erheblichen negativen Trend beim Sommerabfluss voraus. Konkret wird eine Abnahme von $-565 \text{ m}^3/\text{s}$ erwartet, was einem Rückgang des Abflusses um etwa 34 % entspricht. Diese Verringerung wird die Schifffahrt, die Verfügbarkeit von Wasser für die Landwirtschaft und die Industrie sowie die Integrität der Ökosysteme vor allem in längeren Trockenperioden vor erhebliche Herausforderungen stellen (vergleiche [Abbildung 2](#)).
- **Abnehmende Herbstabflüsse:** Die projizierten Szenarien sagen für den Rhein an der Station Worms im nächsten Jahrhundert einen erheblichen negativen Trend des Herbstabflusses voraus. Dieser Trend, der durch eine erhöhte Abflussvariabilität aufgrund intensiverer und weniger vorhersehbarer Niederschlagsereignisse gekennzeichnet ist, wird voraussichtlich zu einem Rückgang von $-294 \text{ m}^3/\text{s}$ führen, was einer Verringerung des Abflusses um ca. 24 % entspricht (vergleiche [Abbildung 2](#)).
- **Verringertes jährliches Abflussvolumen:** Für den Pegel Worms, der die hydrologischen Veränderungen im gesamten Einzugsgebiet widerspiegelt, wird ein jährlicher negativer Abflusstrend prognostiziert, der auf den Klimawandel zurückzuführen ist. Konkret wird eine Verringerung von $-106 \text{ m}^3/\text{s}$ erwartet, was einem Rückgang des Abflusses um etwa 7 % entspricht (vergleiche [Abbildung 2](#)).

Die prognostizierten Szenarien des Klimawandels deuten auf ein zukünftiges hydrologisches Regime des Rheins hin, das durch veränderte Abflussspitzen, eine erhöhte Häufigkeit von Extremereignissen und eine größere Variabilität der Abflüsse gekennzeichnet ist. Diese Veränderungen erfordern proaktive Anpassungsstrategien, einschließlich verbesserter Wasserspeicherung, verstärktem Hochwasserschutz, nachhaltigem Wassermanagement und verfeinerter Überwachung/Monitoring, um die langfristige Nachhaltigkeit des Rheineinzugsgebiets zu gewährleisten.

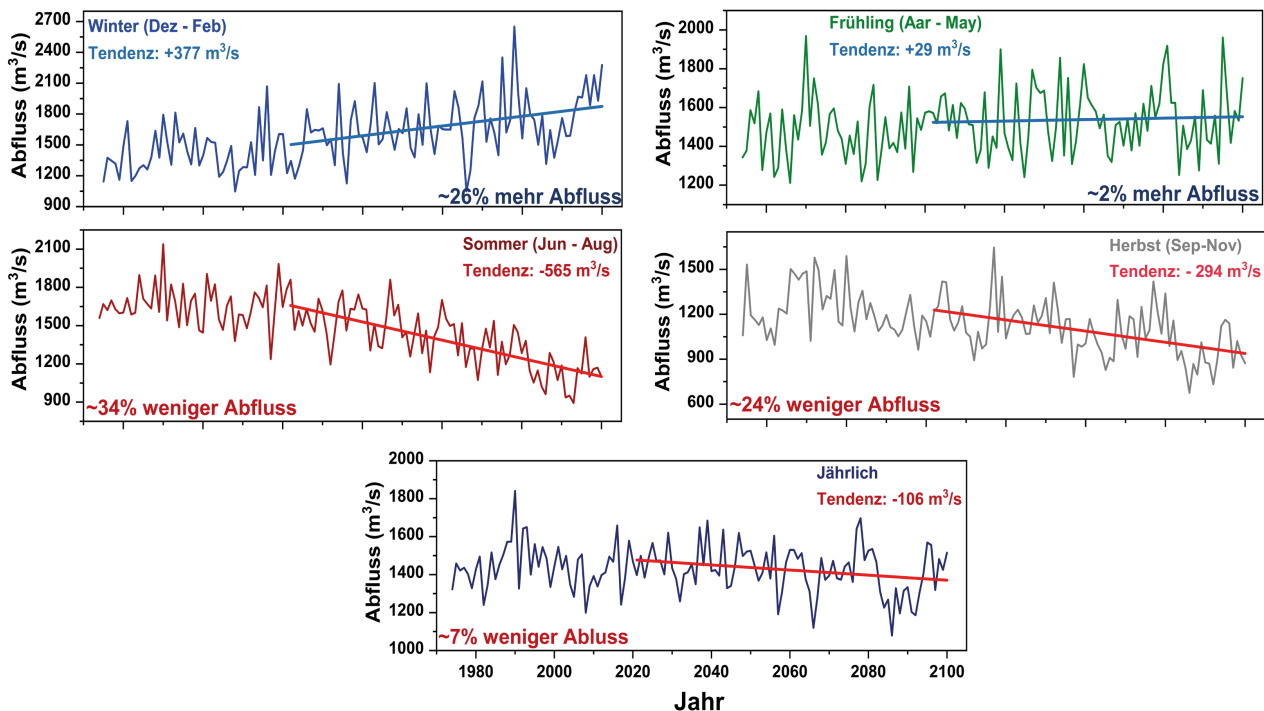


Abbildung 2

Prognostizierte Änderungen der saisonalen (Winter, Frühling, Sommer, Herbst) und jährlichen Abflüsse an der Station Worms, Rhein, für das nächste Jahrhundert.

1.2 Lösungsansatz und Projektinformation

Das Projekt **aKtlv** wurde vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt vom 01.10.2022 bis 31.12.2025 im Zuge der Bekanntmachung „Künstliche Intelligenz in der zivilen Sicherheitsforschung II“ im Rahmen des Programms „Forschung für die zivile Sicherheit“ der Bundesregierung gefördert und vom Projektträger VDI-Technologiezentrum betreut. In **aKtlv** wurde erforscht, wie das System der leitungsgebundenen Trinkwasserversorgung resilienter gegenüber Engpasssituationen gestaltet werden kann. Ziel war es, die bestehenden Versorgungssysteme resilienter zu machen, unter anderem durch eine agile Netzsteuerung. Die Entwicklung intelligenter, adaptiver Steuerungssysteme bietet die Chance, Wasserressourcen effizienter zu bewirtschaften, die Infrastruktur der Wasserversorgung robuster auszulegen und langfristig die Versorgungssicherheit für die Bevölkerung zu gewährleisten.

Um den großen Herausforderungen der Wasserversorgungssysteme zu begegnen und sowohl die langfristige Versorgungssicherheit als auch die Nachhaltigkeit der Ressourcen zu gewährleisten, sind definierte Schutzziele essenziell. Ein wichtiger Aspekt dieser Schutzziele ist die Daseinsvorsorge, die sicherstellt, dass die Bevölkerung jederzeit mit qualitativ und quantitativ angemessenen Trinkwasser versorgt wird. Diese Schutzziele sind nicht isoliert zu betrachten, sondern sollten durch präventive Maßnahmen, Notfallstrategien und den effizienten Einsatz moderner Technologien unterstützt werden.

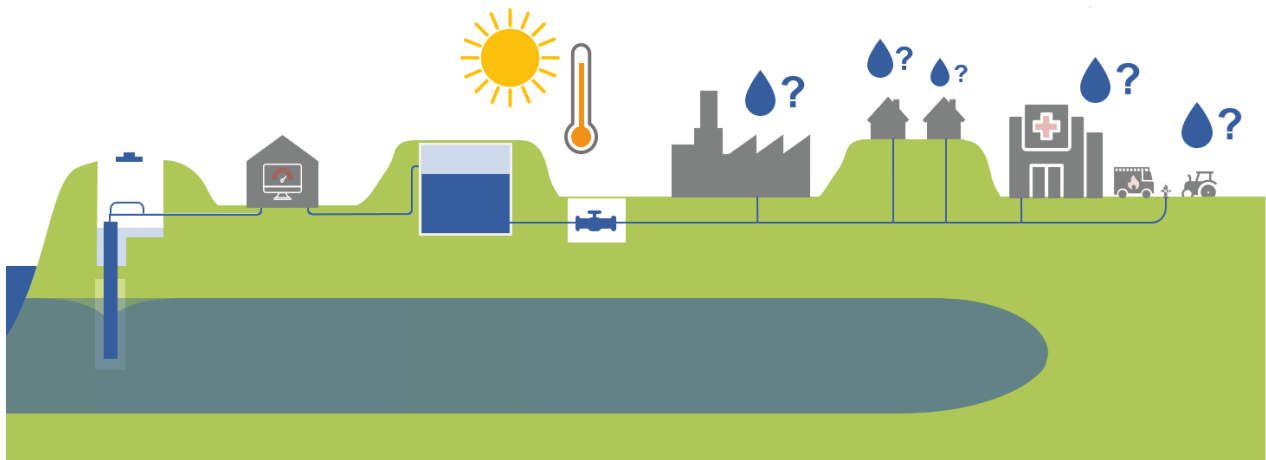


Abbildung 3

Veränderte Rahmenbedingungen für die Wasserversorgung: Hitze stresst das Versorgungssystem, Wasserbedarfe überschreiten unter Umständen die Rohwasserkapazität, konkreter Wasserbedarf ist gegebenenfalls nicht bekannt.

Neben technischen Lösungsansätzen wurden im Projekt **aKtiv** auch soziale, ethische, juristische und ökonomische Perspektiven einbezogen. Ausgangspunkt war die Überzeugung, dass die Resilienz leitungsgebundener Wasserversorgungssysteme nicht ausschließlich als technische Fragestellung verstanden und bearbeitet werden kann. Vielmehr ist angesichts der gesellschaftlichen Relevanz von Wasser eine tiefgreifende Auseinandersetzung mit dem komplexen Zusammenspiel von Technik und gesellschaftlichem Handeln erforderlich.

Diese interdisziplinäre Herangehensweise wird besonders deutlich in den vielfältigen Spannungsfeldern, denen sich die Forschung gegenübersteht. So stehen Ziele wie die Erhöhung von Resilienz, die Steigerung von Effizienz, die Förderung von Nachhaltigkeit und bewusstem Wasserverbrauch sowie die Gewährleistung sozialer Gerechtigkeit mitunter in Konkurrenz zueinander – und teils auch zu ökonomischen Interessen.

Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen von **aKtiv** Maßnahmen entwickelt und miteinander verzahnt, sodass sie gesellschaftlich getragene Wertvorstellungen und Zielsetzungen unterstützen und gleichzeitig dazu beitragen, neue Risiken, die sich aus veränderten Rahmenbedingungen ergeben, zu minimieren. An dem Projekt arbeiteten acht Institutionen aus unterschiedlichen Disziplinen und Praxisfeldern zusammen, darunter Vertreter*innen der Wasserversorgung, Klimaforschung, Kommunikationstechnik, mathematischen Optimierung, Softwareentwicklung, Betriebswirtschaft, Rechtswissenschaften und Ethik.

1.3 Ziel der Publikation

Ziel dieser Publikation ist es, auf Basis der im Projekt **aKtlv** durchgeführten Forschung Handlungsempfehlungen und „Points to Consider“ (PtC) für unterschiedliche Akteur*innen der Trinkwasserversorgung zu formulieren, die für die Weiterentwicklung der Wasserversorgung im Hinblick auf die Vermeidung und den Umgang mit Wasserengpasssituationen genutzt werden können.

Diese Empfehlungen sollen eine gesellschaftliche Diskussion über Zielvorstellungen, ein angemessenes Maß an wasserbezogener Versorgungssicherheit sowie die damit verbundenen Kosten-Nutzen-Abwägungen nicht ersetzen, sondern vielmehr einen Beitrag zur Information und Strukturierung dieser zwingend erforderlichen Debatte leisten. Die vorgestellten Ansatzpunkte für praktisches Handeln zielen darauf ab, auf konkrete Herausforderungen und Fragestellungen aufmerksam zu machen, die es im Rahmen dieses Diskurses zu thematisieren und auszuhandeln gilt.

In der vorliegenden Publikation werden die wesentlichen Aspekte und Erkenntnisse des Projekts **aKtlv** kurz und prägnant dargestellt. Die Kapitel sind aufgeteilt in eine kurze Einführung und eine Zusammenfassung der Kernaussagen. Es folgen die abgeleiteten Handlungsempfehlungen sowie ausgewählte Kurzbeispiele aus der Forschung des Projekts. An den entsprechenden Stellen werden zudem PtCs aufgeführt, welche ethische und/oder juristische Aspekte ergänzen.

2 Digitaler Zwilling

Als Digitaler Zwilling wird im Kontext von **aKtlv** eine virtuelle Nachbildung eines physischen Wasserversorgungssystems bezeichnet. Diese digitale Kopie wird durch Echtzeitdaten und Simulationen gespeist und das Verhalten ist durch die folgenden Merkmale gekennzeichnet:

- **Echtzeitüberwachung:** Sensoren und IoT-Geräte sammeln kontinuierlich Daten über die Wasserqualität, Druck, Durchfluss, Umwelt- und andere Parameter. Diese Daten werden in den digitalen Zwilling eingespeist.
- **Vorhersage und Simulation:** Die Kenntnis des Systemzustands unterstützt eine bedarfsgerechte Steuerung und trägt zur Vermeidung von Engpasssituationen bei.
- **Optimierung:** Durch die Analyse der gesammelten Daten können Betreiber das System effizienter gestalten.

In **Abbildung 4** werden die in **aKtlv** verwendeten Datenflüsse und Ströme dargestellt.

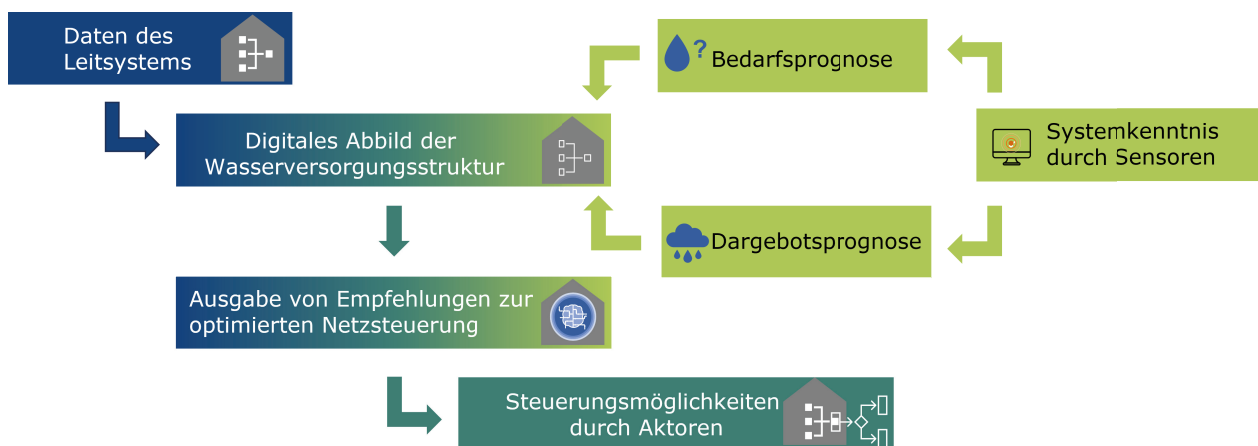


Abbildung 4

Datenflüsse und Funktionsweise des Digitalen Zwillings eines Wasserversorgungssystems.

