

Abschlussbericht

INNOWATER

INNOVATIVE UND WISSENSBASIERTE
QUARTIERSENTWICKLUNG FÜR EIN ENERGIE- UND
RESSOURCENEFFIZIENTES WOHNEN

Aktenzeichen: 38351/01

Projektlaufzeit: 01.10.2022 – 31.10.2023



Gefördert durch die Deutsche
Bundesstiftung Umwelt



Abschlussbericht

INNOWATER

INNOVATIVE UND WISSENSBASIERTE QUARTIERSENTWICKLUNG FÜR EIN ENERGIE-
UND RESSOURCENEFFIZIENTES WOHNEN

Zuwendungsempfänger:



Autoren

Stephanie Schneider-Werres¹, Gloria Kohlhepp¹, Gerald Müller², Kai Spurling², Felix Kaller³, Yousuf Al-Hakim⁴, Kersten Roselt⁵, Johannes Schubert⁵, Kay Smarsly⁴, Claudia Klümper³, Silvio Beier¹

- 1 Bauhaus-Universität Weimar
Wielandstraße 2, 99423 Weimar
- 2 HVG Grünflächenmanagement GmbH – Ein Unternehmen von VIVAWEST,
Bergmannsglückstrasse 35, 45896 Gelsenkirchen
- 3 Hochschule Hamm-Lippstadt
Marker Allee 76-78, 59063 Hamm
- 4 TU Hamburg, Institute für Digitales und Autonomes Bauen
Blohmstraße 15, 21079 Hamburg
- 5 JENA-GEOS®-Ingenieurbüro GmbH
Saalbahnhofstraße 25 c, 07743 Jena

Förderkennzeichen: 38351 / 01



Laufzeit: 16.09.2022 – 31.10.2023

Förderhinweis und Danksagung

Das Vorhaben wurde mit Mitteln der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert. Besonderer Dank gilt dem Mittelgeber und den assoziierten Projektpartnern Vivawest Wohnen GmbH und EGLV.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	V
Kurzzusammenfassung	VI
1 Einleitung	1
2 Eingehende Darstellung.....	4
2.1 Planung und Ablauf.....	4
2.1.1 Identifizierung der technischen und organisatorischen Herausforderungen.....	4
2.1.2 Entwicklung und Erprobung intelligenter Systeme.....	6
2.1.3 Aufstellung eines Konzepts und Handreichung zur Implementierung	7
2.1.4 Öffentlichkeitsarbeit und Verbreitung der Projektergebnisse.....	9
2.2 Darstellung der Projektpartner	11
2.2.1 Bauhaus-Universität Weimar	11
2.2.2 Technische Universität Hamburg	13
2.2.3 Hochschule Hamm-Lippstadt	16
2.2.4 HVG Grünflächenmanagement GmbH.....	18
2.2.5 JENA-GEOS® - Ingenieurbüro GmbH	20
2.3 Projektergebnisse.....	22
2.3.1 Entwurf der Grundmethodik eines Bewässerungsregimes.....	22
2.3.2 Untersuchung Grauwasser	24
2.3.3 Untersuchung Sensorbasiertes KI-System	41
2.3.4 Entwicklung eines Leitfadens für die Grauwassernutzung	45
3 Fazit.....	46
Literaturverzeichnis.....	48
Anhang.....	50

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Untersuchungsgebiet in Dortmund Huckarde (Vorplanung Vivawest Wohnen, HVG)	8
Abbildung 2: Vorgehen der Literaturrecherche in PubMed	24
Abbildung 3: Quantitative Ergebnisse der Literaturrecherche in PubMed	26
Abbildung 4: Sammelbehälter für Grauwasser	30
Abbildung 5: Sensorbasiertes KI-System.....	43
Abbildung 6: Sammelbehälter und Photovoltaikanlage	44
Abbildung 7: Sensorik und Verbindung.....	44
Abbildung 8: Titelbild des Leitfadens für die Grauwassernutzung	45

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kategorisierung der Journal-Artikel.....	25
Tabelle 2: Nationale und internationale Regelungen und Empfehlungen für die Wasserwiederverwendung	26
Tabelle 3: Zusammensetzung qPCR-Reaktion.....	35
Tabelle 4: Temperaturprogramm qPCR	35
Tabelle 5: Microbiological characterisation of greywater. The samples were collected from the greywater collection container in Weimar.	36
Tabelle 6: Microbiological characterisation of greywater from a plant-treatment system. ...	36
Tabelle 7: Ergebnisse der molekularbiologischen Analysen der Stichproben aus Weimar.....	37
Tabelle 8: Ergebnisse der molekularbiologischen Analysen der Grauwasserstichproben der Pflanzenkläranlage.	37
Tabelle 9: Untersuchung des stark belastetes Grauwasser nach DIN 19684	38
Tabelle 10: Untersuchung Zu- und Ablauf einer Pflanzenkläranlage.....	39

Kurzzusammenfassung

Die steigenden Anforderungen an zukünftige Wohnräume und der Druck des Klimawandels erfordern kontinuierliche Innovationen, um umweltfreundliche Lösungen zu entwickeln und Städte dauerhaft lebenswert zu erhalten. Dabei ist eine nachhaltige und regionale Energie- sowie Ressourceneffizienz in der Quartiersentwicklung von entscheidender Bedeutung.

Zusätzlich ist aufgrund steigender Temperaturen eine ausreichende Versorgung von Wohngebieten mit Grünflächen ein wesentlicher Aspekt der Quartiersbewirtschaftung, wobei die Bewässerung von urbanen Grünanlagen und die Lösung möglicher Nutzungskonflikte um vorhandene Wasserressourcen zukünftige Herausforderungen darstellen.

Obwohl die Nutzung von Regenwasser und Grauwasser bereits etabliert ist, erfordert es fortschrittliche Speicher- und Regelungskonzepte, um diese Ressourcen effizient und bedarfsgerecht verfügbar zu machen. In diesem Zusammenhang gewinnen dezentrale, adaptive und sensorbasierte KI-Systeme zunehmend an Bedeutung. Gleichzeitig werden IoT-basierte Lösungen verstärkt im urbanen Grün eingesetzt, um Messdaten zu sammeln und zu analysieren.

Das Projekt INNOWATER zielt darauf ab, diesen Ansatz mit einem interdisziplinären Projektteam aus den Bereichen Wohnungsbau, Gartenbau, Wasserwirtschaft und künstlicher Intelligenz zu adressieren. Das übergeordnete Ziel ist die Entwicklung eines innovativen und wissensbasierten Konzepts für die nachhaltige Bewirtschaftung von Wasser und Boden im Rahmen einer ressourcenschonenden Quartiersentwicklung. Zudem sollen geeignete technische und organisatorische Lösungen erörtert werden, um den Anforderungen eines klimaangepassten Managements urbaner Grünflächen gerecht zu werden.

1 Einleitung

Die zunehmende Urbanisierung und der kontinuierlich steigende Bedarf an Wohnraum stellen die Gesellschaft vor vielfältige Herausforderungen, die in einem stetig wachsenden Spannungsfeld zwischen Mensch und Umwelt stehen. Während die urbane Entwicklung voranschreitet, verschärft der fortschreitende Klimawandel die Notwendigkeit, nachhaltige und effiziente Lösungen zu finden, um die Belastungen für die Umwelt zu minimieren und gleichzeitig lebenswerte Städte zu gestalten. Dies erfordert innovative Ansätze für die Weiterentwicklung von Infrastrukturen, insbesondere im Kontext einer nachhaltigen, regionalen Energie- und Ressourceneffizienz in Quartiersentwicklungen, die gleichzeitig soziale Komponenten integrieren.

Es wird deutlich, dass die Zukunft der urbanen Entwicklung durch die Wechselwirkungen zwischen Klimawandel, Urbanisierung und nachhaltiger Quartiersentwicklung geprägt sein wird. Insbesondere der fortschreitende Klimawandel führt zu einer Vielzahl von Folgeerscheinungen, die die Verfügbarkeit von lebenswichtigen Ressourcen wie Wasser stark beeinträchtigen. In diesem Kontext wird deutlich, dass zukünftige Nutzungskonflikte um die begrenzten Wasserressourcen unausweichlich sind und innovative Lösungsansätze erforderlich werden. Eine steigende Durchschnittstemperatur, verbunden mit dem Phänomen der urbanen Wärmeinseln, stellt die Städte vor die drängende Aufgabe, Strategien zu entwickeln, um dieser Entwicklung entgegenzuwirken. In diesem Zusammenhang gewinnt die Bedeutung von Grünflächen in urbanen Gebieten zunehmend an Gewicht. Grünflächen dienen nicht nur als Rückzugs- und Erholungsorte für die Stadtbewohner, sondern spielen auch eine entscheidende Rolle bei der Verhinderung und Reduzierung von Wärmeinseln.

Die Voraussetzung für die Wirksamkeit von Grünflächen im Kampf gegen die städtische Hitze ist jedoch eine ausreichende Wasserversorgung, sowohl quantitativ als auch qualitativ. Angesichts des steigenden Wasserbedarfs und der temporär begrenzten Verfügbarkeit von Frischwasser in den Sommermonaten, wird es unabdingbar, innovative Konzepte zur nachhaltigen Wassernutzung zu entwickeln. Eine vielversprechende Möglichkeit, zusätzliche Wasserressourcen zu erschließen, liegt in der Nutzung von Grauwasser.

Grauwasser, das aus Haushaltsabwasser stammt und nach entsprechender Aufbereitung wiederverwendet werden kann, stellt eine potenzielle Quelle für nicht-trinkbares Wasser dar. Diese alternative Wasserquelle kann dazu beitragen, den Bedarf an frischem Trinkwasser zu reduzieren und somit den Druck auf die begrenzten Ressourcen zu mindern. Dieser Ansatz erfordert jedoch nicht nur eine infrastrukturelle Anpassung, sondern auch intelligente Speicher- und Regelungskonzepte, um eine effiziente und bedarfsgerechte Verfügbarkeit zu gewährleisten.

Die Implementierung solcher intelligenten Regelungskonzepte eröffnet die Möglichkeit, Ressourcen effizient zu nutzen und den Wasserkreislauf im urbanen Raum nachhaltig zu gestalten. Allerdings ist es wichtig, nicht nur auf technologische Innovationen zu setzen, sondern auch gesellschaftliche Akzeptanz und politische Unterstützung zu gewinnen, um eine

flächendeckende Umsetzung dieser Konzepte zu erreichen. Nur durch eine ganzheitliche Betrachtung und Integration von technologischen, sozialen und politischen Aspekten kann eine nachhaltige Wasserbewirtschaftung in urbanen Räumen erfolgreich realisiert werden.

Zusätzlich gewinnen dezentrale, adaptive und sensorbasierte KI-Systeme zunehmend an Bedeutung, insbesondere im Kontext der urbanen Entwicklung. Mit dem voranschreitenden Prozess der Digitalisierung rücken vernetzte, auf dem Internet der Dinge (IoT) basierende Lösungen vermehrt in den Fokus, vor allem im Bereich des urbanen Grüns. Diese Technologien ermöglichen es, Messdaten automatisch zu erfassen und zu analysieren, was entscheidend für eine effiziente Steuerung und Optimierung verschiedener Prozesse ist.

Die Integration von Künstlicher Intelligenz (KI) und dem Internet der Dinge bietet vielfältige Möglichkeiten, um Städte nachhaltiger und lebenswerter zu gestalten. Im urbanen Grün spielen diese Technologien eine besonders wichtige Rolle, da sie dazu beitragen können, Ressourcen effizient zu nutzen und die Pflege von Grünflächen zu optimieren. Durch dezentrale, adaptive KI-Systeme werden Entscheidungsprozesse vor Ort ermöglicht, wodurch eine schnellere Reaktion auf Veränderungen in der Umwelt und den Grünanlagen erfolgen kann. Dies ist besonders im urbanen Grün von Vorteil, da beispielsweise Umweltparameter, Bewässerungsbedarf oder die Gesundheit von Pflanzen kontinuierlich überwacht werden können. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage für präzise Entscheidungen und ermöglichen eine bedarfsgerechte Pflege von Grünflächen.

Künstliche neuronale Netze, eine Form von Machine Learning (ML)-Algorithmen, kommen nicht nur zur Datenanalyse zum Einsatz, sondern auch zur Fehlererkennung, Fehlerisolierung und Fehlerbehebung von Sensoren. Diese fortschrittlichen Algorithmen ermöglichen eine selbstständige Anpassung und Optimierung der Systeme, was zu einer höheren Effizienz und Zuverlässigkeit führt.

Insgesamt zeigen diese Entwicklungen, dass die intelligente Verknüpfung von dezentralen, adaptiven KI-Systemen und IoT-basierten Lösungen im urbanen Grün das Potenzial hat, eine nachhaltige und ressourceneffiziente Entwicklung voranzutreiben. Die automatische Datenerfassung und -analyse in Verbindung mit fortschrittlichen KI-Technologien ermöglichen nicht nur eine präzise Steuerung von Prozessen, sondern auch eine proaktive Fehlererkennung und -behebung. Damit werden nicht nur die Anforderungen an die Pflege von Grünflächen erfüllt, sondern auch die Lebensqualität in städtischen Gebieten nachhaltig verbessert.

Die Nutzung von Abwasserteilströmen, einschließlich Grauwasser, für die Bewässerung von Gemüse wird bereits in anderen Forschungsprojekten intensiv untersucht, wodurch sich ein breiteres Verständnis für die Potenziale und Herausforderungen dieser Technologien entwickelt.

Die positive Auswirkung von städtischer Begrünung auf das urbane Mikroklima und die Verdunstungskühlung ist in zahlreichen Studien belegt. Die Reduzierung des Wärmeinseleffekts und die Steigerung des thermischen Komforts sind entscheidende Aspekte, die durch eine gezielte Begrünung im städtischen Raum erreicht werden können. Die

Einbindung von intelligenten Systemen zur Bewässerung mit alternativen Wasserquellen wie Grauwasser stellt somit nicht nur einen technologischen Fortschritt dar, sondern auch einen Schritt in Richtung ressourceneffizienter und nachhaltiger urbaner Entwicklung. Diese Initiative trägt dazu bei, die städtische Umgebung nicht nur funktional, sondern auch ökologisch und sozial verantwortlich zu gestalten.