2.1 Voraussetzungen

Um digitale Lösungen umsetzen zu können, werden zahlreiche Daten benötigt. Grundvoraussetzung für die Entwicklung von praxisnahen technischen Lösungen ist das Prozessverständnis der wasserwirtschaftlichen Anwendung und die Integration der entwickelten Lösungen in die bestehende Infrastruktur. Sensoren generieren Daten für eine Erfassung der Netzzustände in Echtzeit. Mit den entwickelten Prognosen zum Wasserbedarf und -dargebot sowie der identifizierten systemabhängigen Mindestwassermenge werden weitere Randbedingungen für die agile Netzsteuerung generiert. Unter Berücksichtigung der strategischen Schutzziele, wie Versorgungssicherheit, Qualität und Resilienz, können daraus abgeleitete Regelungsvorschläge durch Akteure umgesetzt werden. Sie können Mitarbeitenden in den Leitwarten helfen, den Betrieb der Wasserversorgungssysteme agil anzupassen und somit einen Ausfall der Wasserversorgung oder negative Beeinträchtigungen zu vermeiden.

Kernaussagen

1. Ein Digitaler Zwilling des Versorgungssystems erfordert Datenvorhaltung und Datenpflege.
2. Strategische Schutzziele müssen definiert werden.
3. Systemkenntnis und die Schaffung von Schnittstellen spielen eine wichtige Rolle.

Handlungsempfehlungen

1. Digitale Technikinnovationen können Betriebsprozesse und -abläufe effizienter gestalten und einen Beitrag leisten, um Ressourcen einzusparen. Zudem ermöglicht die echtzeitfähige, automatisierte Erfassung und Übermittlung von Daten zu Betriebsprozessen und -abläufen eine kurzfristige Anpassung an sich verändernde Bedarfe. Die Digitalisierung von Prozessen in der Wasserversorgung bietet Potenziale, um auf krisenhafte Ereignisse und Störungen im Betriebsablauf schneller und effizienter reagieren zu können. Neben diesen Chancen müssen aber auch die Risiken solcher Digitalisierungsvorhaben sowie das Verhältnis von Kosten und Nutzen betrachtet werden. Insbesondere Trinkwasseranlagen gehören zur Kritischen Infrastruktur, womit der IT-Sicherheit und dem Datenschutz eine besondere Bedeutung zukommt.
2. Zur Erstellung des Digitalen Zwillings des Versorgungsnetzes werden Infrastruktur- und Betriebsdaten des Systems benötigt. Dies erfordert eine systematische Datenvorhaltung und -pflege, idealerweise bereits über einen längeren Zeitraum. Zudem sollte ein Plan zur Erhebung fehlender Daten (Messstellen Abgabe, Messstellen verfügbares Rohwasser) erstellt werden.
3. Der Digitale Zwilling benötigt diverse Schnittstellen, etwa zum hydraulischen Modell des Versorgungssystems, zu den Leitsystemdaten, zu weiteren Messdaten etc. Diese sollten bei der Erstellung mitgedacht und die damit verbundenen Technologien installiert werden.
4. Strategische Schutzziele für Engpasssituationen sollten definiert werden.

Aus der Forschung

Die Definition strategischer Schutzziele ist nicht trivial. Ansatzpunkte dafür könnten zum Beispiel sein: die Versorgung vulnerabler Abnehmer oder die Mindestversorgung von 50 Litern pro Person und Tag ($l \cdot E \cdot d$) für Privathaushalte, 75 Litern pro Bett und Tag für Pflegeheime, 1450 Litern pro Bett und Tag für Krankenhäuser und 140 Litern pro Großviehäquivalent und Tag für Landwirtschaft (KZV, BBK 2016).

2.2 Datenflüsse und -ströme

Die Implementierung eines Digitalen Zwillings erfordert die systematische Erfassung zahlreicher Infrastruktur- und Betriebsdaten. Nur durch eine umfassende Datenbasis können reale Systemzustände präzise abgebildet und für Simulationen, Prognosen und Steuerungsentscheidungen genutzt werden. Ergänzende Sensoren und Aktoren ermöglichen eine kontinuierliche Erfassung der Prozesse, wobei die Integration über Funkverbindungen realisiert werden kann, um Flexibilität und standortunabhängige Datenübertragung sicherzustellen.

Die Vielzahl der Datenflüsse stellt erhöhte Anforderungen an das Datenmanagement. Diese Datenströme müssen strukturiert erfasst und verarbeitet werden, um Konsistenz, Sicherheit und Effizienz der digitalen Anwendungen zu gewährleisten. Ein systematisches Management der Datenflüsse bildet somit die Grundlage für die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit eines Digitalen Zwillings.

Kernaussagen

1. Ein Digitaler Zwilling erfordert zahlreiche Infrastruktur- und Betriebsdaten.
2. Ergänzungen des bestehenden Systems durch Sensoren und Aktoren können durch Funkverbindungen erfolgen.
3. (Zusätzliche) Datenflüsse müssen strukturiert gemanaged werden.

Handlungsempfehlungen

1. Management der Datenflüsse:
Durch zusätzliche Systeme wie Sensoren und IoT-Geräte entstehen erhebliche Mengen an neuen Datenflüssen und Strömen, die zum einen durch die IT-Systeme und -infrastrukturen über den aktuell üblichen Rahmen hinaus erfasst, abgebildet und verarbeitet werden müssen. Dies erfordert ggf. eine Erweiterung der IT-Systeme und -Infrastrukturen zur vernetzten Sensorik, zur Abbildung der Daten und Datenverarbeitung, sowie zur Wartung und Instandhaltung der Systeme.
2. Neue Systeme bedingen eine Änderung im Asset- und Betriebsmanagement. Mitarbeiter*innen sollten frühzeitig mit einbezogen werden, um Akzeptanz im innerbetrieblichen Umfeld zu schaffen.
3. Datenströme des Versorgungssystems lassen sich in Dargebots- und Bedarfsseite einteilen. Besonders die Bedarfsseite wird oft wenig detailliert erfasst (vergleiche [Abbildung 5](#)). Um die Wasserversorgung resilienter zu gestalten, werden mehr Informationen auf der Bedarfsseite benötigt. Die Anbindung zusätzlicher Sensoren kann z. B. per Funk erfolgen und batteriebetrieben umgesetzt werden.
4. Als Funktechnologien für die Verbindungen der Datenflüsse und -ströme eignen sich aktuell vor allem nachfolgende (siehe [Tabelle 1](#)):

Tabelle 1

Gegenüberstellung gängiger Funktechnologien für den Einsatz der Datenübermittlung im Feld

	LoRaWAN	MIOTY	NB-IoT	LTE-M
Eigene Infrastruktur	Ja	Ja	Nein	Nein
Sicherheit	Hoch	Hoch	Sehr Hoch	Sehr Hoch
Datenrate	Niedrig	Niedrig	Niedrig-Mittel	Mittel
Schwarzfallfestigkeit nachrüstbar	Ja	Ja	Nein	Nein

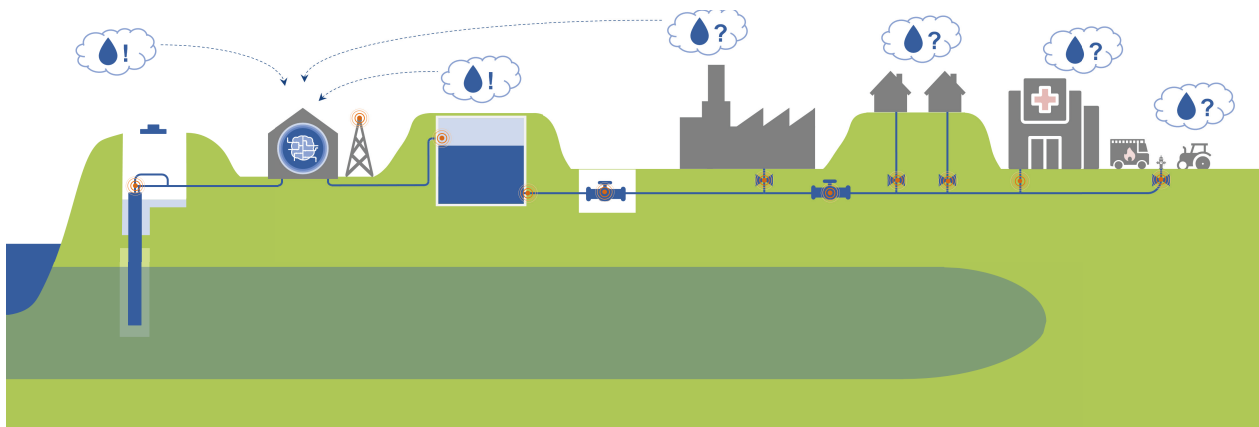


Abbildung 5

Schematische Darstellung vorhandener und nicht vorhandener Datenflüsse im Wasserversorgungssystem.

Aus der Forschung

Wenn neue Datenflüsse und -ströme entstehen und eine drahtgebundene Lösung mit höheren Kosten z. B. durch Verlegung der nötigen Datenkabel verbunden sind, ist das Retrofit (Nachrüsten) von Fernwirktechnik ein probates Mittel, um Funktechnik zur Datenübermittlung zu nutzen.

Um die Funktechnik optimal auf das Einsatzspektrum vorbereiten zu können, ist es ratsam eine Funknetzplanung durchzuführen. Ein Beispiel aus **aKtiv**: Umweltsensoren (Bodenfeuchte, Pegel, Grundwasserstände, Wetter) sollten im Bereich des Rheins ausgebracht werden. Dazu wurde zunächst eine Position der Empfangsanlage, im Beispiel ein Gateway, und der Sensor genutzt, um die erwartete Empfangs- und Sendeleistung und Standort zu bestimmen. Die **Abbildung 6** zeigt links die Funknetzplanung für den Standort und rechts eine Messung (Wireless Site Survey).



Abbildung 6
Funknetzplanung (links) und Wireless Site Survey (rechts)

Der rot markierte Bereich zeigt sowohl in der Funknetzplanung als auch in der Messung keine Abdeckung. Potenzielle Lösung können mit Systemanbietern besprochen werden. In diesem Fall hat eine andere sowie eine höhere Positionierung der Sende-/Empfangsantenne dazu beigetragen, den Standort zu erschließen.

Neben der Erschließung von möglichen Standorten für Sensor und Aktoren, wird die Funknetzplanung auch dazu benötigt, den möglichst optimalen Standort für funktechnische Anlagen zu ermitteln. **Abbildung 7** zeigt zwei Standortoptionen, die evaluiert wurden. Rechts ist ein nicht optimaler Standort zu sehen, die Abdeckung beträgt hier lediglich 46%. Eine Steigerung der Funkabdeckung auf 77% konnte links durch die Wahl eines anderen Standorts erreicht werden.

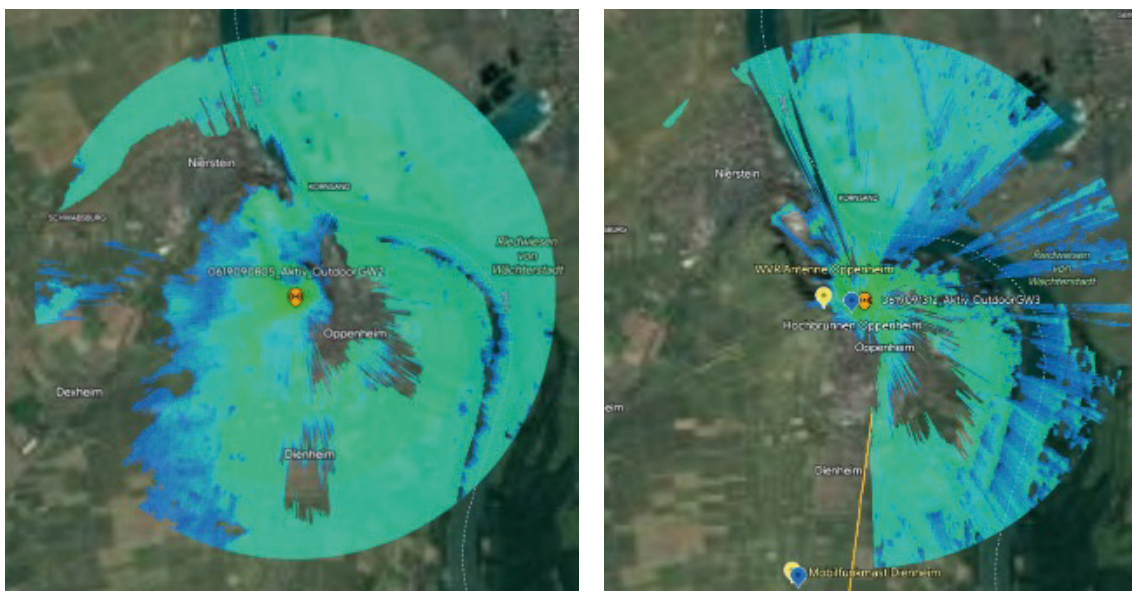


Abbildung 7
Untersuchung der optimalen Standortabdeckung.

In der Praxis bedeutet dies, dass mit einem optimalen Standort weniger Funkanlagen benötigt werden, die Zuverlässigkeit der Funkanbindung erhöht und die Kosten insgesamt reduziert werden können.

2.3 Erweiterte Systemkenntnis: Monitoring von Wasserdargebot und -bedarf

Ein wirksames und vorausschauendes Wassermanagement erfordert nicht nur eine ausreichende Ressourcengrundlage sondern auch ein tiefes Verständnis über deren zeitliche und räumliche Dynamik. Durch den Einsatz moderner Messtechnologien kann die Verfügbarkeit von Wasserressourcen kontinuierlich erfasst und mit dem tatsächlichen Verbrauch in Beziehung gesetzt werden. Dadurch lassen sich Ungleichgewichte zwischen Dargebot und Bedarf frühzeitig erkennen und fundierte technische und organisatorische Entscheidungen treffen. Eine fortlaufende Erweiterung der Systemkenntnis ist daher entscheidend, um Entwicklungen im System zuverlässig abzubilden und die Anpassungsfähigkeit der Wasserversorgung langfristig zu sichern.

Kernaussagen

1. Ein effektives Dargebotsmonitoring, also die Überwachung des Zustands der Rohwasserressource, ist ein essenzieller Baustein für eine resiliente Wasserversorgung. Die kontinuierliche Überwachung der Verfügbarkeit von Wasserressourcen und die Nutzung moderner Messmethoden ermöglichen eine frühzeitige Erkennung potenzieller Mangellagen.
2. Das Monitoring von Bedarfen kann bis auf Hausanschlussebene erfolgen. Dabei sind rechtliche Vorgaben zwingend zu beachten. Umso feingranularer das Bedarfsmonitoring erfolgt, umso präziser können im nächsten Schritt Bedarfsprognosen erstellt werden. Hierbei sind Aufwand, Nutzen und Risiken abzuwägen. Siehe hierzu auch Abschnitt 2.4.
3. Das Monitoring des Netzzustands ist notwendig, um eine Übersicht über die Kapazitäten der Betriebsmittel zu bewahren. Dies muss in die Planung der Steuerung integriert werden, um fundierte Entscheidungen treffen zu können.

Handlungsempfehlungen

1. Dargebotsmonitoring:
Zur Überwachung der Rohwasserverfügbarkeit bietet sich die Verwendung entsprechender Sonden (Bodenfeuchtigkeit, Pegel, Grundwasser, Brunnen, etc.) an. Diese können bei Bedarf, wie in Abschnitt 2.2 beschreiben, Daten per Funk übermitteln. Das Dargebotsmonitoring ist ein essenzieller Baustein zur Prognose künftiger Rohwasserverfügbarkeit. Bei der Auswahl und Installation der Sensoren sollte beachtet werden, das Messnetz anhand der Kritikalität der Betriebspunkte mit Sensortechnik auszustatten.
2. Bedarfsmonitoring:
Auch die Wasserabgabe in das Verbrauchsnetz sollte überwacht werden. Dabei lässt sich die Granularität des Monitorings unterscheiden. Zum einen kann die Abgabe in einzelne Versorgungszonen überwacht werden, die Granularität kann aber auch bis hin zum Monitoring einzelner Hausanschlüsse erhöht werden. Dabei sind gesetzliche Vorgaben zum Datenschutz zu beachten.
3. Monitoring des Netzzustands:
Für informierte Netzsteuerungsentscheidungen und Planung zukünftiger Steuerungen ist eine möglichst gute Kenntnis des aktuellen Netzzustandes nötig. Wichtige Betriebsdaten sind hier u.a. Behälterstände oder aktuelle Einschränkungen im Netz, beispielsweise durch Wartungen oder Rohrbrüche. Sind aktuelle Behälterstände nicht verfügbar, kann eine Abschätzung über gemessene Flussmengen erfolgen, wobei eine Fehlerabschätzung entscheidend für die Zuverlässigkeit der Ergebnisse ist. Die zeitgerechte Verfügbarkeit der Daten ist dabei essenziell.

Aus der Forschung: Verfügbarkeit von Uferfiltrat

Die Verfügbarkeit von Rohwasser wird durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst, darunter klimatische Veränderungen, hydrologische Bedingungen und geologische Gegebenheiten. Die Identifikation und Analyse der relevanten Umwelteinflussparametern ist daher notwendig, um ein fundiertes Verständnis über deren Auswirkungen auf das Wasserdargebot zu gewinnen. Besonders im Fokus stehen dabei:

- Veränderungen der Niederschlagsmengen und -verteilung
- Temperaturentwicklungen und deren Einfluss auf Verdunstung und Grundwasserneubildung
- Veränderungen im Abflussverhalten von Oberflächengewässern
- Verfügbarkeit von Uferfiltrat als primäre oder zusätzlicher Rohwasserquelle

Im untersuchten Versorgungsgebiet ist die Verfügbarkeit des Uferfiltrats direkt abhängig von den Wasserständen des Rheins, der durch Regen, Schnee und Schmelzwasser der Alpengletscher gespeist wird (vergleiche [Abbildung 8](#)). Vor diesem Hintergrund ist es unerlässlich, die Dynamik des Rheinwasserstandes und die damit verbundenen Veränderungen der Verfügbarkeit von detailliert zu erfassen. Dies erfordert eine kontinuierliche Messung und Analyse relevanter Umweltparameter sowie eine optimierte Sensorik zur Überwachung der Wassergewinnungsanlagen.

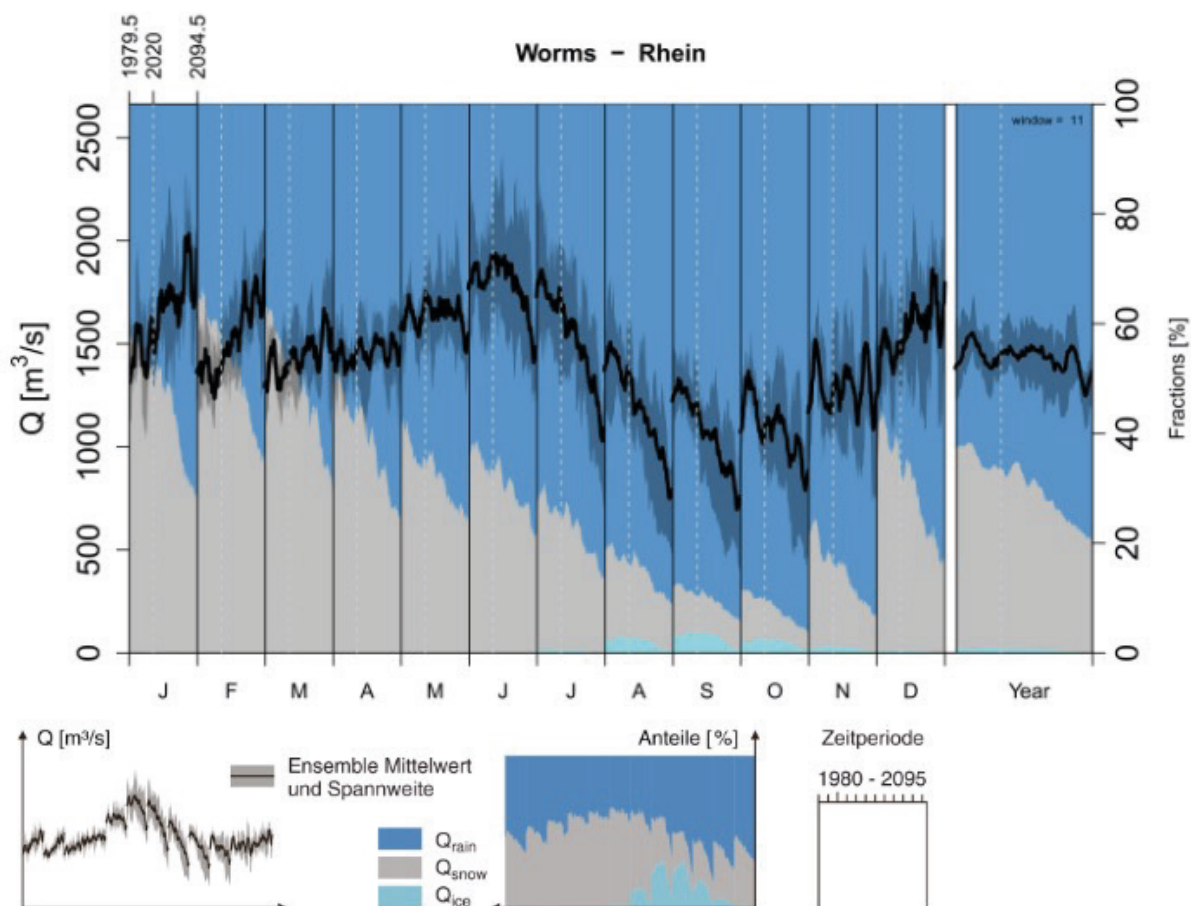


Abbildung 8

Zeitreihen der modellierten Abflüsse und der prozentualen Anteile der Abflusskomponenten Regen (Q_{rain}), Schnee (Q_{snow}) und Eis (Q_{ice}) für jeden Monat des Jahres sowie für die jährlichen Werte (11-jährige gleitende Mittel von 1980-20195). Die Abflussanteile der Komponenten entsprechen dem Ensemble Mittelwert (Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, 2022).

Das Monitoring des Grundwasserhaushalts hat neben der Ableitung des verfügbaren Wasserdargebots weitere Vorteile. Durch die regelmäßige Überwachung des Grundwasserspiegels kann dokumentiert und beobachtet werden, ob und wie sich die Wasserförderung auf das umliegende Gebiet bzw. Ökosystem auswirkt. Weiterhin kann durch das Monitoring der Absenkung und der Rohwasserentnahme durch Förderbrunnen ein Konzept zum nachhaltigen und systemschonenden Betrieb der Anlagen abgeleitet werden.

Aus der Forschung: Messung von Hausanschlussbedarfen

Die Installation von Sensoren bei Endabnehmer*innen sowie die Erhebung von Wasserverbrauchsdaten bedürfen rechtlicher Grundlagen. Hinsichtlich des Einbaus von Sensoren auf Privatgrundstücken findet sich eine solche in den landesgesetzlichen Vorschriften zum Anschluss- und Benutzungszwang. Handelt es sich bei den erhobenen Verbrauchsdaten um personenbezogene Daten, also Daten, die Rückschlüsse auf Gewohnheiten und Vorlieben der Abnehmer zulassen, fehlt nach jetzigem Stand eine ausreichende Grundlage im nationalen Recht. Parallel ist in diesem Fall die unionsrechtliche Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) einschlägig, die Anforderungen zu Zweckbindung, Rechtmäßigkeit der Datenverarbeitung, Datenminimierung, Speicherbegrenzung, Treu und Glauben, Transparenz, Datenrichtigkeit sowie zu Integrität und Vertraulichkeit der Datenverarbeitung enthält. Allgemein empfiehlt es sich, die erhobenen Daten frühestmöglich zu anonymisieren und den Personenbezug dauerhaft zu beenden. Ab diesem Zeitpunkt ist die DSGVO nicht mehr anwendbar. Siehe hierzu ausführlich Beh (2025,a).

2.4 Erstellung und Nutzung von Prognosen mit Hilfe des Einsatzes von KI

Die Implementierung von (KI-gestützten) langfristigen, saisonalen und kurzfristigen Prognosemodellen auf der Grundlage der gesammelten Daten ermöglicht die Identifizierung und Vorhersage von Trends in der Wasserverfügbarkeit und Trinkwasserbedarf (z. B. Schwankungen des Brunnenwasserstands, Veränderungen im natürlichen Wasserhaushalt, Lastspitzen) sowie die Betrachtung von Zukunftsszenarien. Kontinuierliche Anpassung und Verbesserung der Prognosemodelle ist erforderlich, um die Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu erhöhen.

Kernaussagen

1. Die Rohwasserressource ist aufgrund des Klimawandels zukünftig ggf. nicht unbegrenzt verfügbar.
2. Die Prognosen von Wasserbedarfen sind essenziell, um das Wasserversorgungssystem agil steuern zu können.
3. Die Bedarfe sind direkt abhängig vom Wetter. Hohe Temperaturen erhöhen den Bedarf, wohingegen Niederschläge zu sinkenden Bedarfen führen. Darüber hinaus spielen Kalenderdaten (z. B. Wochentag, Ferien) und andere Faktoren eine Rolle.

Handlungsempfehlungen

1. Das Monitoring der Rohwasserressource bietet die Möglichkeit, dessen Verfügbarkeit zu prognostizieren. Durch die Verknüpfung der prognostizierten Menge an Flusswasser mit dem Wasserstand in den Gewinnungsanlagen kann bei Uferfiltratgewinnungen das verfügbare Rohwasser prognostiziert werden. Dies ist besonders bei schwankenden Flusspegeln und -abläufen relevant.
2. Bedarfsprognosen sind erforderlich, um die benötigte Wassermenge zur Abgabe an die Abnehmer*innen abschätzen zu können. Bei veränderten Rohwasserverfügbarkeiten besteht so die Möglichkeit, durch agile Steuereingriffe die Wasserbedarfe auch bei veränderten Bedingungen decken zu können. Die Bedarfsprognose eignet sich beispielsweise in Form von Tagesganglinien (Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Wasserabgabe). Der Wasserbedarf jeder Versorgungszone kann durch die Erfassung von Verbrauchsdaten mittels IoT-basierter Erfassungssensoren (z. B. durch Zonenmessungen am Hochbehälterablauf) und entsprechenden Prognosemodellen ermittelt werden.
3. Werden Prognosedaten für Steuerungsentscheidungen genutzt, sollte Auskunft über die erstellende Organisation, die Datengrundlage der Prognose, die Art und den Umfang des Einsatzes von KI und den Stellenwert der Prognose gegeben werden. Dies gilt insbesondere hinsichtlich der Gestaltung von Benutzeroberflächen in Softwareanwendungen. Es trägt dazu bei, dass Mitarbeiter*innen der Leitstellen wohlinformierte Entscheidungen treffen können.

Aus der Forschung: Verfügbares Rohwasserdargebot

Monatliche bis saisonale Abflussvorhersagen sind für die Trinkwasserversorgung von Bedeutung. Darüber hinaus hilft das Vorwissen über mögliche Anomalien des Abflusses den Beteiligten, die Wassernutzung zu optimieren, wirtschaftliche Verluste zu minimieren und die Risiken von Extremereignissen wie Überschwemmungen und Dürren zu mindern. Die derzeitigen numerischen Wettervorhersagesysteme sind zwar hochentwickelt, verlieren aber in der Regel nach etwa zwei Wochen einen erheblichen Teil ihrer Vorhersagekraft. Diese Einschränkung ergibt sich aus der chaotischen Natur der Atmosphäre: Kleine Unsicherheiten in den Anfangsbedingungen wachsen im Laufe der Zeit exponentiell an und machen deterministische Vorhersagen über den mittleren Bereich hinaus unzuverlässig.

Klassische hydraulische Modelle der Flussabflüsse in Verbindung mit Wettervorhersagen und Niederschlags-Abfluss-Modellen haben daher nur einen sicheren Vorhersagehorizont von gut zwei Wochen an den großen Flusssystemen. Infolgedessen haben diese Modelle Schwierigkeiten, zuverlässige Vorhersagen für hydrologische Variablen auf monatlicher bis saisonaler Ebene zu liefern.

Statistische Methoden für saisonale Abflussvorhersagen umgehen diese Herausforderungen oft, indem sie historische Daten, beobachtete Telekonexionen und langsam schwankende Klimasignale wie die El Niño-Southern Oscillation nutzen. Da bestimmte großräumige Klimamerkmale über mehrere Monate hinweg bestehen bleiben und das Wettergeschehen beeinflussen können, dienen sie als stabilere Prädiktoren für saisonale Vorhersagen. Indem sie sich auf diese bekannten Beziehungen stützen, können statistische Vorhersagetechniken auch bei längeren Vorlaufzeiten ihre Fähigkeiten beibehalten und übertreffen damit in vielen Regionen dynamische Kurzzeitvorhersagen. Daher wurde in **aktiv** ein mittel- bis langfristiges Vorhersagesystem (von einem bis zu sechs Monaten) für die wichtigsten Flüsse in Deutschland (z. B. Rhein und Elbe) entwickelt und gepflegt. Dieses System wurde während des gesamten Projekts im operationellen Modus getestet, wobei zu Beginn jeden Monats eine Vorhersage für den jeweiligen Monat bzw. die jeweilige Jahreszeit ausgegeben wurde (vergleiche [Abbildung 9](#)).

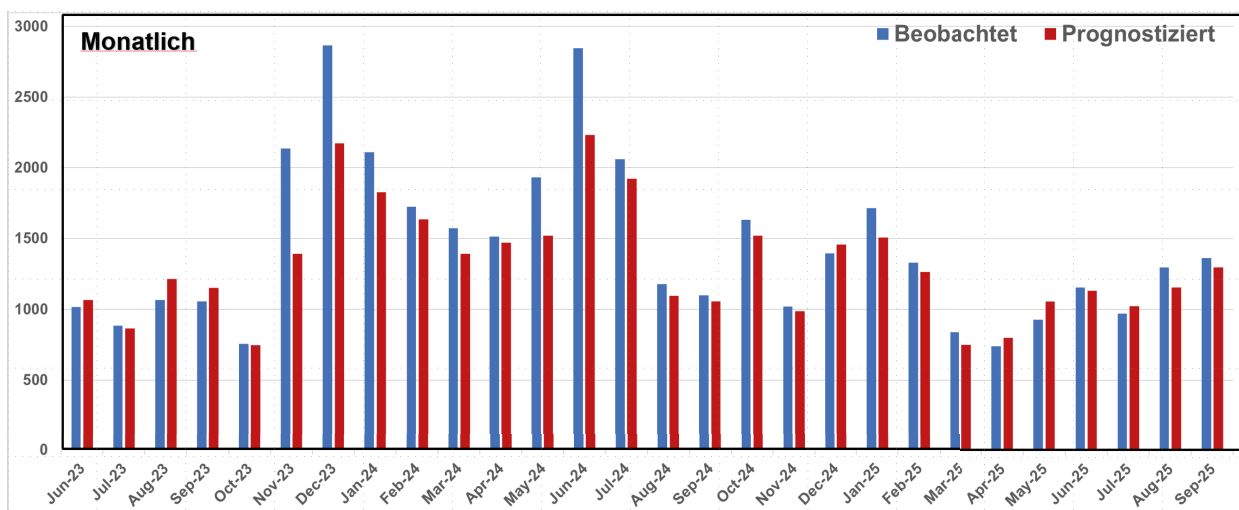


Abbildung 9

Auswertung der monatlichen Prognose am Pegel Worms für den Zeitraum Juni 2023 bis September 2025. Die blauen Balken zeigen den beobachteten monatlichen Abfluss an, während die roten Balken den prognostizierten monatlichen Abfluss anzeigen.