Der nachhaltige Erfolg innovativer Konzepte zur Erhaltung und Stärkung von Wohnquartieren liegt nicht nur in der technologischen Exzellenz, sondern auch in der Integration von praktischer Erfahrung und Forschungsergebnissen. Genau dieser ganzheitliche Ansatz wurde durch die vorliegende Projektidee verfolgt, die ein interdisziplinär zusammengesetztes Projektkonsortium ins Zentrum ihrer Bemühungen stellte. Dieses Konsortium vereint Fachkenntnisse aus den Bereichen Wohnungsbau, Gartenbau, Wasserwirtschaft, Bewässerungstechnik, künstliche Intelligenz und Gesundheit.

Das verbindende Ziel dieses interdisziplinären Projektkonsortiums war die Entwicklung eines wegweisenden Konzeptes für eine innovative und wissensbasierte Wasser- und Bodenbewirtschaftung. Dabei steht die ressourcenschonende Quartiersentwicklung im Mittelpunkt, um nicht nur den aktuellen, sondern auch den zukünftigen Herausforderungen im Bereich urbaner Lebensräume effektiv zu begegnen. Diese ganzheitliche Herangehensweise spiegelt den Anspruch wider, nicht nur technologisch fortschrittliche Lösungen zu entwickeln, sondern diese auch in den realen städtischen Kontext zu integrieren und somit einen nachhaltigen Beitrag zur urbanen Entwicklung zu leisten.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde die Entwicklung eines flexibel gestaltbaren Wassermanagements für städtische Grünanlagen angestrebt. Das Projekt wurde in Kooperation mit der Vivawest Wohnen GmbH durchgeführt und zielt darauf ab, in einem konkreten Untersuchungsraum innovative Ansätze für ein nachhaltiges Wassermanagement mit langfristiger Wirkung zu entwickeln.

Ein wichtiges Ziel dieses Projekts war die Erstellung eines umfassenden Leitfadens für Planer, der die erfolgreiche Integration von Grauwassernutzung in Quartiersentwicklungen ermöglicht. Der Leitfaden wird praxisorientierte Schritt-für-Schritt-Anleitungen und bewährte Methoden enthalten, um die Implementierung von Grauwassernutzungssystemen in urbanen Umgebungen zu erleichtern. Sowohl technische als auch rechtliche Aspekte werden dabei berücksichtigt, um sicherzustellen, dass die Umsetzung reibungslos verläuft. Zusätzlich wurde eine Entscheidungsmatrix erstellt, um eine umfassende Potentialabschätzung zu ermöglichen. Diese Matrix dient als Hilfsmittel, um die optimale Implementierung von Grauwassernutzungssystemen unter Berücksichtigung verschiedener Faktoren wie örtliche Gegebenheiten, Kosten und Effizienz zu unterstützen. Somit stellt der Leitfaden in Verbindung mit der Entscheidungsmatrix eine ganzheitliche Ressource dar, die Planern eine fundierte Grundlage für die Umsetzung nachhaltiger Quartiersentwicklungen bietet.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Planung und Ablauf

2.1.1 Identifizierung der technischen und organisatorischen Herausforderungen

In einem ersten Schritt wurden umfangreiche Studien ausgewertet, um die Rahmenbedingungen für die Grauwassernutzung zu ermitteln. Diese Untersuchungen konzentrierten sich auf technische, wirtschaftliche und rechtliche Aspekte, um einen ganzheitlichen Ansatz zur Implementierung dieser nachhaltigen Praxis zu entwickeln.

Die technischen Rahmenbedingungen für die Grauwassernutzung sind von entscheidender Bedeutung, um sicherzustellen, dass das aufbereitete Wasser den erforderlichen Qualitätsstandards entspricht. Es wurden verschiedene Aufbereitungstechnologien betrachtet, darunter Filterverfahren, Desinfektionstechniken und Membrantechnologien. Dabei wurden nicht nur die Effizienz der Technologien, sondern auch ihre Anwendbarkeit im Haushaltskontext berücksichtigt.

Die wirtschaftlichen Aspekte der Grauwassernutzung wurden ebenfalls eingehend untersucht, um die Machbarkeit zu bewerten. Hierbei wurden die Kosten für die Installation von Grauwasseraufbereitungsanlagen, die Einsparungen bei Frischwasserkosten und die potenziellen Vorteile für die Umwelt berücksichtigt. Die Studien zielen darauf ab, praxisorientierte Empfehlungen zu geben, wie Unternehmen und Privathaushalte wirtschaftlich von der Grauwassernutzung profitieren können.

Zusätzlich wurden die rechtlichen Rahmenbedingungen der Grauwassernutzung in Deutschland ermittelt, um sicherzustellen, dass die Implementierung dieser Praxis im Einklang mit bestehenden Gesetzen und Vorschriften erfolgt. Dazu gehören Fragen zur Wasserqualität, zur Entsorgung von aufbereitetem Grauwasser und zur Einhaltung von Bauvorschriften.

Die Auswertung von Studien zu den technischen, wirtschaftlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen für die Grauwassernutzung legt den Grundstein für eine nachhaltige und effiziente Umsetzung dieser ressourcenschonenden Praxis. Die Erkenntnisse dienen nicht nur der Entwicklung von Leitlinien, sondern auch als Informationsquelle für alle Interessengruppen, die einen Beitrag zur nachhaltigen Wassernutzung leisten möchten. Mit einem fundierten Verständnis der Rahmenbedingungen kann die Grauwassernutzung als vielversprechende Alternative zur herkömmlichen Wasserversorgung weiter vorangetrieben werden.

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurden in einem nächsten Schritt neben den technischen, wirtschaftlichen und rechtlichen Aspekten zusätzliche Faktoren für das Gelingen der Grauwassernutzung berücksichtigt. Dabei standen die Identifizierung maßgeblicher Einflussgrößen für das Wohnumfeld im Fokus. Die Analyse erstreckte sich über eine umfassende Bewertung der Umweltfaktoren und individuellen Bedürfnisse, um eine optimale Integration der Grauwassernutzung im Wohnbereich zu gewährleisten. Ein weiterer

bedeutender Aspekt war die genaue Ermittlung des Wasserbedarfs für Grünflächen im Wohnumfeld. Diese Berücksichtigung ermöglicht eine zielgerichtete Planung und Nutzung von Grauwasserressourcen, um den spezifischen Bedarf für die Bewässerung von Grünanlagen im Wohngebiet effizient abzudecken.

In einer weitergehenden Analyse wurde ein besonderes Augenmerk auf die Qualitätsüberwachung von Grauwasser für Bewässerungszwecke gelegt. Hierbei erfolgte eine ausführliche Recherche nach geeigneten Parametern, wobei der Fokus insbesondere auf innovativen Messgrößen lag. Der Ansatz konzentrierte sich dabei auf Parameter, die sich für die Entwicklung von KI-basierter Messdatenverarbeitung eignen. Die Integration von Künstlicher Intelligenz in die Qualitätsüberwachung ermöglicht nicht nur präzisere und effizientere Messungen, sondern trägt auch dazu bei, den Überwachungsprozess kontinuierlich zu verbessern. Durch die Berücksichtigung dieser Aspekte wird die Gesamtstudie um eine wichtige Dimension erweitert, die nicht nur die Grauwassernutzung selbst, sondern auch fortschrittliche Methoden zur Qualitätskontrolle und Datenverarbeitung in den Fokus rückt.

Zur umfassenden Ermittlung der Potentiale von Grauwasser wurden neben technischen und qualitativen Überlegungen auch die baulichen Gegebenheiten von Bestands- und Neubauten untersucht. Ein wesentlicher Schwerpunkt lag dabei auf der Analyse der baulichen Infrastruktur, um festzustellen, inwiefern diese eine Integration von Grauwassernutzung ermöglicht. Hierbei wurden nicht nur existierende Gebäudestrukturen betrachtet, sondern auch Neubauten in den Fokus genommen, um von Anfang an eine effiziente Nutzung von Grauwasser zu ermöglichen. Eine entscheidende Rolle spielte dabei die Entwicklung einer geeigneten Struktur, um die Bereitstellung von Grauwasser für Bewässerungszwecke zu ermöglichen. Hierbei wurden Aspekte wie Speicherung und Transport des aufbereiteten Wassers berücksichtigt, um eine nachhaltige und reibungslose Integration in bestehende und zukünftige Bauvorhaben zu gewährleisten. Diese ganzheitliche Betrachtung der baulichen Infrastruktur bildet eine essenzielle Grundlage für die erfolgreiche Umsetzung von Grauwassernutzungskonzepten im urbanen Raum.

Die Durchführung der Untersuchungen im Rahmen des Projekts erforderte eine sorgfältige Analyse und Bewertung verschiedener Grauwasserquellen. Ein wesentlicher Schritt bestand darin, die Vielfalt der verfügbaren Grauwasserquellen zu identifizieren und ihre Eignung für die geplanten Untersuchungen zu bewerten. Hierbei wurden unterschiedliche Ursprungsorte von Grauwasser in Betracht gezogen. Die Auswahl der geeigneten Grauwasserquellen spielte eine entscheidende Rolle, um sicherzustellen, dass die Untersuchungen realitätsnahe Ergebnisse lieferten und gleichzeitig den Anforderungen und Zielen des Projekts gerecht wurden. Diese gründliche Analyse bildete somit die Grundlage für die durchgeführten Untersuchungen im Zusammenhang mit der Nutzung und Aufbereitung von Grauwasser.

2.1.2 Entwicklung und Erprobung intelligenter Systeme

Im anschließenden Schritt erfolgte die Entwicklung eines umfassenden Konzepts, das auf serverseitiger, KI-basierter Messdatenverarbeitung beruht. Hierbei wurden bewährte KI-Methoden genutzt und speziell an die vegetationspezifischen Bedürfnisse angepasst. Ein zentraler Fokus lag dabei auf der optimalen Verteilung der Jahreswassermenge unter Berücksichtigung von Wetterdaten. Die Integration von Künstlicher Intelligenz ermöglichte eine präzise und dynamische Anpassung des Bewässerungskonzepts, um den spezifischen Anforderungen der Pflanzen während unterschiedlicher Wachstumsphasen gerecht zu werden. Durch die Einbeziehung von Wetterdaten kann das Konzept zudem auf wechselnde Umweltbedingungen reagieren und die Wasserverteilung effizient steuern. Dieser innovative Ansatz stellte sicher, dass die Bewässerung auf der Grundlage von Echtzeitdaten optimiert wird, um eine ressourcenschonende und bedarfsgerechte Versorgung der Grünflächen zu gewährleisten.

Für die Gewährleistung einer sicheren Nutzung von Grauwasser wurde eine detaillierte Analyse durchgeführt, um relevante Indikatorparameter zu ermitteln. Dieser Prozess umfasste die sorgfältige Auswertung von Literaturdaten, um auf fundierte Erkenntnisse zurückzugreifen. Ziel war es, Parameter zu identifizieren, die zuverlässige Informationen über die Qualität des Grauwassers liefern und somit die Sicherheit bei der Wiederverwendung gewährleisten können. Unter Berücksichtigung der bereits vorhandenen wissenschaftlichen Erkenntnisse wurden Indikatoren ausgewählt, die Aufschluss über potenzielle Schadstoffe, Mikroorganismen und andere relevante Aspekte der Wasserqualität geben. Die sorgfältige Auswahl dieser Indikatorparameter bildet die Basis für effektive Überwachungsmechanismen und ermöglicht die Umsetzung von Maßnahmen zur Aufbereitung und Sicherung der Grauwasserqualität für diverse Anwendungen. Durch die Integration von Literaturdaten in diesen Prozess wird sichergestellt, dass die ermittelten Indikatoren den aktuellen wissenschaftlichen Standards entsprechen und somit einen verlässlichen Beitrag zur sicheren Grauwassernutzung leisten.

In der Folge wurden explorative Untersuchungen von Grauwasser durchgeführt, wobei der Nachweis hygienisch relevanter Parameter im Fokus stand. Hierbei kamen sowohl etablierte kulturelle als auch innovative molekularbiologische Nachweisverfahren zum Einsatz. Die Verwendung traditioneller kultureller Verfahren ermöglichte die Identifizierung und Quantifizierung von Mikroorganismen auf konventionelle Weise. Gleichzeitig wurden jedoch auch modernste molekularbiologische Methoden angewendet, die auf genetischen Informationen basieren. Diese innovativen Verfahren erlaubten eine präzisere Erfassung von genetischem Material, was eine sensitivere Überwachung von Grauwasser ermöglichte. Durch die Kombination beider Ansätze konnten hygienisch relevante Parameter umfassend und zuverlässig nachgewiesen werden. Diese multidimensionale Herangehensweise gewährleistet eine gründliche Überwachung der Wasserqualität und stellt sicher, dass potenzielle Gefahren in Grauwasserquellen präzise erkannt und bewertet werden können.

Zum Abschluss der umfassenden Untersuchungen erfolgte eine eingehende Bewertung der Eignung von Grauwasser für die Bewässerung. Diese Bewertung basierte auf den zuvor ermittelten Indikatorparametern, hygienischen Nachweisen und den Ergebnissen der explorativen Untersuchungen. Es wurde eine umfassende Analyse durchgeführt, um sicherzustellen, dass das aufbereitete Grauwasser den Qualitätsstandards entspricht und gleichzeitig den Anforderungen an eine sichere und effiziente Bewässerung gerecht wird. Die abschließende Bewertung bildet somit die Grundlage für fundierte Empfehlungen zur praktischen Anwendung von Grauwasser in der Bewässerung und trägt dazu bei, nachhaltige und ressourcenschonende Wassernutzungskonzepte zu entwickeln.

2.1.3 Aufstellung eines Konzepts und Handreichung zur Implementierung

Im folgenden Arbeitsschritt erfolgte die Erhebung von Daten zur Ableitung von Auslegungsparametern, wobei drei unterschiedliche Varianten der Bebauungsstruktur in Betracht gezogen wurden. Ziel dieser Datenerhebung war es, fundierte Informationen zu sammeln, um darauf basierend die Auslegungsparameter für das weitere Vorgehen zu definieren. Die Berücksichtigung von drei verschiedenen Varianten der Bebauungsstruktur ermöglichte eine umfassende Analyse, die die Vielfalt möglicher Szenarien abdeckte. Diese datenbasierte Vorgehensweise legt den Grundstein für eine effiziente Planung und Implementierung von Maßnahmen, die den spezifischen Anforderungen der unterschiedlichen Bebauungsstrukturen gerecht werden.