Das statistische Modell hat eine hohe Kompetenz, insbesondere für die Monate/Jahreszeiten mit geringem Abfluss und während langfristiger Dürreperioden. Für die Monate, die durch Hochwasser gekennzeichnet sind, ist die Fähigkeit der Vorhersage schlechter, da das Modell für die Vorhersage des monatlichen und saisonalen Abflusses trainiert wurde. Da die Häufigkeit und das Ausmaß hydrometeorologischer Extremereignisse (z. B. Hitzewellen, Dürren, Starkregen) vor allem in den letzten zehn Jahren erheblich zugenommen haben, könnte dies auch die Fähigkeit der monatlichen/saisonalen Vorhersage beeinträchtigen, da solche Ereignisse beispiellos sind und es beim Training des Vorhersagemodells keine Analoga in der Vergangenheit gibt. Daher ist es sehr schwierig, das Ausmaß von Extremereignissen (z. B. das Hochwasser im November 2023) richtig vorherzusagen. Insgesamt gibt es keine allgemeine Regel für die Über- oder Unterschätzung des beobachteten Abflusses, was bedeutet, dass die Genauigkeit der Vorhersage stark davon abhängt, wie variabel der Zustand der großräumigen atmosphärischen Zirkulation ist. Dennoch konnte eine 1-wöchige und eine 2-wöchige Vorhersage für Abfluss des Rheins in Worms getestet werden (vergleiche [Abbildung 10](#)). Die Fähigkeit der Vorhersage für hochwassergefährdete Situationen nimmt zu, wenn das Vorhersagefenster verkleinert wird. Auch eine Vorhersage für den monatlichen Wasserbedarf wurde getestet, aber wegen der großen Unsicherheiten in den Daten befindet sich das Modell zum Zeitpunkt dieser Veröffentlichung noch in der Entwicklung.

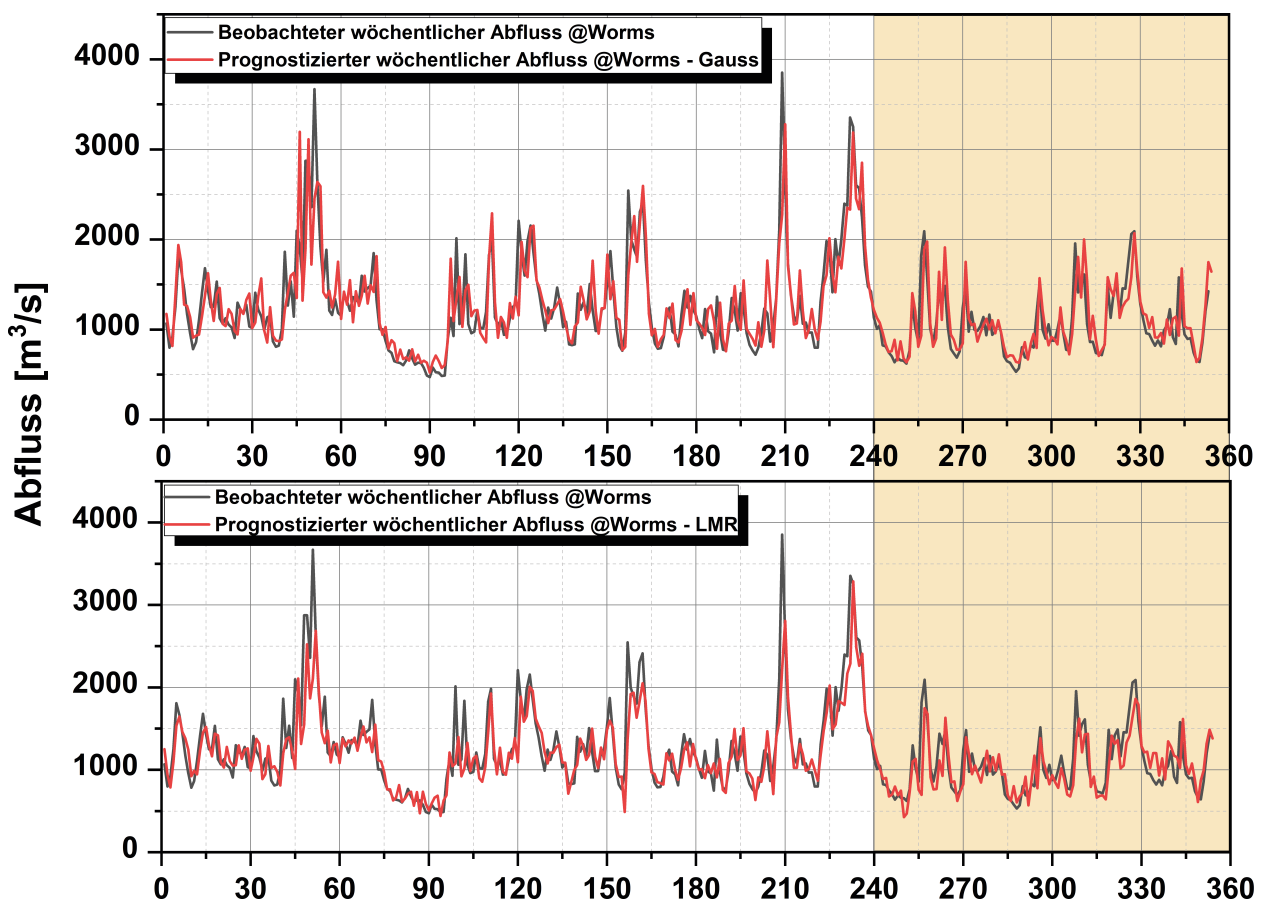


Abbildung 10

Die Auswertung der wöchentlichen Prognose am Pegel Worms. Die schwarze Linie zeigt den beobachteten Abfluss, während die rote Linie den prognostizierten wöchentlichen Abfluss angibt. Das obere Feld basiert auf dem Ansatz des maschinellen Lernens, während das untere Feld in auf einem linearen Regressionsmodell basiert.

Aus der Forschung: Prognose des Bedarfs von Versorgungszonen

Bei Bedarfsprognosen wird zwischen kurzfristiger und langfristiger Prognose unterschieden. Kurzfristige Bedarfe sind direkt abhängig vom Wetter. Hohe Temperaturen erhöhen den Bedarf, wohingegen Niederschläge zu sinkenden Bedarfen führen. Darüber hinaus spielen Kalenderdaten (z. B. Wochentag, Ferien) und andere Faktoren eine Rolle, welche in den Bedarfsprognosen zu berücksichtigen sind, dies ist in **Abbildung 11** dargestellt. Prognosen der Verbrauchswerte werden unter Verwendung von Parametern mit hoher Korrelation durchgeführt.

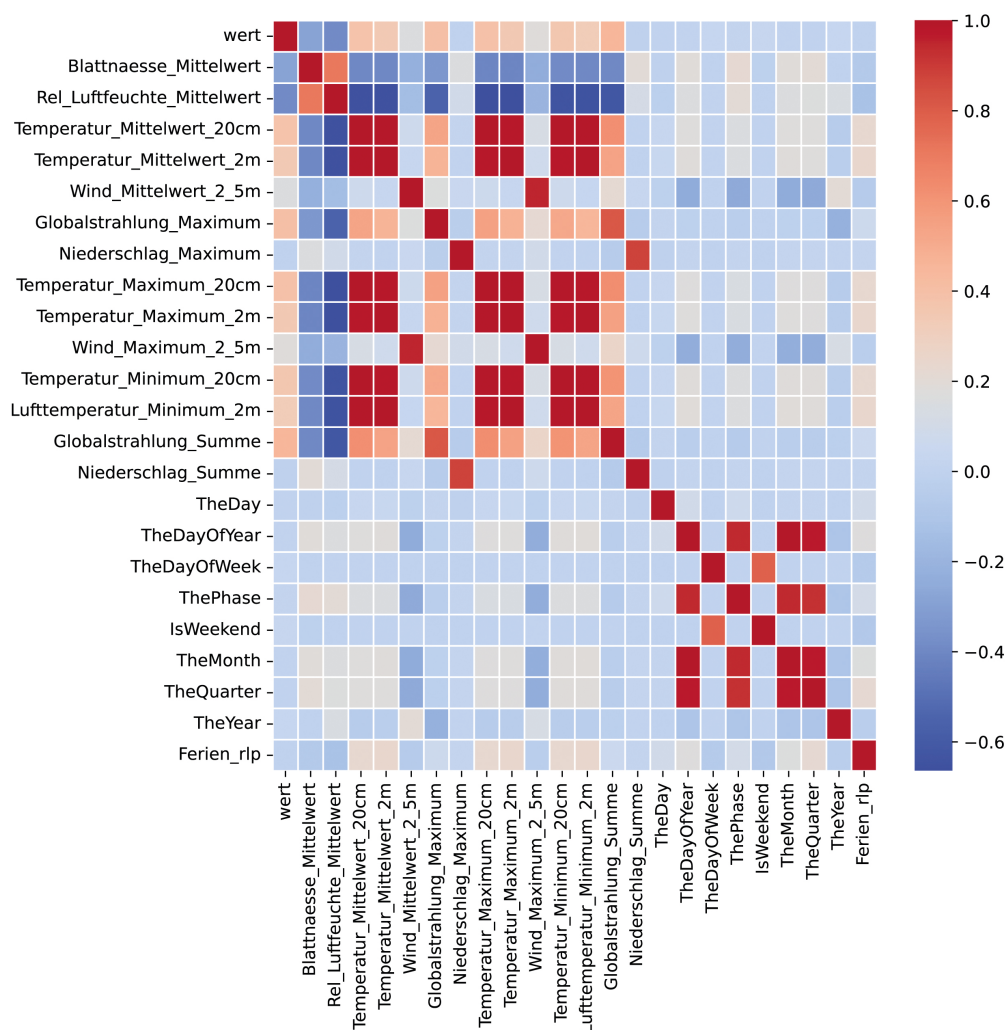


Abbildung 11

Korrelationsplot aller eingehenden Parameter für eine kurzfristige Bedarfsprognose am Beispiel eines Speicherbehälters.

Für die Erstellung der Prognose eignet sich ein Machine-Learning-Modell. Die für das Prognosemodell notwendigen Verbrauchsdaten stammen aus den Leitsystemdaten wurden durch weitere Informationen wie Wetter- und Kalenderdaten ergänzt. Die Zeitreihen für die Modellierung basieren auf historischen Daten sowie auf Open-Data-Werten des Deutschen Wetter Dienstes und GEO-BOX.

Bei den Fragestellungen, welche Faktoren und welche Machine-Learning-Algorithmen verwendet werden, stellen die Automatisierung der Datenflüsse und die Ersatzwertbildung bei fehlenden Daten eine große Herausforderung dar.

Sind alle Daten konsistent, bleiben die üblichen Deep-Learning-Fragen offen:

- Wie oft müssen die Modelle trainieren, um die Qualität zu halten?
- Müssen die gewählten Ansätze revidiert werden?

Hinsichtlich des Trainings von KI-Algorithmen sind die genutzten Daten kritisch auf ihre (quantitative und qualitative) Repräsentativität für die jeweiligen Einsatzorte hinzuprüfen. Im Rahmen der Entwicklung wurden unterschiedliche methodische Ansätze entwickelt, um den Stundenverbrauch zu prognostizieren. Dabei wurden unterschieden zwischen:

- Trainierte KI-Daten auf Basis der Vergangenheit
- Trainierte KI-Daten in Kombination mit Prognosewerten

Siehe ausführlich hierzu Pikos et. al (2026).

Aus der Forschung: Nutzung von Prognosen

Ein Grundbaustein für jede Optimierungsbestrebung des Versorgungsnetzes ist das Vorhandensein von Prognosedaten über Wasserentnahmen. Mit der genaueren Erfassung von Entnahmedaten stellen sich jedoch einige ethisch bedeutsame Fragen:

■ Datenqualität

Sensoren, die dazu dienen Wasserverbräuche zu erfassen, sind, wie andere Sensoren auch, fehleranfällig. Sollen zukünftig beispielsweise Smart-Meter zum Einsatz kommen, ist sicherzustellen, dass (rechtliche) Verantwortungen bezüglich möglicher Messfehler klar bestimmt werden.

■ Datenschutz und Datensicherheit

Wie bereits andere Bereiche, wie etwa die Stromversorgung oder Ortungsdaten zeigen, erlaubt auch die genauere Erfassung von Wasserentnahmen möglicherweise Rückschlüsse auf sensible mitunter personenbezogene Daten zur individuellen Verfassung und Verhaltensweisen. Um Benachteiligungen und Missbrauch zu verhindern, genießen diese Daten, insbesondere im Kontext der Europäischen Union und vor dem Hintergrund der DSGVO, einen besonderen Schutz. Sollen derartige Daten erhoben werden, ist erstens zu prüfen, welche Daten notwendig sind, um das geplante Ziel einer Erhöhung der Resilienz in der Wasserversorgung zu erreichen und ob personenbezogenen überhaupt Daten notwendig sind. Damit verbunden ist zu überlegen, welche Granularität von Daten nötig ist, ob es abnehmerspezifischer Aussagen bedarf oder ob auch aggregierte Daten genutzt werden können. Bei der Verwendung detaillierter Daten ist zweitens ist transparent zu machen, wie sie erhoben, verarbeitet und gespeichert werden und wer darauf in welchem Maße Zugriff hat. Drittens sind angemessene (technische) Sicherheitsmaßnahmen zu ergreifen, um die Daten vor unbefugten Zugriffen durch Dritte zu schützen.

Um die Angemessenheit einer Datenerhebung und -nutzung zu bestimmen, wird nahegelegt, politische Deliberationsprozesse zu initiieren, in denen zusammen mit Expert*innen und Vertreter*innen vielfältiger Kundengruppen kritisch über eine Passung von (resilienzbezogenem) Mehrwert, (datenbezogenen und finanziellen) Kosten sowie (neuen) Risiken diskutiert wird. Ergänzend dazu ist frühzeitig zu überlegen, welche weitere Akteur*innen Interesse an diesen Daten haben könnten, inwieweit diese Interessen legitim sind und welche (technischen, sozialen oder rechtlichen) Maßnahmen in diesem Sinne ergriffen werden sollten. Die Anforderung an die technische Lösung, die sich hieraus ergibt, ist Datensparsamkeit. In der in **aKtiv** entwickelten Lösung werden keine personenbezogenen Daten verarbeitet, die Bedarfsprognosen wurden auf Ebene der Zonenverbräuche erstellt.

Aus der Forschung: Anforderungen der KI-Verordnung

Die agile Netzsteuerung unterfällt als Hochrisiko-KI-System der unionsrechtlichen KI-Verordnung. Im Einzelfall ist besonderes Augenmerk auf die Ausnahmetatbestände des Art. 6 Abs. 3 KI-VO zu legen, die die Anwendbarkeit ggf. ausschließen können.

Mit der Anwendbarkeit der EU-KI-Verordnung sind zusätzliche Anforderungen an die agile Netzsteuerung verbunden, u.a. zu Zweckbindung, Trainings-, Validierungs- und Testdatensätzen, zu Inputdaten und Transparenz sowie zur Genauigkeit, Robustheit und Cybersicherheit. Zur Einhaltung verpflichtet sind die Gemeinden bzw. je nach Organisationsstruktur im konkreten Fall die Versorger als Betreiber des KI-Systems. Siehe ausführlich hierzu Beh (2025, a).

2.5 Optimierung der Netzsteuerung zur Entscheidungsunterstützung

Mathematische Optimierungsmodelle werden verwendet, um dynamische Steuerungsvorschläge für die Aktoren von Trinkwassernetzen zu bestimmen. Im Vergleich zu herkömmlichen, auf lokalen Regeln basierten Steuerungen, werden hierbei alle Einflussgrößen und Zustände berücksichtigt und so das bestmögliche Ergebnis für das Gesamtsystem erhalten. Die Optimierung kann sowohl für die Analyse von theoretischen Szenarien (Berücksichtigung verschiedener Versorgungssituationen und klimatischer Extremszenarien), wie auch für den Echtzeitbetrieb genutzt werden. Die Vorschläge sind reproduzierbar und nachvollziehbar.

Kernaussagen

1. Eine mathematische Optimierung der Netzsteuerung kann bestmögliche dynamische Steuerungseingriffe vorschlagen.
2. Die Qualität der Optimierungsvorschläge hängt direkt von der Verfügbarkeit und Qualität der Infrastruktur- und Betriebsdaten des betrachteten Netzes ab. Ein gut ausgebautes Sensor- und Aktornetz erhöht das Optimierungspotenzial.
3. Beim Einsatz von KI ist auf Transparenz und Nachvollziehbarkeit zu achten.

Handlungsempfehlungen

1. Vorhandene dynamische Steuermöglichkeiten müssen evaluiert werden. Welche fernsteuerbaren Elemente (Pumpen, Schieber, Ventile, Klappen) sind bereits vorhanden? Zusätzliche Sensorik und Aktorik im Netz erhöhen Möglichkeitsraum, Agilität und die Robustheit der Steuerungsoptimierung. Die Bestimmung optimaler zusätzlicher Standorte ist dabei möglich.
2. Das Ziel der Optimierung muss vorab definiert werden und die konkrete Zielgröße messbar sein. Wenn verschiedene Ziele in Konkurrenz zueinanderstehen, beispielsweise Resilienz gegenüber Effizienz, sind begründete Abwägungen zu treffen.
3. Optimierung im Normalbetrieb: Im Normalbetrieb (außerhalb von Engpasssituationen), können anstelle der Verteilungsoptimierung andere Kriterien herangezogen werden. Möglich sind hier unter anderem
 - Minimale Energiekosten: Verlagerung der energieintensiven Prozesse (Pumpen) in Zeiten günstigen Stroms
 - Möglichst gleichmäßiger Betrieb: Vermeidung von Lastspitzen an Brunnen und Wasserwerken, Schonung der Netzinfrastruktur

4. Die Optimierung bedarf gewisser Freiheitsgrade, beispielweise muss eine Wassermenge zur freien Verteilung stehen. Speicherkapazitäten sind jedoch aus wirtschaftlichen und hygienischen Gründen oft nicht so ausgelegt, dass Volumen frei verfügbar ist. Daher bedarf es einer Festlegung von Sicherheitsreserven und „Spiel“ im Behälter: Muss der Behälter immer komplett gefüllt werden oder reicht eine Füllmengen von x% aus, wenn die Bedarfsprognose kein Fehlvolumen bei Abnehmer:innen prognostiziert? Kann das einsparbare Volumen an einer anderen Stelle im System sinnvoller verwendet werden und lässt es sich an eine andere Stelle transportieren?
5. Beim Einsatz von KI muss darauf geachtet werden, dass eine Verständlichkeit von Algorithmen und der finalen Daten gewährleistet ist. Beim Einsatz von KI in der Wasserversorgung sollte auf vollautomatisierte Entscheidungen, wenn möglich, verzichtet werden und Letztentscheidungen immer bei Menschen liegen. Hierfür ist bei der Präsentation der Steuerungsvorschläge darauf zu achten, dass die Konsequenzen des Eingriffs absehbar sind. Abzuwägen ist außerdem das Potential zur Erhöhung der Resilienz der Wasserversorgung durch den Einsatz von KI mit dem Potential zur Gefährdung dieser Resilienz durch beispielsweise Erhöhung von cybersicherheitsbezogenen Risiken. Diesbezüglich sind zudem entsprechende Sicherheitsstandards einzuhalten

Aus der Forschung:

Vorgehen und Funktionsweise: Optimierung allgemein

Mathematische Optimierung ist ein Verfahren, mit dem aus einer großen Anzahl an Möglichkeiten die bestmögliche mittels eines effizienten Algorithmus bestimmt wird. Damit ist es möglich auch dann die optimale Lösung zu finden, wenn Testen und Vergleichen aller individuellen Möglichkeiten wegen der großen Anzahl unmöglich ist. Beispielsweise ergeben sich im Pilotgebiet durch eine Betrachtung von 24 Zeitschritten und 14 Pumpen bereits $2^{24 \cdot 14} \approx 10^{100}$ (also eine 1 mit 100 Nullen!) Steuerungsvarianten, die nicht alle einzeln berechenbar sind.

Für die Optimierung wurde ein Modell entwickelt, welches die nichtlineare Physik des Wassers (Hydraulik) und die Funktionsweise der diskretisierten Elemente abbildet. Zusätzlich werden Rahmenbedingungen wie Mindestbehälterstände und die möglichen Steuerungsoptionen spezifiziert. In diesem Beispiel sind insbesondere Pumpensteuerungen zu nennen. Zusätzliche Aktoren und Flexibilität ermöglichen zusätzliche Möglichkeiten.

Im Echtzeitbetrieb wird dann die optimierte Steuerung des Netzes bestimmt. Für den gewählten Zeitrahmen werden der Startzustand des Netzes (Behälterstände) und Zeitreihen der Bedarfe als Nebenbedingungen vorgegeben. Anschließend wird für den gegebenen Netzzustand und die prognostizierten Bedarfe die bestmögliche Steuerung bestimmt. Der Optimierungsalgorithmus bestimmt nun effizient diejenige Lösung, welche unter maximaler Effizienz die Bedarfe erfüllt, oder alternativ in Engpasssituationen das zur Verfügung stehende Wasser möglichst zielgerichtet an die priorisierten Abgabestellen leitet, und zudem auch alle Nebenbedingungen erfüllt, also hydraulisch zulässig ist (vergleiche [Abbildung 12](#)).

Hierfür kann die Optimierungslösung beispielsweise geänderte Pumpenfahrpläne bestimmen, um Spitzenlasten zu begegnen. Zur Definition der Optimalität der Steuerung können verschiedene Kriterien herangezogen werden. Im Normalbetrieb kann dies eine möglichst geringe Lastspitze oder möglichst geringe Energiekosten sein, für Engpasssituationen wurden im Projekt verschiedene Kriterien erarbeitet.

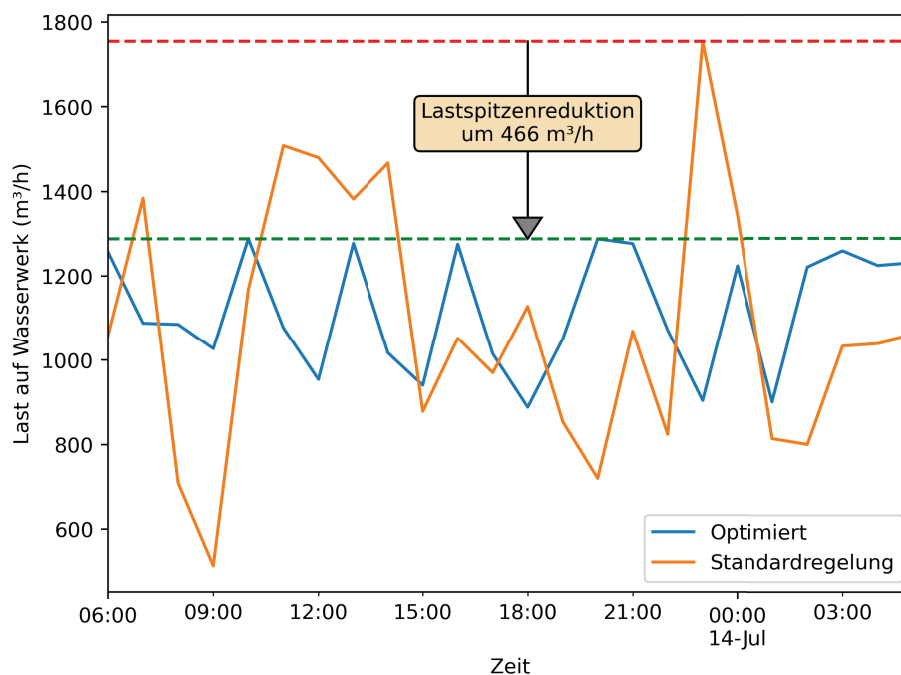


Abbildung 12

Beispielhafte Optimierung der Steuerung im Normalbetrieb. Durch eine gleichmäßigere Fahrweise kann die Lastspitze am Wasserwerk deutlich reduziert werden.

Zielsetzungen der Optimierung in einer Engpasssituation

Ausgangspunkt der Steuerungsoptimierung ist die Frage, wie im Falle eines Wasserengpasses Wasser auf die verschiedenen Versorgungszonen, nach aktuell technischem Stand zumeist Ortsnetze, verteilt werden kann. Für die Optimierung muss das Ziel messbar sein. Abstrakte Ziele, wie beispielsweise „bestmögliche Versorgung“, müssen in eine mathematische Funktion (die sogenannte Zielfunktion) übersetzt und mit klaren Kriterien hinterlegt werden. Die technische und hydraulische Machbarkeit der Wasserverteilung muss dabei stets als „muss“-Kriterium enthalten sein. Steuerungsvorschläge, welche die technischen Grenzen verletzen oder unzulässige Systemzustände enthalten, sind nicht zugelassen. Im Sinne möglichst anererkennungswürdiger Optimierungsprämissen sollte in der Zielfunktion neben dem technischen Möglichen und dem systemisch Sinnvollen auch das gesellschaftlich Wünschenswerte (Gerechtigkeit, Nachhaltigkeit, ...) reflektiert und berücksichtigt werden. Für die Steuerungsoptimierung sind unterschiedliche Zielsetzungen je nach Situation (Normalbetrieb, Engpasssituation) sinnvoll.

Optimierung bei Engpasssituationen

Die Implementation fernsteuerbarer Mess- und Regeltechnik auf Abnehmerebene kann zu einem besseren Betrieb beitragen. Sollte es zu Versorgungseinschränkungen kommen, könnte es im Sinne einer optimalen Steuerung sinnvoll sein die Anschlüsse ausgewählter Abnehmer (vorbehaltlich

vorhandener Infrastruktur) per Fernzugriff dann auf eine (vorab vereinbarte) Abgabemenge pro Zeit zu begrenzen. Denkbar sind hier beispielsweise maximale Stunden oder Tageswerte unter Berücksichtigung der Ausprägung der Engpasssituation sowie der versorgten Personenzahl. Aus rechtlicher Perspektive bedarf es hierfür einer hinreichenden gesetzlichen Grundlage.

Für das Management einer potenziellen Engpasssituation ist weiterhin die Bestimmung der systembedingten Mindestmenge erforderlich. Hierbei muss ermittelt werden, wie viel Trinkwasser mindestens an das Versorgungsnetz abgegeben werden muss, um das System betreiben zu können. Dabei sind die Vermeidung von Unterdruck, Leerlaufen, Aufenthaltszeitunterschreitung in der Aufbereitung und weitere Faktoren zu beachten.

Priorisierung von Versorgungszonen

Ist eine anschlussstarke Steuerung nicht möglich, lassen sich gute Argumente finden, um Versorgungszonen mit besonders vulnerablen Einrichtungen (Krankenhäuser, Pflegeeinrichtungen) priorisiert zu versorgen bzw. die leitungsgebundene Versorgung dieser Zonen priorisiert aufrecht zu erhalten. Dies erfordert zugleich eine detaillierte Kartierung der Netzinfrastuktur und der dort vorhandenen Kritischen Infrastrukturen sowie die technische Fähigkeit, Wassermengen gezielt in diese Zonen zu leiten.

So entstehende Ungleichbehandlungen oder Gleichbehandlungen bedürfen ggfs. der ethischen und rechtlichen Rechtfertigung (Art. 3 Abs. 1 GG). Hierbei bedarf es einer Abwägung der verursachten Ungleichbehandlungen/Gleichbehandlungen mit dem Zweck der Maßnahmen.

Zur gezielten Verteilung der verfügbaren Wassermenge gibt es grundsätzlich unterschiedliche konkrete Ausgestaltungsmöglichkeiten, beispielsweise:

Tabelle 2

Übersicht der möglichen Umsetzung einer priorisierten Versorgung.

	Beschreibung	Pro	Kontra
A	Versorgung möglichst vieler Versorgungseinheiten	Maximale Anzahl versorgter Anschlüsse, Zahlen sind bekannt.	Keine Wertung von Wichtigkeit versorgter Anschlüsse.
B	Versorgung von Zonen mit den meisten Einwohner*innen	Maximale Anzahl versorgter Anschlüsse, Zahlen sind bekannt.	Ist nicht ohne weiteres auf andere Entitäten (Industrie etc.) übertragbar. Weniger Entitäten heißt nicht zwingend weniger Aufwand.
C	Versorgung von Zonen nach „Wichtigkeit“	Einbeziehung externer Kriterien, die Aspekten wie Systemrelevanz etc. Rechnung tragen.	Kriterien müssen bestimmt und abgewogen werden.
D	Versorgung technisch naheliegender Zonen	Aufrechterhaltung des Betriebs so weit wie möglich, schnelle Wiederinbetriebnahme.	Keine Wertung von Wichtigkeit oder Anzahl versorgter Anschlüsse.

Vergleiche hierzu auch Abschnitt „Rationierung und Priorisierung“, Absatz 3.6.

Aus der Forschung: Technische Regulierung von Abgabemengen

Sobald die mathematische Optimierung keine Lösung findet, bedeutet dies, dass in dem betrachteten Szenario nicht mehr alle Bedarfe gedeckt werden können. Präventiv kann hierbei ein System zur Entnahmesteuerung zum Einsatz kommen.

Systeme zur Entnahmesteuerung sind aufgrund ihrer Komplexität – bestehend aus Sensoren, Aktoren und funkvernetzter Steuereinheit – relativ kostenintensiv. Daher sollte der Einsatz solcher Systeme zunächst auf Abnehmer*innen mit hohem Einfluss auf die Netzstabilität konzentriert werden. Ein Beispiel hierfür sind landwirtschaftliche Betriebe mit hohem Wasserbedarf, bei denen die Investitionskosten durch den relativ hohen Nutzen gerechtfertigt sind. Hierbei sind Regelvorgaben, wie die maximale Wassermenge, die pro Stunde zu bestimmten Tageszeiten dem Versorgungsnetz entnommen werden darf, sinnvoll, um eine Überlastung des Versorgungsnetzes zu verhindern. Diese Regeln können je nach Versorgungslage kommuniziert und aktiviert werden. Im Falle eines dringenden Bedarfs kann die Entnahmemenge auch temporär durch die Abnehmer*innen erhöht oder dauerhaft durch eine autorisierte Instanz lokal übersteuert werden. Sobald solche Systeme in größerer Stückzahl eingesetzt werden, die Kosten pro Einheit sinken und die rechtlichen Rahmenbedingungen erfüllt sind, könnte auch der Einsatz in privaten Haushalten sinnvoll werden. In Engpasssituationen und Mangellagen könnte dann die abgegebene Wassermenge, gestützt durch Gefahrenabwehrverordnungen, rationiert werden. Dabei bedarf es einer konkreten und rechtlich gestützten Definition an abzugebenden Wassermengen. Ein konkretes Beispiel hierzu kann ebenfalls dem Abschnitt „Aus der Forschung“ in Kapitel 3.6 entnommen werden.