Zusätzlich wurde eine Grundmethodik entworfen, die darauf abzielt, eine nachhaltige Wasserbereitstellung und -verteilung zu steuern. Dieser methodische Ansatz wurde konzipiert, um effektive Richtlinien und Strategien zu etablieren, die eine umweltfreundliche und ressourcenschonende Wassernutzung ermöglichen. Dabei lag der Fokus auf der Entwicklung von Methoden zur nachhaltigen Sicherstellung einer zuverlässigen Wasserbereitstellung und -verteilung. Dieser Entwurf berücksichtigt verschiedene Aspekte, darunter Effizienz in der Wassernutzung, Anpassungsfähigkeit an Umweltveränderungen und die Integration innovativer Technologien. Die Grundmethodik dient als Leitfaden für die Umsetzung von Maßnahmen, die eine nachhaltige Wasserversorgung und -verteilung in diversen Kontexten fördern und somit einen Beitrag zum verantwortungsbewussten Umgang mit Wasserressourcen leisten können.

Basierend auf den Untersuchungen im Rahmen des Arbeitspakets 1 wurden in diesem Schritt mögliche Einflussgrößen detailliert beschrieben. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der konkretisierten Wasserbedarfsermittlung für Grünflächen im Wohnumfeld. Dieser Prozess erfolgt unter Berücksichtigung ausgewählter und übertragbarer Bestandsbauten. Die Identifikation von möglichen Einflussfaktoren ermöglicht eine präzise Analyse der unterschiedlichen Rahmenbedingungen, die den Wasserbedarf für Grünflächen beeinflussen können. Durch die Anwendung dieser Erkenntnisse auf ausgewählte und übertragbare Bestandsbauten wird eine generalisierbare Methode zur Wasserbedarfsermittlung für

Grünflächen im Wohnumfeld entwickelt. Diese Vorgehensweise trägt dazu bei, maßgeschneiderte Lösungen für eine nachhaltige Bewässerung zu gestalten, die sowohl ökologische als auch ökonomische Aspekte berücksichtigen.

Zusätzlich wurde ein Entwurf für ein Monitoring- und Steuerungskonzept der Wasserbereitstellung und -verteilung entwickelt. Dieses Konzept zielt darauf ab, effektive Mechanismen zur Überwachung und Regelung der Wasserversorgung zu etablieren.

Die erarbeiteten Methoden werden im Rahmen der Validierung anhand des Modellquartiers der Vivawest Wohnen GmbH sowie anhand bestehender oder in Arbeit befindlicher Quartierskonzepte der JENA-GEOS® überprüft. Diese Validierung bildet einen entscheidenden Schritt, um die Praxistauglichkeit und Anwendbarkeit der entwickelten Methoden in realen Siedlungsumgebungen zu gewährleisten. Das Modellquartier der Vivawest Wohnen GmbH dient dabei als exemplarisches Anwendungsbeispiel, um die Effektivität der Methoden in einer spezifischen Umgebung zu testen. Gleichzeitig werden bestehende und in Entwicklung befindliche Quartierskonzepte der JENA-GEOS® als Referenz genutzt, um die Übertragbarkeit der entwickelten Methoden auf verschiedene Kontexte sicherzustellen. Die Validierung trägt dazu bei, praxisrelevante Erkenntnisse zu gewinnen und die Methoden entsprechend zu verfeinern, um eine breite Anwendbarkeit und Wirksamkeit in unterschiedlichen Quartiersplanungen zu gewährleisten.



Abbildung 1: Untersuchungsgebiet in Dortmund Huckarde (Vorplanung Vivawest Wohnen GmbH, HVG)

2.1.4 Öffentlichkeitsarbeit und Verbreitung der Projektergebnisse

In enger Abstimmung mit Vivawest Wohnen GmbH wurden Konzepte erörtert, wie der Einbezug der Mieterinnen und Mieter im Wohnumfeld durch Informationsveranstaltungen und Workshops effektiv gestaltet werden kann. Ziel dieser Maßnahmen ist es, die Bewohnerinnen und Bewohner aktiv in den Prozess der Grauwassernutzung einzubinden und ein Verständnis für die nachhaltige Wassernutzung zu schaffen. Durch gezielte Informationsveranstaltungen sollen die Mieterinnen und Mieter über die Ziele, Vorteile und die technischen Aspekte der Grauwassernutzung informiert werden.

Die gewonnenen Ergebnisse aus den durchgeführten Untersuchungen werden in gemeinsamen Publikationen der Projektpartner veröffentlicht. Die Transparenz und der gemeinsame Austausch von Erkenntnissen sind von zentraler Bedeutung, um die Forschungsergebnisse einem breiteren Publikum zugänglich zu machen. Diese Veröffentlichungsstrategie dient nicht nur der wissenschaftlichen Gemeinschaft als Informationsquelle, sondern ermöglicht auch einen Beitrag zur öffentlichen Diskussion und Sensibilisierung für die Themen im Zusammenhang mit den durchgeführten Untersuchungen.

Zusätzlich wurde eine Zusammenstellung der ausgewerteten und gesammelten Daten für die Planungsprozesse in der ressourceneffizienten Quartiersentwicklung im Rahmen eines Leitfadens zusammengestellt. Dieser Leitfaden dient als umfassende Ressource, um die gewonnenen Erkenntnisse in praxisorientierte Handlungsempfehlungen zu überführen. Die zusammengetragenen Daten bieten dabei nicht nur eine Grundlage für die Entwicklung effizienter Quartierskonzepte, sondern ermöglichen auch eine zielgerichtete Umsetzung von Maßnahmen zur Ressourcenschonung. Der Leitfaden fungiert somit als praxisnahes Instrument für Fachleute, Planer und Entscheidungsträger, die sich in der ressourceneffizienten Quartiersentwicklung engagieren. Durch die Strukturierung und Aufbereitung der Daten wird eine effektive Integration der gewonnenen Erkenntnisse in die Planungspraxis erleichtert, um nachhaltige und innovative Quartiersentwicklungen voranzutreiben.

Um Planern die individuelle Abschätzung der Potentiale einer Grauwassernutzung zu ermöglichen, wurde eine spezifische Bewertungsmatrix entwickelt. Diese Matrix bietet eine strukturierte Methode, um die verschiedenen Aspekte der Grauwassernutzung zu bewerten und potenzielle Chancen sowie Herausforderungen zu identifizieren. Im Leitfaden wird diese Bewertungsmatrix ausführlich erörtert, wodurch Planer eine klare Anleitung für ihre Einschätzungen erhalten. Darüber hinaus wird die Bewertungsmatrix als Excel-Datei zur Verfügung gestellt, um eine praktische und benutzerfreundliche Anwendung zu gewährleisten. Dies ermöglicht Planern eine effiziente Analyse und Anpassung der Bewertungskriterien entsprechend den spezifischen Gegebenheiten ihrer Projekte. Die Bereitstellung dieser Instrumente unterstützt nicht nur die praxisnahe Anwendung der Grauwassernutzung, sondern fördert auch die Integration nachhaltiger Wassernutzungspraktiken in Planungsprozessen.

Im Rahmen folgender Vorträge wurden die Erkenntnisse der Fachöffentlichkeit zugänglich gemacht:

- Beier et al.: Wasserwiederverwendung im urbanen Raum und in der Landwirtschaft; 33. Hamburger Kolloquium zur Abwasserwirtschaft; 09/2023
- Kohlhepp: Potentialabschätzung zur Nutzung von Grauwasser im Kontext einer nachhaltigen Siedlungsökologie; 29. Thüringer Wasserkolloquium; 03/2024
- Kohlhepp et al.: Nutzung von Grauwasser in einer nachhaltigen Siedlungsökologie; Forum Young Scientists; 03/2024
- Beier et al.: Möglichkeiten der Wasserwiederverwendung in urbanen Räumen und der Landwirtschaft; ThWic Lecture Series; 06/2024

2.2 Darstellung der Projektpartner

2.2.1 Bauhaus-Universität Weimar

Bauhaus-Universität Weimar
Professur Siedlungswasserwirtschaft und
Technologien urbaner Stoffstromnutzungen
Prof. Dr.-Ing. Silvio Beier
Wielandstraße 2, 99423 Weimar
Tel: +49(0)3643 584658
Fax: +49(0)3643 584637
E-Mail: silvio.beier@uni-weimar.de
<https://www.uni-weimar.de/de/bau-und-umwelt/professuren/siedlungswasserwirtschaft/>

**Bauhaus-Universität
Weimar**

Das Bauhaus-Institut für zukunftsweisende Infrastruktursysteme (b.is) der Bauhaus-Universität Weimar wurde gegründet, um aktuelle Herausforderungen in der Wasserversorgung und Entsorgung von Abwasser mit Hilfe neuer Technologien zu begegnen. Die Professur Siedlungswasserwirtschaft und urbane Stoffstromnutzungen befasst sich seit vielen Jahren mit theoretischen, experimentellen und ingenieurpraktischen Fragestellungen der Abwassertechnik und Infrastrukturgestaltung. Schwerpunkte liegen in der Entwicklung von Verfahren zur Stoffstromnutzungen sowie der Transition hin zu neuen Infrastruktursystemen mit Wasserwiederverwendung [A, B].

Bedingt durch den Klimawandel und dem Urbanisierungstrend werden langfristig effiziente Lösungen benötigt, um anthropogene Umweltbelastungen zu reduzieren und Städte dauerhaft lebenswert zu gestalten. Ein wichtiger Aspekt ist dabei eine sinnvolle Nutzung der Ressource Wasser, um die Entwicklung einer grünen Infrastruktur zu ermöglichen [C, D, E]. Den Grünflächen im städtischen Bereich kommt hier eine besondere Bedeutung zu, da verschiedene umweltrelevante Bereiche zusammenkommen. Neben einer Verbesserung des Stadtklimas und einer Verringerung der Luftverschmutzung wird zusätzlich die Biodiversität gefördert, um nur einige Punkte zu benennen. Bedeutsam ist, zukünftige Nutzungskonflikte um zur Verfügung stehende Wasserressourcen zu erkennen und nachhaltige Lösungen zu entwickeln.

Die Bauhaus-Universität Weimar verfügt über einschlägige Projektreferenzen.

Referenzen des Antragstellers

- A FuE-Vorhaben: Interkommunale Kooperation und Transformation als Grundlage einer regionalen Kreislaufwirtschaft und einer nachhaltigen Regionalentwicklung im Landkreis Saarlouis (Konnekt), Laufzeit: 01.07.2021 bis 31.12.2024, Fördermittelgeber BMBF.
- B FuE-Vorhaben: Vertikale KlimaKlärAnlage zur Steigerung der Ressourceneffizienz und Lebensqualität in urbanen Räumen (VertiKKA), Laufzeit: 01.04.2019 bis 31.03.2022, Fördermittelgeber BMBF.
- C Hörnlein, S., Londong, J., Veser, S., Berndt, M. 2022. Technische Lösungen für Source Separation im Bestand, FBR Wasserspiegel 2/22 (Volume 27), Seiten 27-33, fbr - Bundesverband für Betriebs- und Regenwasser e.V., Darmstadt.
- D Londong, J. 2021. Lösungen zur Wasserwiederverwendung im urbanen Kontext, Vortrag bei der Tagung "Klimawandel: Herausforderungen und Lösungsansätze" an der Universität Luxemburg am 19.10.2021 online unter:
<https://eau.gouvernement.lu/dam-ssets/actualites/2021/documents/fachsymposiumklimawandel/Londong-20211003-Lösungen-zur-Wasserwiederverwendung-im-urbanen-Kontext-SH.pdf>
- E Aicher, A.; Börmel, M.; Beier, S. 2020. Grauwasserreinigung an der Fassade. In: WASSER und ABFALL, Ausgabe 7-8.

2.2.2 Technische Universität Hamburg

Technische Universität Hamburg
Institut für Digitales und Autonomes Bauen
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kay Smarsly
Blohmstraße 15
21079 Hamburg
Tel.: +49 40 42878-5023
E-Mail: kay.smarsly@tuhh.de
Web: <http://www.tuhh.de/idab>

**Bauhaus-Universität
Weimar**

Das im Jahr 2021 neu gegründete Institut für Digitales und Autonomes Bauen befasst sich insbesondere mit intelligenter Sensorik und künstlicher Intelligenz für das Monitoring gebauter und natürlicher Infrastruktur. Der Institutsleiter, Professor Smarsly, forscht seit etwa 20 Jahren Monitoringbereich, mit besonderem Fokus auf cyber-physischen Systeme, smarte Infrastruktur, intelligente Sensorik und Aktorik, der Informationsmodellierung (u. a. Building Information Modeling), Baurobotik, additive Fertigung sowie Techniken der künstlichen Intelligenz für Industrie 4.0- und IoT-Anwendungen.

Das Institut verfügt über ein Sensoriklabor und über ein Labor für die additive Fertigung und es beherbergt gemeinsam mit dem Institut für Kommunikationsnetze und dem Institut für Hochfrequenztechnik das IoT-Labor der Technischen Universität Hamburg. Für anspruchsvolle Simulationen steht der High-Performance-Compute-Cluster „Bombus“ bereit, der von der Technischen Universität Hamburg betrieben wird (6600 CPU-Kerne, 350 TB Speicherplatz, 32 TB RAM). Darüber hinaus können die Prüfeinrichtungen und Versuchshallen der Institute des Studiendekanats Bauingenieurwesen sowie der zentralen Einrichtungen der Technischen Universität Hamburg genutzt werden, u. a. das mechanisch-technologische Labor, das Physiklabor und das Elektrotechniklabor.

Die für das beantragte Projekt geleisteten Vorarbeiten umfassen zum einen Digitalisierungskonzepte, mit dem Ziel, den fortlaufenden, tiefgreifenden Veränderungsprozess im Bau- und Umweltingenieurwesen zu unterstützen und zum anderen KI-basierte Sensorkonzepte, die die Datenerfassung und -analyse zuverlässiger und effizienter gestalten sollen. Zur Digitalisierung von Infrastrukturbauwerken und Bauprozessen wurden Konzepte entwickelt und erprobt, die es ermöglichen, die Infrastruktur zielgerichtet zu optimieren und sie mit dem Building Information Modeling (BIM) zu verzahnen [A]. Hierbei ist die Standardisierung bzw. die Erweiterung bestehender BIM-Standards (wie der Industry Foundation Classes, IFC) um die neuen Erfordernisse, die die Digitalisierung mit sich bringt, eine zentrale Forschungsfrage.

Erweiterungen des IFC-Standards wurden in verschiedenen Vorarbeiten vorgeschlagen, u. a. um Kläranlagen einschließlich der vielschichtigen Prozesse IFC-basiert formal zu beschreiben [B]. Es konnte gezeigt werden, dass es mit der Erweiterung des IFC-Standards möglich ist, BIM-basierte digitale Zwillinge im Bauwesen so zu definieren, dass diese – als digitale Repräsentationen von Infrastrukturbauwerken (den physischen Zwillingen) – ihre Eigenschaften, Zustände und Verhaltensweisen mit Hilfe von Modellen, Informationen und Daten erfassen und über den gesamten Lebenszyklus fortlaufend aktualisieren können. Neben der gemeinsam mit Industriepartnern durchgeführten, anwendungsorientierten Forschung wurde jüngst mit der lange überfälligen Grundlagenforschung zur Untersuchung der inneren, semantischen Struktur von digitalen Zwillingen und zur Entwicklung von objektiven Metriken zur Qualitätsbewertung von digitalen Zwillingen begonnen, gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft [C]. Hierfür wurden neue mathematische Modelle entwickelt, u. a. auf Basis der Kategorientheorie, der Typentheorie und formaler Logikkalküle. Diese substanzwissenschaftlich untermauerten Konzepte und Methoden wurden im Labormaßstab erprobt und können im beantragten Projekt praktisch angewendet werden.

Auch im zweiten Bereich projektrelevanter Vorarbeiten, den KI-basierten Sensorkonzepten, kann der Antragsteller auf über 20-jährige Forschungserfahrungen verweisen [D], aus denen u. a. drahtlose Sensorsysteme für das Monitoring hervorgegangen sind [E]. Ein maßgeblicher Forschungsschwerpunkt ist die Grundlagen- und Anwendungsforschung im Bereich sensorbasierter, eingebetteter und verteilt-kooperativ agierender Softwareeinheiten, die sich auf Konzepten der verteilten künstlichen Intelligenz und im Speziellen der Multiagentensystemtechnologie stützen. Auf dieser Basis wurden Echtzeit-Fernüberwachungskonzepte für das sensorbasierte Life-Cycle-Management, für die Schadensdiagnostik von Bauwerken, für intelligente Bewässerungssysteme und für das Monitoring von Hangrutschungen entwickelt und implementiert sowie mit Partnern aus der Ingenieurpraxis erprobt [F, G, H]. Die heterogenen Messdaten konnten durch geeignete Daten- und Systemintegrationskonzepte miteinander verzahnt und in sogenannten Cyber-Infrastrukturen ortsunabhängig verfügbar gemacht werden [I]. U. a. wurden hierfür Sensorsysteme mit Verfahren des maschinellen Lernens, mit Finite-Elemente-basiertem Model-Updating sowie mit probabilistischen Ansätzen angereichert. Weitere, in diesem Zusammenhang geleistete Vorarbeiten umfassen die integrierte Selbstdetektion von Sensorsystem-Fehlfunktionen, das effiziente Datenmanagement, die sensorgestützte Systemidentifikation und die Selbstsynchronisation von Sensorsystemen [J, K, L].

Das vorrangige, umweltrelevante Ziel innerhalb des Projekts ist die Entwicklung und Implementierung neuartiger Problemlösungsstrategien auf der Basis „neuer“ Technologien, um einen Erkenntnisgewinn zu ermöglichen, der mit konventionellen Methoden kaum möglich ist. Konkret soll ein dezentrales, adaptives und sensorbasiertes KI-System für eine ziel-, ort- und bedarfsgerechte sowie nachhaltige Bewässerung für die Bewirtschaftung von Gartenflächen entwickelt werden. Es wird erwartet, dass hiermit ein Beitrag geleistet werden

kann, um die Wasser- und Bodenbewirtschaftung sowie die Quartiersentwicklung ressourcenschonender, nachhaltiger und wirtschaftlicher zu gestalten.

Referenzen des Partners

- A Theiler, M. & Smarsly, K., 2018. IFC Monitor – An IFC extension for modeling structural health monitoring systems. *Advanced Engineering Informatics*, 37(2018), pp. 54-65.
- B Söbke, H., Peralta, P., Smarsly, K., & Armbruster, M., 2021. An IFC schema extension for BIM-based description of wastewater treatment plants. *Automation in Construction*, 129(2021), 103777.
- C Qualitätsbewertung digitaler Zwillinge auf der Basis mathematischer Abstraktion und Tangle-basierten Blockchain-Architekturen (Projektleiter: Professor Smarsly). Gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft, 2022-2025.
- D Mittrup, I. & Smarsly, K., 2002. Entwicklung eines Talsperren-Monitoring-Systems am Beispiel der Ennepetalsperre. In: *Forum Bauinformatik 2002*. Bochum, Germany, 09/16/2002.
- E Smarsly, K., Dragos, K., & Kölzer, T., 2022. Sensorintegrierte digitale Zwillinge für das automatisierte Monitoring von Infrastrukturbauwerken. *Bautechnik* 99(2022).
- F Smarsly, K., Hartmann, D. & Law, K. H. 2013. An Integrated Monitoring System for Life-Cycle Management of Wind Turbines. *International Journal of Smart Structures and Systems*, 12(2), pp. 209- 233.
- G Smarsly, K. & Law, K. H., 2012. Coupling Wireless Sensor Networks and Autonomous Software for Integrated Soil Moisture Monitoring. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Hydroinformatics*. Hamburg, Germany, 07/14/2012.
- H Smarsly, K., Georgieva, K., König, M. & Law, K. H., 2012. Monitoring of Slope Movements coupling Autonomous Wireless Sensor Networks and Web Services. In: *Proceedings of the First International Conference on Performance-Based Life-Cycle Structural Engineering*. Hong Kong, China, 12/05/2012.
- I Fitz, T., Theiler, M. & Smarsly, K., 2019. A metamodel for cyber-physical systems. *Advanced Engineering Informatics*, 41(2019), 100930.
- J Dragos, K. & Smarsly, K., 2016. Distributed adaptive diagnosis of sensor faults using structural response data. *Smart Materials and Structures*, 25(10), 105019.
- K Law K. H., Smarsly, K. & Wang, Y., 2014. Sensor Data Management Technologies for Infrastructure Asset Management. In: Wang, M. L., Lynch, J. P. & Sohn, H. (eds.). *Sensor Technologies for Civil Infrastructures*. Pp. 3-32. Sawston, UK: Woodhead Publishing, Ltd.
- L Dragos, K., Magalhães, F., Manolis, G. D., & Smarsly, K., 2022. Cross-spectrum-based synchronization of structural health monitoring data. In: *Proceedings of the 10th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2022)*. Palermo, Italy, 07/04/2022

2.2.3 Hochschule Hamm-Lippstadt

Hochschule Hamm-Lippstadt, Körperschaft öffentlichen Rechts
Departement Hamm 2
Prof. Dr. Claudia Klümper
Marker Allee 76-78
59063 Hamm
Tel.: 02381 8789-513
E-Mail: claudia.kluemper@hshl.de



Die HSHL ist eine von vier in Nordrhein-Westfalen neu gegründeten Fachhochschulen. Aktuell sind rund 6.200 Studierende in 14 Bachelorstudiengängen und 10 Masterstudiengängen eingeschrieben. Diese werden durch 108 Professor*innen und 135 wissenschaftliche Mitarbeitende betreut.

Auf dem Gebiet «Wasser und Gesundheit» kooperiert die Hochschule Hamm-Lippstadt (HSHL) bereits in verschiedenen Vorhaben mit der Bauhaus-Universität Weimar. Das Labor für Umweltanalytik der HSHL wird von Frau Prof. Claudia Klümper geleitet, die seit ca. 20 Jahren in den Bereichen Wasser- und Umweltanalytik sowie Public Health wissenschaftlich aktiv. Untersuchungen im Bereich Wasserhygiene sowie die Untersuchung nachhaltiger und innovativer ingenieurwissenschaftlich-technischer Lösungsansätze stehen dabei im Zentrum ihrer Aktivitäten. Herauszustellen sind die Wasserwiederverwendung und molekularbiologische Verfahren zum Nachweis vorhandener Abwasserbelastungen.

Die HSHL verfügt über mehrere Labore der Sicherheitsstufe 1 (S1-Labore), als auch über ein Labor der Schutzstufe 2 nach Biostoffverordnung, welches von Frau Prof. Claudia Klümper geleitet wird. Darüber hinaus können im Rahmen des Projektes auch die Labor der nass-chemischen und chemisch-instrumentellen Analytik genutzt werden.

Frau Prof. Klümper verfügt über ausgewiesene Expertise im Bereich des Umweltmonitorings und der Wasseranalytik. Neben klassischen (wasser-)mikrobiologische Verfahren zählen auch molekularbiologische Verfahren in der (Ab-)Wasseranalytik zu ihren Forschungsschwerpunkten. Diese Erfahrungen werden im Rahmen des vorliegenden Projektes für die Entwicklung dezentraler und sensorbasiertes KI-System für eine ziel-, ort- und bedarfsgerechte sowie nachhaltige Bewässerung für die Bewirtschaftung von Gartenflächen gewinnbringend einbezogen.

Referenzen des Partners

Auszug aus aktuellen und abgeschlossenen Forschungsprojekten der HSHL mit Bezug zur Wasserhygiene:

- HSHL-Promotionsvorhaben in Kooperation mit der BUW über das Thema „Elimination von hygienisch relevanten Mikroorganismen im Abwasser durch innovative Reinigungsverfahren“
- M3R: Multi-Mode-Mikroplatten-Reader zur Etablierung und Weiterentwicklung wirkungsbezogener Untersuchungsmethoden für das Monitoring von Mikroschadstoffen in der Umwelt und in Lebensmitteln; Ministerium für Innovation, Wissenschaft und Forschung, NRW
- Dezentrales Abwassermonitoring von SARS-CoV-2 am Fallbeispiel Krankenhaus(abwasser); Projektpartner: BUW, HSHL, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen und Aggerverband, AJ (Eigenmittel der Partner)
- Pilotprojekt »SARS-CoV-2-Abwassermonitoring in Thüringen« (CoMoTH); Verbundpartner: Bauhaus-Universität Weimar (Koordinator), Analytik Jena GmbH; Unterauftragnehmer: Technische Universität Hamburg, Hochschule Hamm-Lippstadt; Finanzierung: Thüringer Aufbau-bank

Auszug relevanter Publikationen mit Bezug zum Forschungsprojekt:

1. Maletz S., Floehr T., Beier S., Klümper C., Brouwer A., Behnisch P., Higley E., Giesy J.P., Hecker M., Gebhardt W., Linnemann V., Pinnekamp J., Hollert H. (2013): In vitro characterization of the effectiveness of enhanced sewage treatment processes to eliminate endocrine activity of hospital effluents. *Water Research* 47:1545-1557.
2. Beier S., Cramer C., Mauer C., Köster S., Schröder H.F., Pinnekamp J. (2012): MBR technology: A promising approach for the (pre-)treatment of hospital wastewater. *Water Sci Technol* 65(9):1648-53.
3. Beier S., Cramer C., Köster S., Mauer C., Palmowski L., Schröder H.F., Pinnekamp J. (2011): Full scale membrane bioreactor treatment of hospital wastewater as forerunner for hot-spot wastewater treatment solutions in high density urban areas. *Water Sci Technol* 63(1):66-71.
4. Altena K., Guder A., Cramer C., Bierbaum G. (2000): Biosynthesis of the Lantibiotic Mer-sacidin: Organization of a Type B Lantibiotic Gene Cluster. *Appl. Environ. Microbiol.* 66:2565-2571.

Frau Prof. Klümper ist Mitglied in folgenden Gremien/Facharbeitsgruppen:

- Mitglied der Arbeitsgruppe Analytik im Rahmen des DWA-Vernetzungsprojektes CoroMoni.
- Mitglied im Arbeitskreis „SARSCoV-2 und andere Viren“ im Unterausschuss 03 „Mikrobiologie“ des NA 119- 1-03 AA „Wasseruntersuchung“ im DIN Normenausschuss Wasserwesen
- Mitglied der DWA-Ad-Hoc-AG Hygiene in der Wasserwirtschaft – Arbeit mit Erstellung des DWA-Themenbandes T1/2022 «Hygiene in der Wasser-, Abwasser und Abfallwirtschaft» im April 2022 abgeschlossen

2.2.4 HVG Grünflächenmanagement GmbH

HVG Grünflächenmanagement GmbH
Herr Gerald Müller
Bergmannsglückstraße 35
45896 Gelsenkirchen
Telefon: +49 209 359-75400
Fax: +49 209 359-75147
E-Mail: info@hvg-mbh.de



Die HVG Grünflächenmanagement GmbH verantwortet innerhalb der Vivawest Dienstleistungen-Gruppe das Management und die Pflege der Außenanlagen von Liegenschaften.

Gegründet wurde die HVG Grünflächenmanagement GmbH im Jahr 1989, damals mit dem Ziel, die land- und forstwirtschaftlichen Liegenschaften der RAG Aktiengesellschaft professionell zu bewirtschaften. In den 1990er Jahren verlagerte sich der Schwerpunkt der Tätigkeiten dann zunehmend auf die Betreuung der wohnungswirtschaftlichen Liegenschaften der RAG Immobilien GmbH, die später in der Vivawest Wohnen GmbH aufgegangen ist. In den Folgejahren gewann HVG immer mehr Kunden aus den Bereichen Wohnungswirtschaft und Industrie für sein umfassendes Grünflächenmanagement.

Zum Kerngeschäft der HVG gehören seit über 20 Jahren die Bewirtschaftung und die Verkehrssicherung wohnungswirtschaftlicher sowie gewerblicher und industrieller Liegenschaften sowie die Entwicklung nachhaltiger Funktionskonzepte im Immobilienumfeld. Heute betreut HVG rd. 325.000 Wohnungen, erbringt für 2,9 Mio. m² Industriefläche sowie 11,5 Mio. m² wohnungswirtschaftliche Fläche das Grün- und Freiflächenmanagement und kontrolliert regelmäßig und zuverlässig für rd. 360.000 Bäume, 21 Mio. m² Freifläche und 1.700 Spielplätze die Verkehrssicherung. Mit einem Jahresumsatz von mehr als 40 Mio. Euro und rund 360 Mitarbeitern zählen wir heute über die Grenzen von NRW hinaus zu den größten Unternehmen im Bereich Grünflächenmanagement. Neben unserem Unternehmenssitz in Gelsenkirchen verfügen wir über Standorte in Datteln-Ahsen, Moers, Leichlingen und Alsdorf.