2.6 Investitionskosten

Die Einführung einer agilen Netzsteuerung ist mit substanziellen Investitionen in Sensorik, Aktorik, IT-Infrastruktur und Softwareentwicklung verbunden. Zudem kommt es zu einer Erhöhung der laufenden Kosten. Eine Refinanzierung kann durch eine Steigerung bestehender Umsätze, eine Senkung existierender Kosten oder durch die Nutzung von Subventionen erfolgen.

Die Umsatzsteigerung unterliegt dem Kostendeckungsprinzip und kann entweder durch das Hinzuziehen weiterer Einnahmequellen (beispielsweise zusätzliche Erlöse aus Betriebsführung) realisiert werden oder durch eine Anpassung des Tarifmodells. Ein saisonales Entgeltmodell verspricht dabei den größten Erfolg. Hierbei wird das verbrauchsabhängige Entgelt („Arbeitsentgelt“), in den Wasserengpassmonaten erhöht. Neben zusätzlichen Einnahmen könnte so auch eine Verbrauchsglättung in Hochabnahmezeiten erreicht werden. Je nach Höhe der zu refinanzierenden Beträge kann zusätzlich auch eine Erhöhung der monatlichen Grundgebühr („Bereitstellungsentgelt“) empfehlenswert sein. Als Beispiel könnten Großabnehmer gestaffelt stärker belastet werden, da diese auf den verbrauchten Kubikmeter gerechnet häufig dem Kleinabnehmer gegenüber günstiger gestellt sind. Für eine Kostenreduzierung ist eine vorherige Analyse der Hauptkostentreiber des jeweiligen Wasserversorgers erforderlich. Als Beispiel können Effizienzen durch eine Reduzierung von Energiekosten oder durch eine Verstärkung der Preventive Maintenance Aktivitäten erfolgen, die zu einer Verminderung von Rohrbrüchen und Wartungsaufwänden führen. Zudem sollte die Verfügbarkeit staatlicher Subventionen geprüft werden, die als Startfinanzierung dienen können.

Kernaussagen

1. Die Einführung einer agilen Netzsteuerung ist mit substanziellen Investitionen in Sensorik, Aktorik, IT-Infrastruktur und Softwareentwicklung verbunden.
2. Die Refinanzierung kann durch eine Steigerung bestehender Umsätze, eine Senkung existierender Kosten oder durch die Nutzung von Subventionen erfolgen.
3. Bei einer Umsatzerhöhung ist das Kostendeckungs- und Äquivalenzprinzip zu beachten.

Handlungsempfehlungen

Zur nachhaltigen Finanzierung dieser Maßnahmen wurden im Projekt drei zentrale Hebel identifiziert:

1. Umlage der ansatzfähigen Investitionskosten auf die Wasserentgelte (ggf. in Kombination mit dynamischen Tarifmodellen im Rahmen des rechtlich Zulässigen).
2. Kostensenkungen durch effizientere Prozesse (z. B. Predictive & Preventive Maintenance, Steuerungsoptimierung, effizientere Ressourcennutzung).
3. Einbindung öffentlicher Fördermittel (z. B. KfW, EU-Förderprogramme) zur Anschubfinanzierung.

Aus der Forschung: Rechtliche und soziale Rahmenbedingungen

Durch die Investition des Versorgers in eine agile Netzsteuerung entstehen Mehrkosten. Deren Refinanzierung über die Wasserentgelte hängt von der Ansatzfähigkeit der Kosten und ihrer Übereinstimmung mit den Maßstäben des öffentlich-rechtlichen Gebührenrechts ab:

1. Die betreffenden Kosten müssen ansatzfähig sein. Dies trifft auf betriebsbedingte Kosten zu, das heißt Kosten, die durch die Leistungserstellung des Einrichtungsträgers verursacht oder für solche Neben- und Zusatzleistungen entstanden sind, die mit der Leistungserstellung in einem ausreichend engen Sachzusammenhang stehen. Dazu zählen z. B. Personalkosten, betriebsbedingte Sach- und Materialkosten, Kosten für Steuern und sonstige Abgaben, Verwaltungskosten, Abschreibungen und Zinsen.
2. Die Umlage auf die Abnehmer*innen muss sodann den Maßstäben des öffentlich-rechtlichen Gebührenrechts und/oder des privatrechtlichen Wettbewerbsrechts genügen. Erstere, namentlich das Kostendeckungs- und Äquivalenzprinzip, stehen insoweit nicht im Weg, wenn die Entgelterhöhung so bemessen wird, dass sie allein der Refinanzierung der ansatzfähigen Mehrkosten im Veranschlagungszeitraum dient. Im Rahmen der wettbewerbsrechtlichen Anforderungen müssen die Versorger entsprechende Entgeltanpassungen substantiiert begründen können. Beispielsweise müssten sie nachweisen können, dass die angespannte Versorgungslage auf dem Versorger nicht zurechenbaren Umständen beruht und die agile Netzsteuerung diesem Umstand abzuhelpen geeignet ist. Gleichzeitig müsste dargelegt werden, dass die Mehrkosten auch bei einer rationellen Betriebsführung angefallen wären. Dies ist der Fall, wenn ein Unternehmen diese Kosten bei funktionierendem Wettbewerb angeben könnte.

3 Sozio-technische Mechanismen zur Entnahmesteuerung

Neben dem Erhalt und der Verbesserung des Zustands des Versorgungsnetzes, der Erhöhung des Wissens über Dargebot und Verbräuche und der Optimierung von Steuerungsprozessen wird die Resilienz der Wasserversorgung durch gesellschaftliches Handeln beeinflusst. Fehlt in einer Gesellschaft schon im Alltag das Bewusstsein für die Begrenztheit der Ressource Wasser, erhöht dies das Risiko, dass in Zeiten begrenzter Wasserverfügbarkeit Wasserentnahmen nicht in ausreichendem Maße begrenzt werden. Dies kann Engpasssituationen und systemkritische Zustände fördern oder ihre Bewältigung erschweren. Um dies zu verhindern, werden im Folgenden Handlungsempfehlungen zur 1. Bewusstseinsbildung, 2. Nutzung von Wasserampeln, 3. Formulierung von Wassersparappellen, 4. Nutzung dynamischer Entgelte, 5. Ausgabe von Entnahmeverboten sowie 6. Rationierung und Priorisierung bei der Wasserentnahme vorgestellt. Für alle diese Maßnahmen gilt, dass sie stets kritisch hinsichtlich des Maßstabs der Erforderlichkeit geprüft werden müssen. Mittel dürfen nur dann eingesetzt werden, wenn das Ziel mit mildereren, weniger beschränkenden Maßnahmen nicht gleich effektiv zu erreichen ist. Damit einhergehend ist bei stärkeren Eingriffen explizit zu begründen, welche Kriterien oder welcher Notstand derartige Eingriffe rechtfertigen.

3.1 Maßnahmen zur Bewusstseinsbildung

Wasser ist eine begrenzte Ressource. Dies gilt umso mehr vor dem Hintergrund zunehmender Klimaveränderungen und damit einhergehender Veränderungen des Dargebots. Ein ausgeprägtes Bewusstsein für den Wert und die Begrenztheit von Wasser bei allen Abnehmer*innen kann zum Sparen anregen und die Bereitschaft zum Mittragen von Maßnahmen erhöhen.

Kernaussagen

1. Wasserbezogene Bewusstseinsbildung sollte alle Gesellschaftsteile, Altersschichten und Akteur*innen adressieren.
2. Wasserbezogene Bewusstseinsbildung sollte durch vielfältige Akteur*innen geleistet werden.
3. Ambivalenzen im Wasserversorgungssystem (z. B. Sparen vs. Spülen) sollten offen thematisiert und nach gemeinsamen Lösungen gesucht werden.

Handlungsempfehlungen

1. Ein bewusster Umgang mit Wasser erfordert Aufklärung. Eine Beschäftigung mit dem Gut Wasser, seiner sich verändernden Verfügbarkeit und nachhaltigen Nutzungsweisen sollte sowohl in der formellen und informellen Bildung von Kindern als auch von Erwachsenen verankert werden. Je nach Bevölkerungsgruppe sind mitunter andere Formate zielführend.
2. Die aktuelle Gestaltung des Wasserversorgungssystems führt zu einigen Ambivalenzen (z. B. Spülen der Rohre vs. Sparen von Wasser). Diese Ambivalenzen können in der Wahrnehmung von Abnehmer*innen im Widerspruch zum Ziel eines bewussten Umgangs stehen. Um Gleichgültigkeit zu vermeiden, sollten diese Herausforderungen transparent kommuniziert und gemeinsam Lösungen entwickelt werden.
3. Bewusstseinsbildung ist eng verbunden mit Erfahrungen von Selbstwirksamkeit. Um den bewussten Umgang mit Wasser zu befördern, sollten Abnehmer*innen aktiv in Entscheidungsprozesse in der wasserbezogenen Daseinsvorsorge eingebunden werden. Zudem sollte Aufklärung mit Informationen über eigene Handlungsmöglichkeiten verbunden sein.
4. Aktuell wird mit Blick auf Bewusstseinsbildung vielfach auf private Abnehmer*innen fokussiert. Um die Resilienz der Wasserversorgung umfassend sicherzustellen, sollten auch Akteur*innen der Industrie, Landwirtschaft und Dienstleistung gezielt adressiert werden.
5. Die primäre Verantwortung für wasserbezogene Bildung liegt aktuell bei den Wasserversorgern. Weitere Akteur*innen sollten eingebunden werden.

Aus der Forschung:

Eine Befragung von Stakeholdern der Wasserversorgung im Rahmen des Projekts hat gezeigt, dass wasserbezogene Bildung im schulischen Kontext von großer Bedeutung ist. Aufgrund der sich in den letzten Jahrzehnten und aktuell spürbar verändernden Klimabedingungen ist aber auch eine Weiterbildung erwachsener Menschen notwendig. Des Weiteren wurde nahegelegt, sich in diesem Kontext auch kritisch mit vorhandenen Normalitätsvorstellungen zu befassen. Möglicherweise werden bestimmte Tier- und Pflanzenarten zukünftig in Deutschland nicht ansässig sein oder gezüchtet werden können, wodurch sich Wasserbedarfe verändern können.

Siehe ausführlich hierzu Lübke, J.; Gabel, F. (2024).

3.2 Nutzung von Wasserampeln

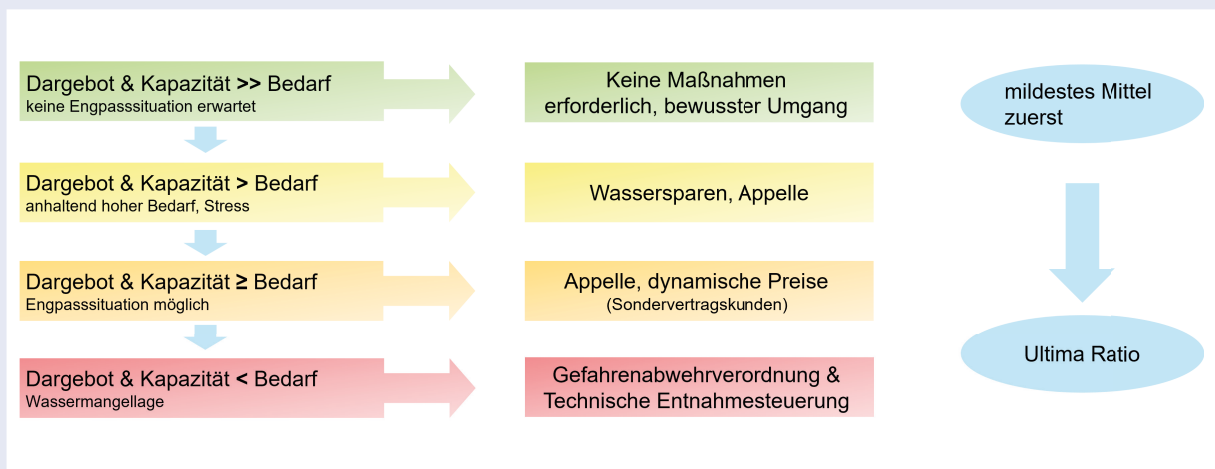
Neben einem allgemeinen Bewusstsein für das Gut Wasser erfordert ein angemessenes Handeln auch das Wissen über die aktuelle Situation und gegebenenfalls vorhandene Bedrohungslagen zu Wasserengpasssituationen, die ein Handeln erfordern. Eine Möglichkeit, dies zu gewährleisten, sind Wasserampeln. Sie können dabei helfen, die aktuelle Auslastung der Wasserversorgung öffentlich sichtbar zu machen, zu erklären, was dies für die Abnehmer*innen bedeutet, was nun passiert, wer wofür zuständig ist und wie man sich vorbereiten kann.

Kernaussagen

1. Wasserampeln können Bewusstsein für die akute Lage schaffen.
2. Wasserampeln sollten einheitlich gestaltet sein und nach denselben Kriterien operieren.
3. Wasserampeln sollten alle Kundengruppen adressieren.

Handlungsempfehlungen

1. Wasserampeln sollten permanent genutzt werden und ihr Einsatz nicht auf drohende Notlagen beschränkt werden. Der Normalbetrieb sollte durch die grüne Farbe dargestellt sein.
2. Wasserampeln sollten beworben und sichtbar gehalten werden. Beispielsweise könnte im Frühjahr oder im Sommer, wenn die Temperaturen tendenziell steigen, Werbung für die Wasserampel gemacht werden, etwa durch Plakate im öffentlichen Raum und auf der Homepage der Wasserversorger und Kommunen. Auch könnten Wasserampeln einen Namen bekommen, um eine Nahbarkeit und Vertrautheit mit ihr zu schaffen.
3. Um eine möglichst universelle Verständlichkeit und Nachvollziehbarkeit zu erreichen, sollten Wasserampeln in ganz Deutschland mit den gleichen Kriterien und Stufen arbeiten. Die Stufen sollten zudem mit den gleichen Maßnahmen assoziiert sein, wobei die genaue inhaltliche Gestaltung lokalen Gegebenheiten angepasst werden sollte.



4. Da eine Erhöhung der Resilienz der Wasserversorgung und die Bewältigung von Engpasssituationen nur gesamtgesellschaftlich gelingen kann, sollten die in den Wasserampeln empfohlenen Maßnahmen nicht nur Privatpersonen adressieren. Auch das Verhalten der Industrie, Landwirtschaft, Dienstleistung und anderer Akteur*innen sollte betrachtet und in Handlungsanweisungen thematisiert werden.

Aus der Forschung:

Das Wasserhaushaltsgesetz nimmt die Träger der öffentlichen Wasserversorgung in die Pflicht, auf einen sorgsamen Umgang mit Wasser hinzuwirken. Dazu zählt insbesondere die Information der Abnehmer*innen über mögliche Maßnahmen, um Wasser einzusparen. Auch wenn die gesetzliche Verpflichtung nicht über eine appellative Wirkung hinausgeht, zeigt sie, dass Kommunikationsstrategien wie eine Wasserampel oder sonstige Appelle gesetzgeberisch intendiert sind. Hier bleibt den Trägern der öffentlichen Wasserversorgung ein weiter Spielraum.

3.3 Einsatz von Appellen

Kündigt sich eine Verschlechterung der Kapazitäten zur Bereitstellung von Wasser über das System der leitungsgebundenen Wasserversorgung an, können als erste Maßnahme Appelle ausgegeben werden. Appelle stellen Kommunikationsakte dar, bei denen ein Wunsch bezüglich eines Handelns (Bitte nutzen Sie Wasser sparsam!) oder des Unterlassens einer Handlung (Bitte sehen Sie von einer Befüllung von Pools ab!) formuliert wird.

Kernaussagen

1. Appelle formulieren Wünsche bezüglich eines Handelns oder Unterlassens.
2. Appelle sollten alle Kundengruppen adressieren.
3. Appelle sollten eine Beschreibung der Situation und möglicher Handlungsoptionen umfassen.