<https://www.hvg-mbh.de/unternehmen/portrait/>

Referenzen des Partners

Wir bieten ein **ganzheitliches Managementpaket im Bereich der Freiflächenentwicklung und -pflege**: von der Bestandsaufnahme und -bewertung über die Prozess- und Schnittstellenoptimierung bis zur Leistungserbringung und -

dokumentation in einem digitalen System. Wir beraten Sie gerne und umfassend bei der Entwicklung und Pflege Ihrer Wohn-, Gewerbe- und Industriestandorte – auch im Rahmen von Service-Level-Agreements. Wir verfügen über eine mehr als 20-jährige Erfahrung in der Entwicklung, Rekultivierung und Pflege von wohnungswirtschaftlich genutzten Flächen.

Vom Privatgarten bis zur Wohnsiedlung – wir planen, bauen und modernisieren. Landschaft gestalten ist unsere Leidenschaft. Mit unserem Know-how wird Wertsteigerung zum Kinderspiel.

Gärten sind unsere grünen Wohnzimmer – und zusätzlich das Aushängeschild ihrer Wohnimmobilien. Wir planen, gestalten und bauen Aussenanlagen. Die Palette reicht dabei vom individuell gestalteten Privatgarten bis hin zur modular geplanten und pflegeoptimierten Wohnsiedlung.

2.2.5 JENA-GEOS® - Ingenieurbüro GmbH

JENA-GEOS®-Ingenieurbüro GmbH

Dr. Kersten Roselt

Saalbahnhofstraße 25c

07743 Jena

Telefon: +49 3641 4535-0

Fax: +49 3641 442806

E-Mail: info@jena-geos.de



Die JENA-GEOS®-Ingenieurbüro GmbH erbringt als Mittelständler seit 1990 geowissenschaftliche Consulting- und Forschungsleistungen und führt mit 100jähriger Tradition das Wirken ihrer Vorgänger fort. Vom ehemaligen Explorateur von Lagerstätten wie Braunkohle über die Mitwirkung bei der Beseitigung der dort entstandenen Altlasten gestaltet das Unternehmen heute den nächsten Strukturwandel mit der effizienten und ökologischen Nutzung erneuerbarer Ressourcen mit. Nachhaltigkeit ist zum Geschäftsmodell geworden.

Breit aufgestellt mit den Bereichen Geologie/Hydrogeologie/Hydrologie, Bodenschutz und Landnutzungsplanung, Tiefbauplanung und Geotechnik, Altlasten und Revitalisierung nehmen Aufgaben der Transformation zunehmend größeren Raum ein, hier speziell mit den Departments Geothermie sowie STADT+ENERGIE. Seit nunmehr 15 Jahren hat die JENA-GEOS® auf dem Fachgebiet des energetischen Umbaus von Bestandsquartieren vorgedacht und Methoden eines systemischen Ansatzes für die Transformation entwickelt [1] [2].

Heute wirken die Ingenieur*innen zudem im Verbund der Genossenschaft EnergieWerkStadt® e.G. und entwickeln Integrierte Energetische Quartierskonzepte für Wohngebiete und Dörfer über die Förderrichtlinie KfW 432. Die langjährige Beschäftigung mit dem Thema führt auch zur ganzheitlichen Prognose zukünftiger Entwicklungen [3]. JENA-GEOS® ist Initiator der Initiative smood® - smart Neighborhood, einem Regionalen Wachstumskern mit 10 Mio € Förderung (BMBF), in dem Quartiers-skalierte Technologien entwickelt werden [4]. Die Einbeziehung weiterer Themen wie blaugrüne Infrastruktur, Biodiversität und Naturschutz [6] [7] u.v.m. sowie die Entwicklung von Teilhabe und Lokalen Ökonomien [5] führen im systemischen Ansatz zur Entwicklung neuer Lebensqualität. Die aktuelle Bearbeitung von Integrierten Energetischen Quartierskonzepten durch JENA-GEOS® auf dem Markt verschafft dem antragstellenden Konsortium die Akquise von Realdaten und die Möglichkeit der Validierung von Projekt(Teil-)Ergebnissen.

Projektziel der JENA-GEOS® ist die Nutzung der Ergebnisse für die praktische Ingenieurarbeit, aus diesem Grunde hat sie während der Entwicklung immer auf die Verwertbarkeit geachtet.

Referenzen des Partners

- [1] Reich, A & K. Roselt, K. (Editing), D. Genske, F. Gasterstedt, L. Männel, I. Quaas, A. Ruff, M. Schwarze (2016): Energieeffizienz im Quartier – eine Einführung in das effort-Instrument, Broschüre, Juli 2015.
- [2] ROSELT, K., I. QUAAS, D. GENSKE, U. KLOWONN, L. MÄNNEL, A. REICH, A. RUFF, M. SCHWARZE (2015): 'effort' (energy efficiency on-site) – a new method for planning and realization of energy-efficient neighbourhoods under the aspects of sustainability – Elsevier Procedia Engineering
- [3] Roselt, K. (2019): Quartiersumbau auf dem Weg zur Wirtschaftlichkeit – ARGOS Sonderausgabe August 2019
- [4] RWK smood® - smood® - smart neighborhood. Regionaler Wachstumskern zur ganzheitlichen Entwicklung von Bestandsquartieren (Abschluss 2022). www.smood-energy.de
- [5] BÜTTNER, C. & K. ROSELT (2020): Dezentrale energetische Quartiersversorgung als neues Feld lokaler Ökonomie. – Springer Nature 2020, in S. Henn et al. (Hrsg.), Lokale Ökonomie – Konzepte, Quartierskontexte und Interventionen
- [6] KATZSCHMANN, A. & K. ROSELT (2021): Mehr Grün in die Stadt! Die EnergieWerkStadt® eG erarbeitet Wege zur Einbindung Grüner Infrastruktur und von Naturschutz in die energetische Transformation in unseren Städten - ARGOS, I / 2021
- [7] BÜTTNER, CH., A. KATZSCHMANN, J. MAERCKER, MC RÜMMLER, D. EVERDING (2022): Biologische Vielfalt, Naturschutz und grüne Infrastruktur in Quartieren der „Energetischen Stadtsanierung“. - Abschlussbericht zum F+E-Vorhaben „Förderung von grüner Infrastruktur und Naturschutzbelangen in Quartieren der „Energetischen Stadtsanierung“ (FKZ 3520861300). – BfN 2022 (in Arbeit)

Alle Publikationen [1] – [6] stehen zum Download auf www.jena-geos.de/fachbeitraege/

2.3 Projektergebnisse

2.3.1 Entwurf der Grundmethodik eines Bewässerungsregimes

Anhand der Analyse eines spezifischen Untersuchungsgebiets wurde ein umfassendes Wassermanagement für städtische Grünanlagen entwickelt, wobei besonderes Augenmerk auf die Implementierung einer Grauwassernutzung gelegt wurde. Die Untersuchung konzentrierte sich darauf, innovative Ansätze zu entwickeln, die eine nachhaltige und effiziente Bewirtschaftung von Wasserressourcen in urbanen Grünflächen ermöglichen. Das untersuchte Gebiet diente als praktisches Testfeld, um die Umsetzbarkeit und die potenziellen Vorteile eines durchdachten Wassermanagements für städtische Grünanlagen zu bewerten.

Dies hat zur Entwicklung einer Grundmethodik beigetragen, die eine nachhaltige Wasserbereitstellung und -verteilung gewährleisten soll. Dieser Ansatz zielt darauf ab, praxisorientierte Lösungen für eine effiziente Nutzung und Verteilung von Wasserressourcen in städtischen Wohngebieten zu schaffen. Das entwickelte Konzept für die Stadtentwicklung fügt sich optimal in die Vision der Schwammstadt ein.

Dabei wurden verschiedene Faktoren berücksichtigt, darunter die Bedürfnisse der Bewohner, die räumlichen Gegebenheiten und die Verfügbarkeit von Wasserressourcen. Das vorgeschlagene Konzept für das Monitoring und die Steuerung der Wasserbereitstellung und -verteilung präsentiert eine ganzheitliche Herangehensweise zur effizienten Nutzung von Wasserressourcen in urbanen Umgebungen. Die Steuerung der Wasserbereitstellung erfolgt durch eine zentrale Steuerzentrale, die die Messung der Saugspannung im Boden verarbeitet. Hierbei ermöglicht die kontinuierliche Überwachung eine bedarfsgerechte Versorgung der Grünflächen.

Eine nachhaltige Energieversorgung wird durch Photovoltaik gewährleistet, die sowohl die Sonden zur Messung als auch die Steuerzentrale mit Energie versorgt. Dieser umweltfreundliche Ansatz trägt zur Reduzierung des ökologischen Fußabdrucks des Systems bei.

Die Einleitung der Bewässerung erfolgt über die Steuerzentrale, die den Bewässerungsbedarf auf Grundlage der gemessenen Saugspannung erkennt. Neben dem Niederschlagswasser, das von den Dachflächen der Gebäude erfasst wird, steht gereinigtes Grauwasser aus den Haushalten zur Verfügung. Beide Stoffströme werden in einem Zwischenspeicher, beispielsweise einem Kieswasserspeicher, zusammengeführt. Dieser Zwischenspeicher kann darüber hinaus als saisonaler Wärmespeicher dienen, was eine zusätzliche nachhaltige Nutzung ermöglicht.

Die Bewässerung der Grünflächen wird dann aus dem Zwischenspeicher initiiert, wodurch eine effiziente und ressourcenschonende Wasserbewirtschaftung gewährleistet wird. Dieses integrierte Konzept berücksichtigt somit nicht nur die Wasserverfügbarkeit, sondern auch den Energieverbrauch und die Wiederverwendung von Grauwasser, um eine umweltfreundliche und nachhaltige Wasserinfrastruktur zu schaffen.

Im Zuge der Entwicklung eines sinnvollen Bewässerungsregimes wurde eine eingehende Untersuchung durchgeführt, die sich auf die Identifizierung geeigneter Parameter für den Einsatz von Sensortechnik, sowohl im Bereich Wasser als auch im Boden, konzentrierte. Das Ziel dieses Forschungsansatzes war es, präzise und effektive Bewässerungsstrategien zu entwickeln, die auf den spezifischen Bedürfnissen von Pflanzen und den Umweltbedingungen basieren.

Die Notwendigkeit der Bewässerung städtischer Grünflächen resultiert auch aus der Möglichkeit einer Austrocknung des Grünlands, wenn es unter einem Mangel an Feuchtigkeit leidet. Dieser Trockenheitszustand führt zur Bildung einer nahezu wasserundurchlässigen, hydrophoben Oberfläche, auf der bei starken Regenfällen oder Gewittern das Niederschlagswasser zurückgehalten wird, wodurch das Versickern verhindert wird. Infolgedessen erhöhen Starkregenereignisse das lokale Risiko von Überschwemmungen.

Für den Einsatz von Sensortechniken wurde daher die Saugspannung als möglicher Parameter identifiziert. Die Saugspannung ist eine entscheidende Kenngröße, die den negativen Druck beschreibt, mit dem der Boden Wasser in seinen Poren zurückhält. Sie gibt Aufschluss über den Sättigungsgrad des Bodens, indem sie die Fähigkeit des Bodens, Wasser zu halten, in Hektopascal misst. Diese Messung erfolgt in der Nähe des Wurzelbereichs mithilfe von Sonden, die auf Technologien wie die Zeitdomänenreflektometrie (TDR) oder die Frequenzdomänenreflektometrie (FDR) basieren. Durch die Erfassung der Saugspannung können wertvolle Einblicke in die Feuchtigkeitsverhältnisse im Boden erhalten werden, was wiederum bei der optimalen Bewässerungsplanung und der Erhaltung der Bodengesundheit von großer Bedeutung ist.

2.3.2 Untersuchung Grauwasser

Bevor reales Grauwasser auf bestimmte Parameter hin untersucht wurde, wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, um sinnvolle Kriterien für die Analyse festzulegen. Die Auswahl der richtigen Parameter ist von entscheidender Bedeutung, um fundierte Erkenntnisse über die Qualität des Grauwassers zu gewinnen und geeignete Maßnahmen für eine umweltfreundliche Nutzung zu entwickeln.

Für die Recherche wurde die Datenbank pubmed.gov genutzt, um wissenschaftliche Journal-Artikel zu dem Thema zu erfassen und die Suchmaschine Google, um nationale und internationale Richtlinien, Regelungen und Empfehlungen herauszuarbeiten.

Für die Identifizierung der relevanten wissenschaftlichen Journal-Artikel wurde die Datenbank pubmed.gov genutzt und die erweiterten Sucheinstellungen verwendet. Dafür wurden zunächst die Suchbegriffe „greywater“, „grey water“ und „gray water“ mit einer OR-Verknüpfung kombiniert (Suchstring 1), sodass einer dieser Begriffe im Titel oder Abstract vorkommen muss, um einen Treffer zu erzielen. Um die relevanten Artikel weiter einzugrenzen wurde der Begriff „quality“ mit einer AND-Verknüpfung hinzugefügt, sodass dieser Begriff in dem gesamten Artikel mindestens einmal vorkommen muss. Der untersuchte Veröffentlichungszeitraum erstreckt sich über die Jahre von 2000 bis 2023. Diese Artikel wurden anschließend gesichtet. Die erhaltenen Artikel wurden systematisch kategorisiert. In Abbildung 2 ist das Vorgehen der Literaturrecherche dargestellt.

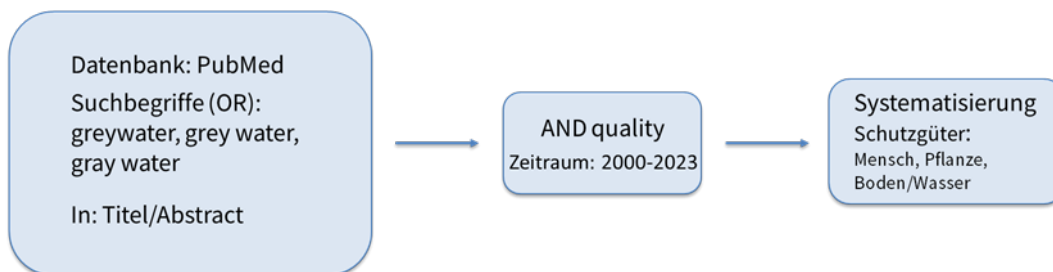


Abbildung 2: Vorgehen der Literaturrecherche in PubMed

Die relevanten Journal-Artikel wurden nach den entsprechenden Schutzgütern (Mensch, Pflanze, Boden/Wasser) kategorisiert. Weiterhin wurden die Artikel nach den möglichen Gefahren (Hazards) unterteilt. Es wurde ein Citavi-Projekt angelegt, in das die Artikel unter den verschiedenen Kategorien eingepflegt wurden.