Handlungsempfehlungen

1. Appelle formulieren Wünsche, zu denen sich die Adressaten selbstbestimmt verhalten können; dies umfasst, dass sie diese ignorieren können. Sollen bestimmte Verhaltensweisen oder Wassernutzungen unter Androhung von Sanktionen unterbunden werden, ist dies kein Appell.
2. Appelle sollten klar und ansprechend formuliert werden. In diesem Sinne ist es sinnvoll im Vorhinein unterschiedliche Zielgruppen zu bestimmen, deren Kommunikationsgewohnheiten zu erheben und Konzepte für eine gezielte und zielführende Ansprache dieser vorzubereiten.
3. Appelle bewegen sich stets in einem Spannungsfeld zwischen Aufklärung und Verunsicherung. Um einer Verunsicherung vorzubeugen, sollten Appelle neben der Kernbotschaft, sowohl eine Darstellung der aktuellen (Bedrohungs-)Lage als auch konkrete Empfehlungen für Handlungsoptionen und/oder Anlaufstellen zur Unterstützung umfassen.
4. Da eine Erhöhung der Resilienz der Wasserversorgung und die Bewältigung von Engpasssituationen nur gesamtgesellschaftlich gelingen kann, sollten Appelle nicht nur Privatpersonen adressieren. Auch das Verhalten der Industrie, Landwirtschaft, Dienstleistung und anderer Akteur*innen sollte angesprochen werden.
5. Appelle können unterschiedlichen Charakter haben, der für die Eskalationsstufen nutzbar gemacht werden kann. Während im Alltag (Stufe grün, siehe Abschnitt 3.2) Appelle eher informativen Charakter haben und Handlungsoptionen aufzeigen, haben Appelle bei drohenden oder akuten Engpasssituationen (Stufe gelb, Stufe rot) eher einen auffordernden oder anordnenden Charakter.

Aus der Forschung:

Sollen Appelle ausgegeben werden, müssen dabei drei Punkte beachtet werden: Appelle müssen von den Zielgruppen erhalten und verstanden werden sowie umsetzbar sein.

- „Erhalten“ legt die Nutzung unterschiedlicher Kommunikationskanäle nahe, wobei auch krisenbedingte Ausfälle (z. B. der Stromversorgung) mitzudenken sind.
- „Verstanden“ verweist auf den Einsatz verschiedener Sprachen (z. B. Englisch, Deutsche Gebärdensprache) und Sprachkomplexitäten (z. B. leichte Sprache).
- „Umsetzbar“ bedeutet, dass unterschiedliche Lebenssituationen von Menschen unterschiedliche Einsparpotentiale ermöglichen.

3.4 Nutzung dynamischer Entgelte

Hinsichtlich der Steuerung von Nutzerverhalten kommt den Kosten traditionell eine entscheidende Rolle zu. Höhere Entgelte führen in der Regel zu einer geringeren Nachfrage. Dies gilt grundsätzlich auch im Kontext der Wasserversorgung. Zugleich ist vor dem Hintergrund des aktuell sehr geringen Entgeltes festzustellen, dass private Abnehmer*innen deutlich weniger auf Entgeltanpassungen reagieren als gewerbliche Abnehmer*innen. Hintergrund ist die wissenschaftlich nachgewiesene niedrige Preiselastizität im privaten Wassersektor – durch eine geringe Tarifkenntnis ist eine überproportionale Entgelterhöhung notwendig, um eine Verbrauchsreduktion hervorzurufen. Nichtsdestotrotz könnte der Einsatz dynamische Wasserentgelte dabei helfen, Verbrauchsspitzen zu senken und die Wasserabnahme zeitlich zu strecken.

Kernaussagen

1. Verhaltenssteuerung über Entgelte ist aufgrund der aktuellen (niedrigen) Wasserentgelte sowie einer geringen Preiselastizität im Wassersektor nur bedingt vielversprechend.
2. Verhaltenslenkende Entgelte müssen mit den abgabenrechtlichen Anforderungen, insbesondere den Prinzipien der Kostendeckung, der Äquivalenz und der Verhältnismäßigkeit, konform sein.
3. Entgeltanpassungen sollten soziale Gerechtigkeit mitdenken.

Handlungsempfehlungen

1. Verhaltenslenkende Wasserentgelte, seien es öffentlich-rechtliche Gebühren oder privatrechtliche Preise, unterliegen gleichsam den begrenzenden Prinzipien der Kostendeckung, der Äquivalenz und der Verhältnismäßigkeit.
 - Das Kostendeckungsprinzip steht dynamischen Wasserentgelten nur dann nicht entgegen, wenn der Saldo aus den Einnahmen im Veranschlagungszeitraum nicht erheblich über den entstandenen Kosten liegt. Das Bundesverwaltungsgericht lässt Mehreinnahmen bis zu fünf Prozent zu, sofern die Entgeltsätze nicht bewusst überdimensioniert angesetzt wurden.
 - Nach dem Äquivalenzprinzip darf zwischen der behördlichen Leistung (Wasserbereitstellung und -lieferung) und der Höhe der individuellen Gegenleistung (Entgelt) kein grobes Missverhältnis bestehen. Der Wert der Wasserbereitstellung und -lieferung kann im monopolistisch geprägten Wassersektor nur anhand der individuellen Kosten bemessen werden. Das Bundesverfassungsgericht hat eine im Vergleich zu den individuellen Kosten mehr als doppelt so hohe Gebühren als unzulässig angesehen. Dies eröffnet den WVU aktuell keine großen Spielräume nach oben.
 - Das Verhältnismäßigkeitsprinzip setzt insbesondere eine Grenze nach unten. Erhöhen die Versorger die Wasserentgelte im Rahmen des Äquivalenzprinzips, müssten sie fundiert darlegen, dass von dieser Entgeltstruktur – wider Erwarten – eine hinreichend breite Steuerungswirkung ausgehen kann.
2. Aktuell werden saisonale Entgeltanpassungen als umsetzbarste Lösung bewertet. Sie sind mit vertretbarem Aufwand realisierbar, stehen aber ausdrücklich unter dem Vorbehalt rechtlicher Anforderungen. Dies umfasst, dass Tarifanpassungen quartalsweise oder halbjährlich – etwa höhere Entgelte in Trockenmonaten – stattfinden.
3. Grundsätzlich ist es wichtig, dass Menschen nicht durch monetäre Kosten davon ausgeschlossen werden Trinkwasser zu beziehen. Zugang zu Trinkwasser ist ein Menschenrecht.

Daher sollten entgeltliche Lenkungsinstrumente immer mit sozialen Ausgleichsmechanismen flankiert werden, um keine ungewollten Härten, insbesondere für ökonomisch schlechter gestellte Gruppen, zu erzeugen. Besonders dynamische Entgelte haben ein großes Potential, sozio-ökonomisch schlechter gestellte Menschen härter zu treffen, und sollten dahingehend kritisch geprüft werden.

Aus der Forschung:

Neben saisonalen Entgeltanpassungen sind grundsätzlich auch andere Ansätze denkbar. Eine tageszeitbasierte Entgeltgestaltung – also etwa höhere Entgelte in den typischen Spitzenverbrauchszeiten am Morgen oder Abend – ist theoretisch wirkungsvoll, praktisch aber kaum wirtschaftlich umsetzbar. Sie erfordert nicht nur flächendeckende smarte Zähler, sondern auch eine transparente und in Echtzeit zugängliche Entgeltstruktur für Abnehmer*innen. Beides ist aktuell nicht gegeben. Staffelbasierte Modelle, z. B. mit einem niedrigen Grundentgelt für Basisbedarfe und einem „Komfortentgelt“ für darüberhinausgehende Mengen setzen voraus, dass die konkrete Verwendungsart des Wassers (z. B. für Trinken, Garten, Pool) bekannt ist. Diese Transparenz fehlt im aktuellen Versorgungssystem vollständig und wäre nur mit erheblichem technischem und organisatorischem Aufwand herzustellen. Progressive Entgeltmodelle, bei denen das Entgelt mit steigendem Verbrauch exponentiell steigt, könnten zwar theoretisch zur Gegenfinanzierung beitragen, stoßen jedoch aufgrund des begrenzten rechtlichen Rahmens (insbesondere Äquivalenz- und Verhältnismäßigkeitsprinzip) schnell an ihre Grenzen.

Zum rechtlichen Rahmen ausführlich Beh (2025, b).

3.5 Entnahmeverbote

Helfen die bisherigen Maßnahmen nicht oder reichen diese nicht aus, um eine Engpasslage zu bewältigen, kann die Entnahme von Wasser für bestimmte Nutzungsweisen verboten werden. Ansatzpunkt ist eine gesetzliche Entnahmebeschränkung. Entsprechende Verbotstatbestände können durch die Gemeinden geschaffen werden. Mögliches Instrument sind Gefahrenabwehrverordnungen auf polizei- und ordnungsbehördlicher Grundlage.

Kernaussagen

1. Entnahmeverbote können ein wirksames Mittel zur Bewältigung von Engpasslagen sein.
2. Gefahrenabwehrverordnungen können ein Weg sein, damit Gemeinden Entnahmeverbote statuieren.
3. Entnahmeverbote müssen in der Umsetzung kontrollierbar sein.

Handlungsempfehlungen

1. Gefahrenverordnungen haben insbesondere hinreichend bestimmt und verhältnismäßig zu sein. Der Verhältnismäßigkeitsgrundsatz verlangt, dass entsprechende Verbote nur greifen, wenn eine Engpasssituation oder Mangellage tatsächlich besteht.
2. Um die Verbote zu ahnden bzw. durchzusetzen, können die Gemeinden entsprechende Ordnungswidrigkeitstatbestände in die Rechtsverordnung integrieren oder auf das Verwaltungsvollstreckungsrecht zurückgreifen.
3. Verstöße müssen erkannt werden, bevor eine zwangsweise Durchsetzung und/oder Sanktionierung erfolgen kann. Dies erfordert Kontrollmechanismen und Überwachung. Diesbezüglich sollten immer auch die sozialen Belastungen für gesellschaftlichen Zusammenhalt mitgedacht werden.
4. Bei Entnahmeverboten ist darauf zu achten, dass Lasten gerecht verteilt werden. Eine besondere einseitige Belastung (z. B. von privaten Abnehmer*innen gegenüber der Industrie oder eine besondere Betroffenheit einzelner Bevölkerungsgruppen), ist nicht grundsätzlich ausgeschlossen, muss aber angemessen begründet und transparent gemacht werden.

Aus der Forschung

Ein Einsatz von Gefahrenverordnungen, wie sie aktuell bereits in Hessen genutzt werden, hat verschiedene Vorteile:

- Eine Grundlage kann eigenverantwortlich durch die Gemeinden geschaffen werden.
- Es sind keine großflächigen technischen Installationen bei den Abnehmer*innen notwendig.
- Es kann auf bereits bestehende Strukturen aufgebaut werden (Kontrolle und Durchsetzung durch die allgemeinen Ordnungsbehörden und die Polizei).

Zugleich steht dieses Vorgehen einigen Herausforderungen gegenüber:

- Eine Durchsetzung kann nicht bei jedem einzelnen Anschluss wirksam durchgeführt werden. Dies setzt u.a. ausreichend Personal sowie die Befugnis im Einzelfall voraus, die technischen Anlagen in geschützten Räumlichkeiten erreichen zu können.
- Die Durchsetzung der Verbote kostet Zeit. Eine wirksame Reaktion in akuten Engpasslagen wird damit unwahrscheinlich. Dies gilt insbesondere für Ordnungswidrigkeitsverfahren.
- Ohne wirkungsvolle Durchsetzung der Verbote bzw. ohne zeitnahe Ahndung der Verstöße könnten die Maßnahmen schnell an Effektivität verlieren.

Siehe ausführlich hierzu Beh (2025, c).

3.6 Durchführung von Rationierungen oder Priorisierungen

Ein letztes Mittel, um akute Engpasssituationen zu bewältigen und Schäden möglichst gering zu halten, ist der Einsatz von Rationierungen oder Priorisierungen in der leitungsgebundenen Wasserversorgung. Eine Rationierung des Wasserzugangs über das leitungsgebundene System bedeutet, dass Wasser nur zu bestimmten Zeiten (z. B. stundenweise Abschaltung) oder in bestimmten Mengen (z. B. 50 Litern pro Einwohner und Tag) verfügbar ist. Die Rationierung zielt grundsätzlich auf eine Gleichbehandlung. Eine Priorisierung des Wasserzugangs über das leitungsgebundene System bedeutet, dass bestimmte Wassernutzungen oder Abnehmer*innen bevorzugt Wasser entnehmen dürfen oder dass für bestimmte Wassernutzungen oder Abnehmer*innen die Wasserentnahme vollständig eingestellt wird. Bei der Priorisierung werden bewusst Ungleichbehandlungen in Kauf genommen. Diese sind rechtlich nicht ausgeschlossen, bedürfen aber einer Rechtfertigung. Dazu notwendig ist eine hinreichend bestimmte gesetzliche Grundlage. Es gilt allgemein, dass mildere, gleich effektive Mittel den Vortritt haben. Im Übrigen ist eine ethisch vertretbare Lösung zu gewährleisten.

Kernaussagen

1. Eine Rationierung oder Priorisierung von Wasserentnahmen kann ein letztes Mittel zur Bewältigung von Engpasssituationen oder Mangellagen sein.
2. Ihr Einsatz bedarf aufgrund der existentiellen Bedeutung von Wasser besonderer Begründung.
3. Der Einsatz von Rationierungen und Priorisierungen wird durch die vorhandenen technischen Infrastrukturen beeinflusst.

Handlungsempfehlungen

Aktuell besteht de lege lata keine verfassungsrechtlich gebotene gesetzliche Wertung für Priorisierungsentscheidungen. Den WVU ist vor diesem Hintergrund zu empfehlen, sich ein gut begründetes und kohärentes Konzept zu überlegen, das Ungleichbehandlungen auf sachliche Gründe stützt. Die aktuell in der Praxis diskutierten gesetzlichen Grundlagen sind entweder ungeeignet (§ 100 Abs. 1 S. 2 WHG oder das für den Verteidigungsfall bestehende Wassersicherstellungsgesetz) oder begegnen Bedenken (AVBWasserV), vgl. Beh (2025, a).

1. Die Durchführung von Rationierungen und Priorisierungen setzt technische Infrastrukturen wie etwa Möglichkeiten zur Beeinflussung der Durchflussmenge und des Drucks oder zur Abschaltung einzelner Entnahmestellen voraus. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die Abschaltung und Reaktivierung von Versorgungslinien mit Kontaminationsrisiken und/oder Vorlaufzeiten einhergehen, die Handlungsmöglichkeiten einschränken können. Sollen Konzepte zu Rationierungen und Priorisierungen erstellt werden, sind diese technischen Aspekte bei der Festlegung ethisch fundierter Vorgehensweisen zu berücksichtigen.
2. Technische Möglichkeiten können auch die Spielräume ethischer Abwägungen beeinflussen. Einerseits braucht der Umbau der Infrastruktur und die flächendeckende Installation von Steuermöglichkeiten Zeit, weshalb zu überlegen ist, wie die Verteilung von Akteuren so ausgestaltet werden kann, dass sie gesellschaftlichen Wertvorstellungen und Vorüberlegungen zu einer möglichen Priorisierung bestmöglich Rechnung trägt. Andererseits gehen neue technische Möglichkeiten auch mit neuen Risiken einher (Datensicherheit, Funktionssicherheit, etc.), die es abzuwägen gilt.

3. Werden Wassernutzungen von verschiedenen Abnehmer*innen gewichtet, sollten die Gewichtungskriterien sowohl offengelegt als auch dahingehend analysiert werden, welche möglichen negativen Implikationen dies für Akteur*innen aber auch für die Gesamtgesellschaft haben kann. Neben direkten und akuten Implikationen sollten auch langfristige Folgen bedacht werden. Bei der Beurteilung sollten neben den ökonomischen auch ökologische und soziale Aspekte berücksichtigt werden. Auch sind neben menschlichen Interessen andere Entitäten (z. B. Tiere, Umwelt, zukünftige Generationen) zu berücksichtigen; unabhängig von deren Fähigkeit zur Selbstrepräsentation.
4. Sollen Teile der Wasserversorgung aktiv gedrosselt oder abgestellt werden, ist zu überlegen, welche Maßnahmen zu ergreifen sind, um während und auch nach der Beeinflussung die Versorgung der Betroffenen mit einer gleichwertigen Wasserqualität zu gewährleisten. Eine doppelte Benachteiligung von Bedarfsträgern, durch Einschränkung der Entnahme aus der leitungsgebundenen Wasserversorgung und eine geminderte Wasserqualität aufgrund alternativer Bereitstellungsweisen ist zu vermeiden.

Aus der Forschung:

Technische Maßnahmen zur Entnahmesteuerung können unterschiedlichen Anforderungen gerecht werden. Je nach Versorgungslage können sie entweder keine Eingriffe in die Versorgung vornehmen und lediglich als zusätzliche, vernetzte Messeinrichtungen zur Erhebung von Verbrauchsdaten dienen. In Engpasssituationen können sie die Abgabemenge begrenzen oder das Versorgungsnetz bei Lastspitzen bzw. Überlastung durch eine Unterbrechung der Wasserabgabe schützen. Die Entnahmesteuerung kann durch eine vernetzte lokale Steuerung erfolgen, die mit Sensoren und Aktoren ausgestattet ist (vergleiche [Abbildung 13](#)).

Im Rahmen des Projekts wurde dies durch die batteriegestützte Omni Control Node (OCN) realisiert. Als Sensor wird ein Wasserzähler eingesetzt, als Aktor kommt ein Motorkugelhahn zum Einsatz. Die Vernetzung erfolgt über NB-IoT/LTE-M oder LoRaWAN, ergänzt durch eine zusätzliche Sicherungsschicht zur Absicherung der Kommunikation. Die Regelvorgaben für die lokale Steuerung werden von einer zentralen Instanz, dem Managementsystem, sicher übermittelt. Für die Regelung können unter anderem zeitlich begrenzte maximale Wassermengen (Rationierung) oder maximale Wasserdurchflussmengen (Drosselung) definiert werden. Entscheidend ist, dass die lokale Steuerung auch bei einem Ausfall oder einer Störung der Verbindung zum Leitsystem – etwa durch technische Probleme oder Cyberangriffe – jederzeit einen sicheren und rechtskonformen Betriebszustand gewährleistet (Fail-Safe). Die Steuerung erfasst die Durchflussmengen lokal und kann bei Bedarf durch den Aktor die Abgabe entsprechend der Regelvorgabe einschränken. Zugleich kann die Regelung mit entsprechender Autorisation lokal übersteuert werden, um etwa in Notfällen, wie etwa einem Feuerwehreinsatz, die Versorgung vorübergehend wieder freizugeben. Die Regelvorgaben können zeitlich begrenzt werden, sodass das System im Falle einer Kommunikationsstörung automatisch wieder in den regulären Betrieb zurückkehrt, wodurch sichergestellt wird, dass keine unbeabsichtigte Einschränkung der Versorgung erfolgt.

Beispiel Bewässerung in der Landwirtschaft: Die Begrenzung der Maximalentnahme pro Stunde trägt zu einem gleichmäßigeren Betrieb bei und stabilisiert den Netzzustand. Die Fernsteuerbarkeit ermöglicht zielgerichtete Maßnahmen nur dann, wenn sie nötig sind und erhöht damit den Handlungsspielraum des Wasserversorgers.



Abbildung 13:

*Intelligentes Standrohr mit integrierter OCN
(Omni Control Node) zur Steuerung der
abgegebenen Wassermenge.*

4 Handlungsempfehlungen für Akteur*innen im Wassersektor

Vor dem Hintergrund der Bedeutung von Wasser für alle Teile der menschlichen Gesellschaft sollten stets vielfältige Akteur:innen aus möglichst vielen verschiedenen Kundengruppen und gesellschaftlichen Konstellationen eingebunden werden. Im Zuge der Weiterentwicklung der Wasserversorgung stellen sich zudem vielfältige Fragen nach der Zuschreibung und Übernahme von Verantwortung für die Umsetzung von Maßnahmen. Mit Blick auf die bisher an vielen Stellen auch rechtlich wenig geregelten Kontexte, besteht zukünftig eine wichtige Aufgabe darin, Verantwortungen unter Berücksichtigung des ethischen Brückenprinzips „Sollen erfordert Können“ zu diskutieren, diese klar zu definieren und zu kommunizieren.

Durch eine fortschreitende Digitalisierung in der Wasserversorgung können Betriebsprozesse und -abläufe effizienter gestaltet sowie Betriebsmittel und damit Wasser als Ressource eingespart werden. Die automatisierte Datenerfassung und -übermittlung ermöglicht eine kurzfristige Anpassung an sich verändernde Bedarfe. Die Digitalisierung unterstützt den Betrieb dabei auf krisenhafte Ereignisse und Störungen im Betriebsablauf kurzfristig zu reagieren.

Neben den Chancen müssen auch Risiken der Digitalisierung unter Berücksichtigung von Kosten und Nutzen betrachtet werden. Insbesondere Trinkwasseranlagen gehören zur Kritischen Infrastruktur, womit der Prozess-, IT-Sicherheit und dem Datenschutz eine besondere Bedeutung zukommt. Digitale Innovationen können zur Integration vormals getrennter digitaler Bereiche führen, was neue Angriffsflächen für Cyberangriffe ermöglicht und spezialisierte Expertise sowie leistungsfähige IT-Infrastrukturen erfordert.

Die Digitalisierung fordert eine Anpassung der Ausbildungsstandards und die Entwicklung von Weiterbildungskonzepten für erfahrene Fachkräfte. Die Berufsbilder müssen auch an die neuen Herausforderungen angepasst werden, z. B. durch die Entwicklung von Konzepten zum Einsatz digitaler Werkzeuge in der Ausbildung und im laufenden Betrieb.

4.1 Handlungsempfehlungen für Wasserversorgungsunternehmen

Wasserversorger sollten die **Bewusstseinsbildung** ihrer Abnehmer*innen fördern. Trinkwasser ist ein wertvolles, schützenswertes Gut und Lebensmittel, das einen sparsamen und bewussten Umgang erfordert. Hierfür bieten sich kommunikative Maßnahmen wie Werbekampagnen an.

Zur Förderung eines bewussten Gebrauchs kann die Nutzung einer **Wasserampel** hilfreich sein. Dabei sollte auch bei Stufe „grün“ darauf hingewiesen werden, dass der Umgang mit Wasser sparsam zu erfolgen hat. Für die weiteren Stufen sollte Erläuterung und Gegenmaßnahmen in Form von Appellen genutzt werden.

Ein **saisonales Entgeltmodell** als praktikabler erster Schritt zur Nachfragebeeinflussung (Verbrauchsglättung) und wirtschaftlichen Stabilisierung in Trockenperioden kann dabei unterstützen (vorbehaltlich der rechtlichen Zulässigkeit im Einzelfall). Eine transparente Kommunikation und flankierende Maßnahmen zur sozialen Abfederung dynamischer Entgelte sollten sichergestellt werden, insbesondere bei entgeltlich lenkenden Modellen.

Eine fortschreitende Modernisierung und Digitalisierung des Versorgungssystems sind unabdingbar, um zukünftigen Anforderungen an die Wasserversorgung gerecht werden zu können. Wasserversorger sollte über eine detaillierte **Systemkenntnis** verfügen oder diese entsprechend verbessern, unter anderem durch den Einsatz moderner **Sensoren**.

Mit Hilfe eines **Entscheidungsunterstützungssystems**, welches Betriebsdaten und **Prognosen** berücksichtigt und auf einer mathematischen Optimierung basiert, kann die Netzsteuerung agilisiert und optimiert werden. Dafür ist der Einsatz dynamischer Steuerelemente erforderlich, z. B. durch fernsteuerbare Aktoren, wie der vorgestellten OCN in Abschnitt 3.6.

Der Netzausbau mit Sensor- und Aktortechnik erfordert **Investitionen**. Diese sollten frühzeitige unter Berücksichtigung von Refinanzierungsstrategien (z. B. Entgeltanpassungen, Effizienzgewinne, Förderprogramme) geplant werden.

Die Ausarbeitung von **Strategien** inklusive der Definition **strategischer Schutzziele** für drohende und akute Mangellagen wird empfohlen. Dafür sollten insbesondere sachliche Gründe angeführt werden, warum verschiedene Abnehmer ungleich behandelt werden, um entsprechende Beschränkungen rechtfertigen zu können. WVU müssen sich mit den sie treffenden Pflichten nach der DSGVO und der KI-Verordnung auseinandersetzen und diese erfüllen; dasselbe gilt für die Pflichten aus dem KRITIS-Dachgesetz und dem BSI-Gesetz n.F., wenn sie verabschiedet und in Kraft getreten sind. Zudem sollten resultierende Risiken, beispielsweise Cyberattacken, reflektiert und eine Kosten-Nutzen-Abwägung durchgeführt werden.

4.2 Handlungsempfehlungen für Behörden

Auch Behörden können Maßnahmen zur **Bewusstseinsbildung** für den bewussten und nachhaltigen Umgang mit Wasser veranlassen.

Besonders in der Sommerperiode sollten die Behörden den bewussten Umgang mit der Ressource durch Kommunikation von **Wasserampeln** fördern. Aktuell nutzen unterschiedliche Landkreise jeweils individuelle Wasserampeln. Eine **Harmonisierung** der Wasserampel inklusive **klar formulierter Maßnahmen** kann den Abnehmer*innen helfen, einen bewussten Umgang zu pflegen und Verhaltensweisen situationsbezogen anzupassen. Dabei sollte eine Abstimmung mit dem WVU erfolgen.

An die Wasserampel gekoppelt kann eine **Gefahrenabwehrverordnung**, wie sie beispielsweise in hessischen Gemeinden erlassen wurde, zum Einsatz kommen. Dies ist besonders relevant, falls ein akuter Wasserengpass droht, welcher durch Appelle nicht sicher abgewendet werden kann. Zudem sollten **Verantwortlichkeiten** geklärt werden. Dabei sollte definiert werden, welche Stelle für die Kommunikation mit dem Wasserversorger und für den Erlass der Gefahrenabwehrverordnung zuständig ist.

4.3 Handlungsempfehlungen für Gesetzgebung

Die Gesetzgebung kann die Resilienzsteigerung der Wasserversorgung unterstützen, indem sie **Verantwortlichkeiten** klar regelt und Kompetenzen der Institutionen definiert. Darunter fällt auch ein definiertes Vorgehen und Kompetenzen der einzelnen Organe bei drohenden Wasserengpasssituationen und Mangellagen.

Zur Einführung **wirksamer Anreizmodelle**, z. B. durch **Entgeltregulierung** wird eine entsprechende Rechtsgrundlage benötigt.

Erforderlich dafür ist auch die Festlegung von **Richtlinien**, wie die Verteilung von Wasser innerhalb der öffentlichen Wasserversorgung im Fall von notwendigen **Rationierungen** oder **Priorisierungen** entschieden werden kann und wer diese Entscheidungen zu treffen hat.

Ebenfalls gehört dazu die Schaffung einer **Ermächtigungsgrundlage zur aktorbasierten Regulierung der Wasserverteilung** in akuten Engpasssituationen.

Sollten Bedarfsprognosen auf Hausanschlussebene erforderlich werden, bedarf es der Schaffung einer Ermächtigungsgrundlage zur Erhebung und **Verarbeitung personenbezogener Wasserverbrauchsdaten zu Prognosezwecken**.

4.4 Handlungsempfehlungen für Abnehmer*innen

Zunächst wird an dieser Stelle darauf verwiesen, dass unter „Abnehmer*innen“ nicht explizit auf private Abnehmer*innen angesprochen, sondern vielmehr **alle Kundengruppen** eingeschlossen werden.

Wie bei anderen Teilen von Infrastruktur, die alltäglich selbstverständlich genutzt wird, gilt auch für die Wasserversorgung, dass seitens der Abnehmer*innen **ein höheres Bewusstsein** für die lebensnotwendige Relevanz dieser Infrastruktur entwickelt wird. Mit Wasser ist stets **sparsam** umzugehen. Besonders in warmen Perioden sollten vorhandene **Wasserampeln** im Blick behalten werden. Wenn ausgesprochen, sollten **Appelle und Empfehlungen** zum Wassersparen dringend eingehalten werden.

Besonders für Industrieabnehmer gilt, dass wo immer möglich, moderne wassersparende Prozesse in Betriebsabläufe eingebunden werden sollten.

4.5 Handlungsempfehlungen für Forschung und Entwicklung

Die hier aufgezeigten Technologien, Methoden und Modelle verlangen stets Weiterentwicklung und Verbesserung. Die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Wasserversorgung ermöglicht die kontinuierliche Weiterentwicklung und Implementierung von Technologien, die die öffentliche Wasserversorgung angesichts des Klimawandels resilienter machen.

5 Literatur

Beh, M. (2025, a). Einsatz einer auf künstlicher Intelligenz basierenden Netzsteuerung in der öffentlichen Wasserversorgung. Schriften zum Deutschen und Europäischen Infrastrukturrecht (SDEI), Band 32, ISBN 978-3-428-19652-4.

Beh, M. (2025, b). Dynamische Wasserentgelte als Reaktion auf angespannte Versorgungslagen, NVwZ 13/2025, S. 985–990.

Beh, M. (2025, c). Schutz der Trinkwasserversorgung im Klimawandel durch Gefahrenabwehrverordnung. JA 2025, S. 133–140.

Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, Bericht Nr. I-28 der KHR (2022)

Lübke, J.; Gabel, F. (2024). Interviewstudie zu Resilienzstrategien für die Wasserversorgung, In: Wasser und Abfall, 03/2024, S. 22–25.

Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Versorgung mit Wasser (AVBWasserV) vom 20. Juni 1980 (BGBl. I S. 750), zuletzt geändert durch Artikel 8 des Gesetzes vom 11. November 2016 (BGBl. I S. 2500).

Gesetz über das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSIG) vom 14. August 2009 (BGBl. I S. 2821), zuletzt geändert durch Artikel 12 des Gesetzes vom 23. Juni 2021 (BGBl. I S. 1982).

Verordnung (EU) 2016/679 (DSGVO) des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. April 2016 zum Schutz natürlicher Personen bei der Verarbeitung personenbezogener Daten und zum freien Datenverkehr, ABl. L 119 vom 04.05.2016, S. 1–88.

Verordnung (EU) 2024/1689 (KI-VO / AI Act) des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Juni 2024 zur Festlegung harmonisierter Vorschriften für künstliche Intelligenz.

Konzeption Zivile Verteidigung (KZV). Bundesministerium des Innern und für Heimat. Berlin, 2016.

KRITIS-Dachgesetz (KritisDG) Gesetz zur Stärkung der Resilienz kritischer Anlagen und zur Umsetzung europäischer Vorgaben zur Resilienz kritischer Einrichtungen.

Pikos, N.; Pillai, A.; Grischy, J.; Roepke, R. (2026) Erhöhung der Resilienz der Wasserversorgung durch eine agile Netzsteuerung auf der Basis von KI-basierten Bedarfsprognosen. Energie Wasser Praxis, 05/2026, S. 61–65.

Wasserhaushaltsgesetz (WHG) vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 9. Januar 2026 (BGBl. I 2026 Nr. 4).