Tabelle 1: Kategorisierung der Journal-Artikel

Schutzgüter		
Mensch	Pflanze	Boden/Wasser
Hazards		
Mikrobiologisch	Physikalisch/chemisch	Spurenstoffe

Mit Hilfe der Suchmaschine Google wurden zusätzlich nationale und internationale Richtlinien und Regelungen zu dem Thema herausgearbeitet. Über Google konnte auf die entsprechenden Websites der Behörden zugegriffen werden. Die herangezogenen Regelungen sind in Tabelle 1 dargestellt. Darüber hinaus wurde während der Literaturrecherche in der Datenbank pubmed.gov ein Artikel gefunden, der bereits einige Regelungen verschiedener Länder zusammenfasst (Shoushtarian & Negahban-Azar, 2020). Die Ergebnisse aus der Studie von Shoushtarian & Negahban-Azar wurden ebenfalls in der Recherche berücksichtigt. Die herausgearbeiteten Richtlinien und Regelungen wurden anschließend gesichtet und in das Citavi-Projekt übernommen.

Es wurde außerdem mit Experten und Expertinnen auf dem Gebiet der Wasserwiederverwendung gesprochen und aktuelles Forschungsmaterial gesichtet. Dafür wurden unter anderem die Fachtagungen WavEII in Frankfurt (07. und 08. Februar 2023) und die Wassertage Münster (14. und 15. Februar 2023) besucht. Dort wurden verschiedene Projekte vorgestellt, die sich ebenfalls mit dem Thema der Wasserwiederverwendung beschäftigen und Herausforderungen sowie Lösungsmöglichkeiten aufzeigen. Das Tagungsmaterial wurde hinsichtlich für das Projekt INNOWATER relevante Informationen durchsucht und die Ergebnisse auch mit in die Recherche aufgenommen.

Die Literaturrecherche in der Datenbank pubmed.gov erzielte mit dem ersten Suchstring 639 Treffer. Durch die weitere Verknüpfung des Begriffes „quality“ mit dem AND-Operator wurden 461 Artikel ausgeschlossen und es verblieben 178 Journal Artikel. Diese 178 Journal-Artikel wurden gesichtet und manuell 126 Artikel ausgeschlossen, sodass 52 Artikel übrigblieben, die in das Citavi-Projekt aufgenommen wurden. In der folgenden Abbildung 3 ist dies grafisch dargestellt.

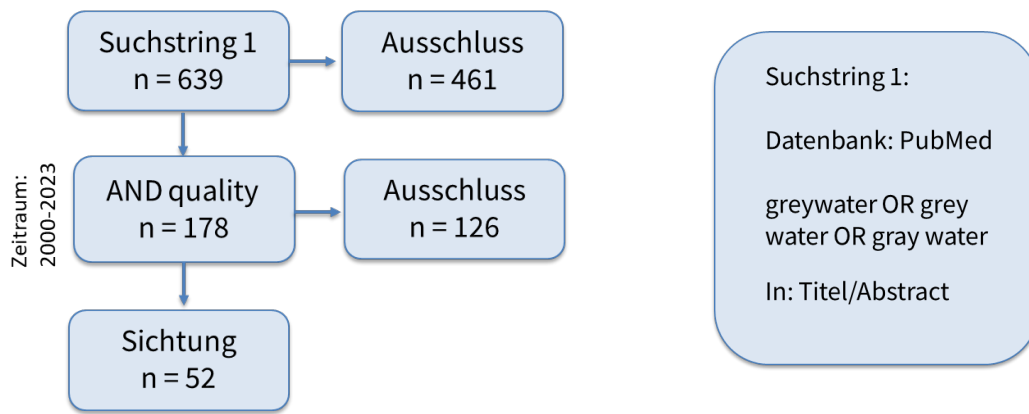


Abbildung 3: Quantitative Ergebnisse der Literaturrecherche in PubMed

Die Recherche nach nationalen und internationalen Regelungen, Richtlinien und Empfehlungen ergab 27 relevante Ergebnisse. Diese sind in der folgenden Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Nationale und internationale Regelungen und Empfehlungen für die Wasserwiederverwendung

Regelungen und Empfehlungen national				
Nr.	Jahr	Staat	Version/Titel	Art
1	1999	Deutschland	DIN 19650: Bewässerung – Hygienische Belange von Bewässerungswasser	(DIN, 19650)
2	2006	EU	EU-Richtlinie 2006//7/EG Badegewässerrichtlinie	(EU Richtlinie, 2006/7/EG)
3	2023	Deutschland	BGBl. 2023 I Nr. 159: Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TrinkwV)	(Bundesministerium der Justiz, 2021)
4	2020	EU	EU-Verordnung 2020/741 über Mindestanforderungen für die Wasserwiederverwendung	(EU, 2020)
5	2022	EU	Technischer Leitfaden - Risikomanagement bei der Wasserwiederverwendung für landwirtschaftliche Bewässerungssysteme in Europa	Maffettone R. and Gawlik, B.

6	2005	Deutschland	Grauwasser-Recycling Planungsgrundlagen und Betriebshinweise	(Fachvereinigung Betriebs- und Regenwassernutzung e.V. (fbr), 2005)
7	2017	Deutschland	DWA-M 277: Hinweise zur Auslegung von Anlagen zur Behandlung und Nutzung von Grauwasser [...]	(DWA, 2017)
8	2022	Deutschland	Endbericht der LAWA-Ad hoc AG/KG Water Reuse an die 163. LAWA- Vollversammlung	(LAWA)
9	2017	Deutschland	Empfehlungen des Umweltbundesamtes für die Entwicklung von EU- Mindestqualitätsanforderungen für Wasserwiederverwendung	(Umweltbundesamt, 2017)Positionen-papier UBA
Regelungen und Empfehlungen international				
Nr.	Jahr	Staat	Version/Titel	Art
10	2006	WHO ¹	Guideline for the safe use of [...] greywater – volume I-IV wastewater use in agriculture	Guideline(WHO, 2006b)
11	2012	EPA ²	Guidelines for water reuse	Guideline(US EPA, ORD, NRMRL, Water Supply and Water Resources Division & CDM Smith, 2012)
12	1990	USA (Oregon)	Department of environmental quality – Chapter 340 – Division 53 – Graywater reuse and disposal systems	(Department of Environmental Quality, 1990)
13	1991	Frankreich	Water reuse criteria for agricultural and landscape irrigation in France	(Institut Franais de l'Environnement, 2008) Nationale Richtlinie

14	1996	Kanada	Atlantic Canada wastewater guidelines manual	Gui(ABL Environmental Consultants Ltd, 2006)eline
15	1999	Australien	ACT – wastewater reuse for irrigation	Guid(ACT Parliamentary Counselalso, 1997)eline
16	1999	Israel	Israeli guideline for wastewater reuse	Guideline
17	2002	China	GB20922-2007	Standard (The Standardization Administration of the People's Republic of China, 2007)
18	2002	Jordan	Jordanian Standard	Standard
19	2002	Tasmania	Environmental guidelines for the use of recycled water in Tasmania	Guideline
20	2005	Spanien	Spanish regulations for water-reuse – royal decree 1620/2007	Nationale Richtlinie
21	2010	Iran	Criteria for using recycled water	Nationale Richtlinie
22	2010	ISO ³	Guidelines for treated wastewater use for irrigation projects	Guideline(ISO, 16075)
23	2010	Großbritannien	Greywater systems BS 8525	Nationale Norm (BSI, 2010)
24	2010	Western Australia	Code of Practice for the Reuse of Greywater in Western Australia 2010	(Department of Health Australia, 2010)Code of Practice
25	2007	New South Wales	NSW Guidelines for Greywater reuse in sewerred, single household residential premises	Guide(New South Wales Government, 2007)line
26	2011	EPA ²	Graywater Discharges from Vessels	
27	2006	WHO ¹	Overview of greywater management Health considerations	(WHO, 2006a)WHO-EM/CEH/ 125/E

¹World Health Organization; ²Environmental Protection Agency; ³International Organization of Standardization

Die DIN 19650 aus 1999: Bewässerung – Hygienische Belange von Bewässerungswasser regelt national noch immer die Anforderungen an Wasser, das für die Bewässerung verwendet wird. Weiterhin gibt es die Badegewässerrichtlinie, aus der weitere Anforderungen abgeleitet werden können. Die DWA hat mit dem Merkblatt DWA-M 277: Hinweise zur Auslegung von Anlagen zur Behandlung und Nutzung von Grauwasser und Grauwasserteilströmen (DWA, 2017) einen Leitfaden herausgegeben, an dem sich orientiert werden kann, sofern es um die Wiederverwendung von Grauwasser geht. In der DWA-M 277 werden ebenfalls mikrobiologische Qualitätsindikatoren für die Nutzung von Grauwasser zur Bewässerungszwecken (Rasen & Zierpflanzen) vorgegeben, wobei das Hygienisieren des Grauwassers durch gekoppelte Behandlungsstufen vor Verwendung vorgegeben wird. Seit Juni 2020 ist die neue Verordnung über Mindestanforderungen für die Wasserwiederverwendung (EU 2020/741) der Europäischen Kommission in Kraft und erlangt ab Juni 2023 in Deutschland seine Gültigkeit, sodass diese bis dahin in eine nationale Verordnung umgesetzt sein sollte. Dazu soll eine Anpassung des WHG und Erarbeitung einer Bundesverordnung (voraussichtlich Anfang 2024) auf Grundlage des Endberichts der LAWA ad hoc AG erfolgen. Im Anhang der EU-Verordnung (EU 2020/741) sowie im Technischen Leitfaden von Maffettone, R. and Gawlik, B finden sich weiterhin Hinweise für einen Risikomanagementplan. Zusätzlich wird von der DWA die Merkblattreihe DWA-M 1200 erarbeitet, zur Wasserwiederverwendung für landwirtschaftliche und urbane Zwecke. Die novellierte Trinkwasserverordnung trat im Juni 2023 national in Kraft.

Basierend auf der vorangegangenen Recherche wurde ein umfassendes Untersuchungsprogramm entwickelt, um reales Grauwasser auf ausgesuchte Parameter zu analysieren. Die sorgfältige Auswahl der zu untersuchenden Kriterien erfolgte auf Grundlage wissenschaftlicher Erkenntnisse und geltender Standards im Bereich der Wasseraufbereitung und Umweltschutz.

Das Untersuchungsprogramm umfasst eine Vielzahl von Parametern, die eine ganzheitliche Bewertung der Grauwasserqualität ermöglichen. Dazu gehören physikalische Eigenschaften wie der pH-Wert und die Trübung, chemische Parameter wie die Konzentration von Schadstoffen und Nährstoffen, sowie mikrobiologische Aspekte wie die Anwesenheit von pathogenen Mikroorganismen.

Begleitend wurde das Grauwasser nach der DIN 19684-10 (2009) „Bodenbeschaffenheit – Chemische Laboruntersuchungen – Teil 10: Untersuchungen und Beurteilung des Wassers bei Bewässerungsmaßnahmen“ untersucht. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Berechnung des SAR-Werts (sodium adsorption ratio) in der DIN 19684-10 (2009) fehlerhaft ist. Dieser Fehler wird in der nächsten Überarbeitung der DIN 19684-10 korrigiert.

Die Durchführung der Untersuchungen erfolgte unter kontrollierten Bedingungen, um genaue und zuverlässige Ergebnisse zu gewährleisten. Die gewonnenen Daten ermöglichten eine

detaillierte Charakterisierung des Grauwassers und dienen als Grundlage für weiterführende Überlegungen und Entscheidungen im Bereich der nachhaltigen Wassernutzung. Durch den Abgleich der Ergebnisse mit internationalen Standards und Richtlinien kann die Qualität des Grauwassers objektiv bewertet und Handlungsempfehlungen abgeleitet werden.

Das untersuchte Grauwasser stammt aus einem Wohnhaus mit insgesamt 11 Wohneinheiten, was eine repräsentative Untersuchung seiner Zusammensetzung ermöglichte. Das Grauwasser wurde aus den Abflüssen von Küchen und Bädern gesammelt, um einen umfassenden Einblick in die Charakteristika dieses Abwasserstroms zu erhalten. Diese Quellenauswahl ermöglicht eine realistische Darstellung der alltäglichen Grauwasserzusammensetzung in einem Mehrfamilienhaus.

Die Sammelbehälter, in denen das Grauwasser aufbewahrt wurde, befinden sich im Keller des Wohnhauses. In Abbildung 4 ist ein Sammelbehälter für das Grauwasser dargestellt.



Abbildung 4: Sammelbehälter für Grauwasser

Die Analyse des Grauwassers aus verschiedenen Haushalten ermöglicht es, Muster und Trends in Bezug auf die enthaltenen Inhaltsstoffe zu identifizieren. Diese Erkenntnisse sind von entscheidender Bedeutung, um nachhaltige und effektive Wassermanagementstrategien zu entwickeln, die auf den realen Bedingungen von Mehrfamilienhäusern basieren. Durch die gezielte Untersuchung von Grauwasser aus Küchen und Bädern wird die Vielfalt der darin enthaltenen Substanzen erfasst, was wiederum als Grundlage für zukünftige Entscheidungen im Bereich der Abwassermanagement- und Recyclingpraktiken dienen kann.

Die Entwicklung und Umsetzung dieses Untersuchungsprogramms trägt dazu bei, das Verständnis für die Beschaffenheit von Grauwasser zu vertiefen und innovative Ansätze für dessen sinnvolle Wiederverwendung zu entwickeln.

Methodisches Vorgehen: Analyse Mikrobiologie

Das reale Grauwasser aus der Modellanlage Weimar wurde auf verschiedene Indikatorparameter analysiert. Dafür wurden anhand der durchgeführten Literaturrecherche

die zu untersuchenden Parameter ausgewählt und an der HSHL die folgenden Parameter untersucht:

- Gesamtcoliforme
- *Escherichia coli*
- *Pseudomonas aeruginosa*
- Somatische Coliphagen
- Enterokokken
- TOC
- ATP
- Molekularbiologische Analysen auf *E. coli* und *P. aeruginosa* mittels qPCR

Darüber hinaus wurden Stichproben einer Pflanzenkläranlage untersucht. Bei der Pflanzenkläranlage handelt es sich um eine private Pflanzenkläranlage, die das Grauwasser eines Gartenhauses, das von zwei Personen genutzt wird, aufbereitet.

Untersuchung des Grauwassers auf Gesamtcoliforme und *E. coli* mittels IDEXX-MPN Verfahren

Die Untersuchung auf Gesamtcoliforme und *E. coli* als Fäkalindikatoren wurde mit dem *Colilert* - Test Kit der Firma IDEXX Laboratories, Inc. durchgeführt. Das Verfahren ist zentraler Bestandteil der DIN EN ISO 9308-2:2014. (DIN EN ISO, 9308-2)

Mit der von der Firma IDEXX patentierten Defined Substrate Technology (DST) werden beim *Colilert*-Test Gesamtcoliforme und *E. coli* gleichzeitig erkannt. Es werden zwei Nährstoffindikatoren (ONPG (ortho-Nitrophenyl- β -D-galactopyranosid) und MUG (4-Methylumbelliferyl- β -D-glucuronid) genutzt. Diese werden durch das Coliformenzym β -Galactosidase bzw. das *E. coli*-Enzym β -Glucuronidase metabolisiert. Für das Wachstum im *Colilert*-Test nutzen Coliforme β -Galactosidase für die Umwandlung von ONPG. Dies führt zu einem Farbumschlag von farblos zu gelb. *E. coli* nutzt zusätzlich β -Glucuronidase für die Metabolisierung von MUG und das führt zu einer unter UV-Licht sichtbaren Fluoreszenz. Die wenigen Nicht-Coliformen, die diese Enzyme besitzen, werden durch die in der DST formulierten speziellen Matrix des *Colilert*-Tests unterdrückt. (IDEXX, o. J.)

Durchführung:

Zu einer Wasserprobe (100 ml) oder einer Verdünnung (100 ml) der Probe wird eine Blisterpackung Trockenmedium hinzugefügt. Für die Analyse der Grauwasserproben wurden diese jeweils unverdünnt, 1:100, 1:10000 und 1:1000000 analysiert. Für die Verdünnungen wurde eine sterile 0,9 % NaCl-Lösung verwendet. Das Medium in der Probe wird durch vorsichtiges Schütteln gelöst. Anschließend wird das Gemisch aus Medium und Probe aseptisch in ein Quanti-Tray/2000 (eingetragene Marke IDEXX Laboratories, Inc.) gegossen.

Die Trays werden mit dem Quanti-Tray-Versiegelungsgerät verschlossen und bei $35 \pm 0,5$ °C für 24 h inkubiert.

Nach Inkubation werden die Vertiefungen mit einer Gelbfärbung, die gleich oder intensiver als die der Vergleichslösung sind als positiv in Bezug auf coliforme Bakterien angesehen. Diejenigen Vertiefungen, die über die Gelbfärbung hinaus eine Fluoreszenz unter UV-Licht bei 360 nm aufweisen, werden als *E. coli*-positiv angesehen.

Die wahrscheinlichste Keimzahl (MPN, engl.: Most Probable Number) von Gesamtcoliformen und *E. coli* wird unter Anwendung einer statistischen Tabelle ermittelt.

Untersuchung des Grauwassers auf *P. aeruginosa* mittels IDEXX-MPN Verfahren

Für die Untersuchung auf *P. aeruginosa*, der als fakultativ pathogener Krankheitserreger gilt, wurde das von der Firma IDEXX Laboratories, Inc. entwickelte *Pseudalert* – Test Kit verwendet. Bei dem Verfahren handelt es sich um ein Normverfahren nach DIN EN ISO 16266-2:2023. (DIN EN ISO, 16266-2)

P. aeruginosa besitzt die Fähigkeit, das in dem selektiven Nährmedium enthaltene 7-Amino-4-methylcoumarin-Aminopeptidase-Diagnosesubstrat zu hydrolysieren, was zur Fluoreszenz führt, die unter UV-Licht (365 nm) sichtbar gemacht werden kann.

Durchführung:

Zu einer Wasserprobe (100 ml) oder einer Verdünnung (100 ml) der Probe wird eine Blisterpackung Trockenmedium hinzugefügt. Für die Analyse der Grauwasserproben wurden diese jeweils unverdünnt, 1:1000 und 1:100000 analysiert. Für die Verdünnungen wurde eine sterile 0,9 % NaCl-Lösung verwendet. Das Medium in der Probe wird durch vorsichtiges Schütteln gelöst. Anschließend wird das Gemisch aus Medium und Probe aseptisch in ein Quanti-Tray/2000 gegossen. Die Trays werden mit dem Quanti-Tray-Versiegelungsgerät verschlossen und bei $38 \pm 0,5$ °C für 24 – 28 h inkubiert. Die Ergebnisse sind nach 24 h bestätigt, dürfen aber auch noch nach bis zu 28 h abgelesen werden.

Vertiefungen, die nach der Inkubation unter UV-Licht eine blaue Fluoreszenz aufweisen, gelten als positiv. Zur Ermittlung der wahrscheinlichsten Keimzahl (MPN) werden dann die im Kit enthaltenen statistischen Tabellen herangezogen (s. Anhang).

Untersuchung des Grauwassers auf Enterokokken mittels IDEXX-MPN Verfahren

Für die Untersuchung auf Enterokokken wurde das von der Firma IDEXX Laboratories, Inc. entwickelte *Enterolert* – Test Kit verwendet. Das Verfahren basiert auf der Defined Substrate Technology (DST) von IDEXX. Mithilfe eines Nährstoffindikators können bei diesem Verfahren Enterokokken nachgewiesen werden. Der Nährstoffindikator ist spezifisch für Enterokokken und wenn dieser durch Enterokokken metabolisiert wird kommt es zur Fluoreszenz, die unter UV-Licht (365 nm) sichtbar gemacht werden kann.

Durchführung:

Zu einer Wasserprobe (100 ml) oder einer Verdünnung (100 ml) der Probe wird eine Blisterpackung Trockenmedium hinzugefügt. Für die Analyse der Grauwasserproben wurden diese jeweils unverdünnt, 1:100 und 1:10000 analysiert. Für die Verdünnungen wurde eine sterile 0,9 % NaCl-Lösung verwendet. Das Medium in der Probe wird durch vorsichtiges Schütteln gelöst. Anschließend wird das Gemisch aus Medium und Probe aseptisch in ein Quanti-Tray/2000 (eingetragene Marke IDEXX Laboratories, Inc.) gegossen. Die Trays werden mit dem Quanti-Tray-Versiegelungsgerät verschlossen und bei $41 \pm 0,5$ °C für 24 h inkubiert.

Vertiefungen, die nach der Inkubation unter UV-Licht eine blaue Fluoreszenz aufweisen, gelten als positiv. Zur Ermittlung der wahrscheinlichsten Keimzahl (MPN) werden dann die im Kit enthaltenen statistischen Tabellen herangezogen (s. Anhang).

Untersuchung des Grauwassers auf somatische Coliphagen nach DIN EN ISO 10705-2

Für die Untersuchung auf somatische Coliphagen als Indikatorparameter für humanpathogene Viren wurde das Normverfahren nach DIN EN ISO 10705-2 angewandt. (DIN EN ISO, 10705-2)

Bei diesem Verfahren wird ein bestimmtes Volumen der Probe (hier 1 ml) mit einem kleinen Volumen halbfesten Nährmedium (hier 2,5 ml) vermischt, eine Kultur des Wirtsstammes (*E. coli* WG5, 1 ml) hinzugefügt und auf einem festen Nährmedium ausplattiert. Anschließend werden die Platten bei 36 ± 2 °C für 18 ± 2 h bebrütet und die sichtbaren Plaques auf den Platten gezählt. Das Ergebnis wird als Plaque-formende Einheiten (pfu) pro Volumeneinheit angegeben.

Untersuchung des Grauwasser auf den TOC (Total Organic Carbon) – Gehalt mittels TOC-Analysator

Für die Analyse des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) als Summenparameter wurde nach Normverfahren DIN EN 1484 Wasseranalytik – Anleitungen zur Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) und des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC); Deutsche Fassung EN 1484:1997 verfahren. (DIN EN, 1484)

Es wurde ein TOC-Analysator (Shimadzu TOC-L_{CPH/CPN}) in Kombination mit einer Kalibrationsreihe (org. C = 10, 100, 500, 1000 mg/l) verwendet. Der TOC-Analysator nutzt die katalytische Verbrennungsoxidationsmethode bei 680 °C. Die Detektion erfolgt über einen NDIR-Detektor. Die Grauwasserproben wurden unverdünnt im Dreifachansatz vermessen.

Untersuchung des Grauwassers auf den ATP (Adenosintriphosphat)-Gehalt

Als weiterer Summenparameter wurde das Grauwasser auf den ATP - Gehalt analysiert. Dafür wurde das Water-Glo™ System (AM1001) der Fa. *Promega* verwendet. Das System ist konzipiert für die Messung von ATP aus lebensfähigen Zellen in komplexen wässrigen Proben wie Meerwasser, Brunnenwasser, Abwasser, etc. Das Verfahren basiert auf einem Luciferaseenzym, das bei Reaktion mit ATP Lumineszenz erzeugt. Das Lumineszenzsignal korreliert direkt mit dem ATP-Gehalt und der Menge der aktiven Biomasse in der Wasserprobe. Für die Analyse der Grauwasserproben wurden dieselben Volumina an Probe

und Lyse-Reagenz (5 ml) verwendet. Die Lumineszenz wurde mit einem Luminometer gemessen und die Konzentration an ATP mit folgender Formel berechnet

$$ATP \left(\frac{pg}{ml} \right) = \frac{RLU_{sample} - RLU_{lysis\ reagent}}{RLU_{ATP\ standard} - RLU_{lysis\ reagent}} \times \frac{V_{lysis\ reagent}}{V_{sample}} \times 1000$$

V_{sample} : Volumen der Probe [ml]

$V_{lysis\ reagent}$: Volumen Lyse-Reagenz [ml]

RLU_{sample} : relative luminescing units Probe [RLU]

$RLU_{ATP\ standard}$: relative luminescing units ATP-Standard [RLU]

$RLU_{lysis\ reagent}$: relative luminescing units Lyse-Reagenz [RLU]

Molekularbiologische Untersuchungen des Grauwassers auf *E. Coli* und *P. aeruginosa* mittels PCR

Einzelne Stichproben wurden außerdem molekularbiologisch mittels qPCR auf *E. coli* und *P. aeruginosa* analysiert. Dafür wurden 50 ml der Probe filtriert und anschließend die auf dem Filter gesammelte DNA extrahiert. Es handelt sich hierbei um eine hausinterne Methode, die im Folgenden näher erläutert wird.

Benötigte Materialien:

Geräte:

Übliches Laborgerät und

- BioRad CFX96™ Real-Time PCR System
- Fastprep-24™ 5G instrument (MPBio)
- Membranfiltrationsanlage

Reagenzien:

- FastDNA™ SPIN Kit for Soil (MPBio, Cat. No. 116560200/116560300)
- TaqMan® Fast Advanced Master Mix (applied biosystems® by life technologies™, Art. Nr.: 4444556)
- TaqMan® Microbe Assay *E. coli* (Thermo Fisher Scientific; Assay ID: Ba04646242_s1)
- TaqMan® Microbe Assay *P. aeruginosa* (Thermo Fisher Scientific; Assay ID: Ba04932081_s1)
- Quantifizierungsstandard (applied biosystems™, TrueMark™ Comprehensive Microbiota Control, Katalognummer: A50382)

Verbrauchmaterial:

Übliches Labormaterial und

- qPCR 96-well plates inkl. seals (BioRad; Art. Nr.: HSP9601; MSB1001)

Durchführung:

Pro Wasserprobe wurden 50 ml homogenisierte Probe über einen Polycarbonatfilter (Porengröße 0,4 µm) filtriert. Anschließend wurden die auf dem Filter zurückgehaltenen Zellen mittels FastDNA™ SPIN Kit for Soil extrahiert. Dafür wurde nach dem Herstellerprotokoll verfahren mit dem Unterschied, dass anstelle der Bodenprobe, der Filter als Ausgangsmaterial eingesetzt wurde. Das erhaltene Eluat wurde für die qPCR eingesetzt. Die Analysen für *E. coli* und *P. aeruginosa* wurden separat im Singleplex - Ansatz durchgeführt. Es wurden pro Ansatz drei technische Replikate vermessen (NTC, Standard, Probe). Für die Kalibrationsreihe wurde der Standard seriell 1:10 verdünnt, sodass folgende 5 Kalibrationspunkte erhalten wurden: 1×10^5 cp/µl; 1×10^4 cp/µl; 1×10^3 cp/µl; 1×10^2 cp/µl und 10 cp/µl. Neben dem NTC (non-template control) und der Positivkontrolle wurde eine negative Extraktionskontrolle als weitere qualitätssichernde Maßnahme mitgeführt. Dafür wurde das Probenvolumen durch steriles 0,9 % NaCl ersetzt und ebenfalls dem gesamten Workflow unterzogen.

In der folgenden Tabelle 3 ist die Zusammensetzung der PCR-Reaktion aufgelistet.

Tabelle 3: Zusammensetzung qPCR-Reaktion

Komponente	Volumen [µl] für 1 Reaktion	
	96-well plate	Finale Konzentration
TaqMan® Fast Advanced Master Mix (2X)	10,0	1X
TaqMan® Assay primer/probe (20X)	1,0	1X
Template	5,0	0,001 – 100 ng/well
Nuklease-freies Wasser	5,0	
Gesamtvolumen pro Reaktion	20,0	

Die PCR wurde mit dem in Tabelle 4 dargestellten Temperaturprogramm gefahren.

Tabelle 4: Temperaturprogramm qPCR

Bio-Rad CFX96™ System	UNG activation	Polymerase activation	PCR (40 cycles)	
Temperatur	Hold 50 °C	Hold 95 °C	Denaturieren 95 °C	Annealing/extention 60 °C
Zeit [min:sec]	02:00	00:20	00:03	00:30

Die Bestimmung der Ct-Werte erfolgte mittels CFX-Maestro™ Software. Mithilfe der Kalibrationsreihe wurden anschließend die Konzentrationen in den Proben bestimmt.

Ergebnisse

In den folgenden Tabellen sind die Ergebnisse der Grauwasseranalysen für die Modellanlage in Weimar (Tabelle 5) und für die Pflanzenkläranlage (Tabelle 6) dargestellt.

Tabelle 5: Microbiological characterisation of greywater. The samples were collected from the greywater collection container in Weimar.

Parameter	Raw greywater (n=4)			Limit values from standards		
	<u>MIN - MAX</u>	<u>Median</u>	<u>Mean</u>	<u>MAX</u>	<u>standard</u>	
total coliforms [MPN/100 ml]	5,04*10 ⁶ - 2,01*10 ⁷	7,77*10 ⁶	1,02*10 ⁷			
<i>Escherichia coli</i> [MPN/100 ml]	1,16*10 ⁴ - 6,84*10 ⁴	3,85*10 ⁴	3,92*10 ⁴	1*10 ⁴	REGULATION (EU) 2020/741; quality class D	
<i>P. aeruginosa</i> [MPN/100 ml]	1,06*10 ⁴ - 6,77*10 ⁴	2,49*10 ⁴	3,2*10 ⁴			
somatic coliphages [pfu/ml]	84 - 180	96	120	Log ₁₀ reduction ≥ 6	REGULATION (EU) 2020/741; quality class A	
Enterococci [MPN/100 ml] (n=2)	100 - 200			330	Badegewässerrichtlinie (2006/7/EG); minimum quality	
TOC [mg/L]	330,7 – 361,5	331,9	341,37	Possible substitution parameter for BSB ₅ according to (91/271/EWG)		
ATP [pg/ml]	7,42*10 ³ - 1,04*10 ⁴	9,46*10 ³	9,17*10 ³			

Tabelle 6: Microbiological characterisation of greywater from a plant-treatment system.

Parameter	Raw greywater before plant-treatment (n=3)	After plant-treatment (n=3)
	<u>MIN - MAX</u>	<u>MIN - MAX</u>
total coliforms [MPN/100 ml]	2,224*10 ⁸ – 8,66*10 ⁸	1,15*10 ⁵ – 1,15*10 ⁶
<i>Escherichia coli</i> [MPN/100 ml]	2*10 ² – 6,54*10 ³	87,4 – 2,05*10 ³
<i>P. aeruginosa</i> [MPN/100 ml]	7,27*10 ⁵ – 8,09*10 ⁵	2,46*10 ³ – 1,47*10 ⁴

somatic coliphages [pfu/ml]	-	-
Enterococci [MPN/ 100 ml]	1,65*10 ⁴ – 1,16*10 ⁵	1,2*10 ³ – 1,85*10 ⁴
TOC [mg/L]	47,23 – 83,42	20,06 – 26,92
ATP [pg/ml]	3,01*10 ³ – 3,68*10 ³	1,15*10 ³ – 1,76*10 ³

Nachfolgend sind die Ergebnisse aus den molekularbiologischen Untersuchungen aufgeführt.

Tabelle 7: Ergebnisse der molekularbiologischen Analysen der Stichproben aus Weimar.

Parameter	Raw greywater (n=4)		
	<u>MIN - MAX</u>	<u>Median</u>	<u>Mean</u>
<i>Escherichia coli</i> [cp/100 ml]	2,19*10 ⁵ – 1,58*10 ⁶	1,02*10 ⁶	9,59*10 ⁵
<i>P. aeruginosa</i> [cp/100 ml]	7,11*10 ⁴ – 1,26*10 ⁶	1,62*10 ⁵	4,15*10 ⁵

Tabelle 8: Ergebnisse der molekularbiologischen Analysen der Grauwasserstichproben der Pflanzenkläranlage.

Parameter	Raw greywater before plant-treatment (n=2 resp. 1)	After plant-treatment (n=2 resp. 1)
	<u>MIN - MAX</u>	<u>MIN - MAX</u>
<i>Escherichia coli</i> [cp/ 100 ml]	6,40*10 ³ – 2,29*10 ⁴	1,83*10 ² – 1,41*10 ³
<i>P. aeruginosa</i> [cp/100 ml]	7,29*10 ⁵	5,37*10 ²

Das Grauwasser wurde zusätzlich auf bekannte Parameter untersucht und mit Literaturwerten verglichen. Die Untersuchung zeigte, dass die gemessenen Parameter, einschließlich chemischer Sauerstoffbedarf (CSB), biologischer Sauerstoffbedarf (BSB) und Gesamtphosphor im Bereich der Werte liegen, die in früheren Studien für stark verschmutztes Grauwasser dokumentiert wurden.

Nach einer ausführlichen Literaturrecherche wurde ein begleitendes Untersuchungskonzept nach der DIN 19684 „Bodenbeschaffenheit – Chemische Laboruntersuchungen – Teil 10: Untersuchungen und Beurteilung des Wassers bei Bewässerungsmaßnahmen“ durchgeführt. Für diese Parameter liegen im deutschsprachigen Raum noch wenige Daten vor. Sie können

aber einen wichtigen Hinweis darauf geben, ob Grauwasser langfristig für die Bewässerung geeignet ist. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind von großer Bedeutung, da sie zur Erweiterung der vorhandenen Wissensbasis beitragen und Entscheidungsträgern sowie Praktikern wertvolle Informationen zur Verfügung stellen. Dies kann letztlich dazu beitragen, nachhaltige Bewässerungskonzepte zu entwickeln und Wasserressourcen effizienter zu nutzen.

Die untersuchten Parameter nach DIN 19684 „Bodenbeschaffenheit – Chemische Laboruntersuchungen – Teil 10: Untersuchungen und Beurteilung des Wassers bei Bewässerungsmaßnahmen“ sind in Tabelle 9 und 10 dargestellt. Tabelle 9 fasst die Ergebnisse der Untersuchung des unbehandelten stark belasteten Grauwassers aus 11 Wohneinheiten zusammen.

Tabelle 9: Untersuchung des stark belasteten Grauwassers nach DIN 19684

Parameter	Erklärung	Auswertung
Schwebstoffe	Bewertung der Beschaffenheit des Wassers hinsichtlich seiner Eignung für Bewässerungszwecke (Tropfbewässerung) bezogen auf die Massenkonzentration an Schwebstoffen und gelösten Stoffen	Schwebstoffe: geeignet gelöste Stoffe: mäßig geeignet
pH-Wert	Der pH-Wert stellt einen Bewertungsparameter dar, für den eine Einstufung hinsichtlich der Eignung des Bewässerungswassers nicht besteht. Er sollte im Bereich zwischen 6 und 8 liegen. Bei pH < 5 sind zunehmende Konzentrationen an Eisen- und Aluminiumionen zu erwarten, wodurch toxische Effekte an Pflanzen auftreten können.	Es sind keine toxischen Effekte zu erwarten
Salzkonzentration	Die Brauchbarkeit des Bewässerungswassers ist abhängig von seiner Salzkonzentration, wobei neben Bodeneigenschaften und Klimabedingungen Art und Sorte der Kulturpflanzen, ihr Entwicklungszustand sowie das zur Anwendung kommende Bewässerungsverfahren zu berücksichtigen sind. Die Salzkonzentration des Wassers und damit seine Eignung für die Bewässerung unter Berücksichtigung der Salzverträglichkeit der Kulturpflanzenart und -sorte lässt sich über die elektrische Leitfähigkeit (EC) ermitteln. (Salzgehalt im Boden muss ebenfalls berücksichtigt werden.	Bewertung nach Salzverträglichkeit: mittel (z.B. Tomaten, Spinat, Mais)
Natriumadsorptionswert SAR	Eine hohe Konzentration von Natriumionen im Wasser beeinflusst die Wasserdurchlässigkeit des Bodens und verursacht dadurch Sickerungsprobleme	keine schädliche Wirkung
Carbonat und Hydrogencarbonat	Die Bedeutung der Carbonate ergibt sich aus dem nach Bindung mit Calcium und Magnesium noch verbleibenden, als Natriumcarbonat im Bewässerungswasser vorliegenden phytotoxisch wirkenden Natriumanteil. (RSC-Wert)	Schadwirkung: hoch

Chlorid	In Abhängigkeit von der Verträglichkeit der Kulturpflanzen gegenüber Chloridionen können Chloridkonzentrationen im Bewässerungswasser Schäden hervorrufen, die insbesondere aus der Chloridakkumulation in den Blättern aber auch im Holz von Astwerk und Stamm bei Bäumen resultieren. Bei mehrjährigen Kulturpflanzen, z. B. Fruchtgehölze, können durch Chlorid erhebliche Eintragseinbußen auftreten.	Schadwirkung: mittel
---------	---	----------------------

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass Grauwasser ohne eine zusätzliche Behandlung nicht zur Bewässerung eingesetzt werden sollte. Dabei sollte neben Mikrobiologischen Parametern und Spurenstoffe auch die Parameter der DIN 19684 Teil 10 betrachtet werden.

Im Anschluss wurde das Grauwasser eines naturnahen Verfahrens untersucht, ob in diesem Aufbereitungsverfahren die Parameter der DIN 19684-10 eingehalten werden können. Es handelt sich um eine zertifizierte Pflanzenkläranlage. Die begleitenden Untersuchungen (BSB, N, P) haben gezeigt, dass die Pflanzenkläranlage die geforderten Ablaufwerte einhält.

In Tabelle 10 sind die Untersuchungen der Pflanzenkläranlage nach DIN 19684-10 dargestellt.

Tabelle 10: Untersuchung Zu- und Ablauf einer Pflanzenkläranlage

Parameter	Erklärung	Auswertung Zulauf	Auswertung Ablauf
Schwebstoffe	siehe Tabelle 9	Schwebstoffe: geeignet gelöste Stoffe: geeignet	Schwebstoffe: geeignet gelöste Stoffe: mäßig geeignet
pH-Wert	siehe Tabelle 9	Es sind keine toxischen Effekte zu erwarten	Es sind keine toxischen Effekte zu erwarten
Salzkonzentration	siehe Tabelle 9	Bewertung nach Salzverträglichkeit: mittel (z.B. Tomaten, Spinat, Mais)	Bewertung nach Salzverträglichkeit: mittel (z.B. Tomaten, Spinat, Mais)
Natriumadsorptionswert SAR	siehe Tabelle 9	keine schädliche Wirkung	Schadwirkung: mittel
Carbonat und Hydrogencarbonat	siehe Tabelle 9	Schadwirkung: hoch	Schadwirkung: hoch
Chlorid	siehe Tabelle 9	Schadwirkung: gering	Schadwirkung: gering

Bei Trockenheit konzentrieren sich die Flüssigkeiten im Boden, wodurch Bikarbonat- und Karbonationen mit Kalzium und Magnesium reagieren und Kalziumkarbonat (CaCO_3) oder Magnesiumkarbonat (MgCaCO_3) bilden. Diese fallen aus und führen zu einer Reduzierung der Kalzium- und Magnesiumkonzentration, während das Verhältnis zum Natriumgehalt steigt und der SAR-Index ansteigt. Dies führt zu einer Alkalisierung und einer Erhöhung des pH-Werts. Hartes Wasser ist daher langfristig nicht zu Bewässerung geeignet.

Je nach Bewässerungssystem sollte das behandelte Abwasser zusätzlich gefiltert werden, um Betriebsstörungen durch Schwebstoffe zu vermeiden.

Verschiedene Bewässerungssysteme, wie Tropfbewässerung oder Sprinkleranlagen, sind empfindlich gegenüber Partikeln und Schwebstoffen, die im behandelten Grauwasser vorhanden sein können. Ohne eine zusätzliche Filtration können diese Schwebstoffe die Düsen verstopfen und die Effizienz des Bewässerungssystems beeinträchtigen.

Eine zusätzliche Filtration des Grauwassers nach der naturnahen Behandlung kann dazu beitragen, die Wasserqualität weiter zu verbessern und die langfristige Funktionsfähigkeit der Bewässerungssysteme zu gewährleisten. Durch den Einsatz geeigneter Filtermethoden, wie Sand-, Kies- oder Membranfiltern, lassen sich Schwebstoffe effektiv entfernen, was die Gefahr von Verstopfungen und Wartungsaufwand reduziert.

Die Implementierung dieser zusätzlichen Filtrationsstufe ist ein wichtiger Schritt, um die Zuverlässigkeit und Effizienz der Bewässerungssysteme zu sichern und die nachhaltige Nutzung von behandeltem Grauwasser zu fördern.

2.3.3 Untersuchung Sensorbasiertes KI-System

Die Entwicklung des sensorbasierten KI-Systems erforderte die Durchführung von umfangreichen Arbeitsschritten und die Anwendung spezifischer Methoden. Der Prozess lässt sich in zwei wesentliche Teilaufgaben unterteilen, die gemeinsam zur erfolgreichen Realisierung dieses innovativen Systems beitragen.

Die erste Teilaufgabe bestand in einer gründlichen Analyse und Auswahl der geeigneten Sensoren. Hierbei wurden verschiedene Sensortechnologien hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit, Genauigkeit und Anwendbarkeit evaluiert. Durch systematische Tests und Vergleiche konnte eine Auswahl getroffen werden, die den Anforderungen des KI-Systems optimal gerecht wird. Diese Auswahl legte den Grundstein für die sensorische Erfassung und Datengewinnung, die im weiteren Verlauf entscheidend für die Qualität der KI-Analysen war.

Die zweite Teilaufgabe konzentrierte sich auf die Implementierung von KI-Algorithmen, die auf den gesammelten Sensorinformationen basieren. Hierbei wurden verschiedene maschinelle Lernmodelle und KI-Techniken berücksichtigt, um die gewonnenen Daten effektiv zu verarbeiten und aussagekräftige Ergebnisse zu generieren. Die Entwicklung und Feinabstimmung dieser Algorithmen erforderten eine enge Zusammenarbeit zwischen Experten im Bereich KI und Sensorik, um eine optimale Synergie zu gewährleisten.

Insgesamt ermöglichten diese beiden Teilaufgaben einen ganzheitlichen Ansatz bei der Umsetzung des sensorbasierten KI-Systems. Die sorgfältige Auswahl und Integration von Sensoren sowie die Implementierung leistungsstarker KI-Algorithmen trugen dazu bei, ein hochentwickeltes System zu schaffen, das in der Lage ist, sensorische Daten präzise zu interpretieren und wertvolle Erkenntnisse zu generieren. Diese methodische Vorgehensweise bildet die Grundlage für den Erfolg und die Effektivität des sensorbasierten KI-Systems in seiner spezifischen Anwendungsdomäne.

Nach einer systematischen Literaturrecherche mittels eines Systematic Literature Review (SLR) wurden die Rechercheergebnisse auf etwa 350 wissenschaftliche Veröffentlichungen beschränkt. Diese Publikationen wurden sorgfältig aus der umfangreichen Scopus-Datenbank ausgewählt, um höchste Qualität und Relevanz sicherzustellen. Die Auswahlkriterien für diese Publikationen waren streng auf wissenschaftliche Arbeiten fokussiert, um eine fundierte Basis für das sensorbasierte System zu schaffen.

Anschließend wurden die identifizierten Veröffentlichungen mit zusätzlichen, spezifischen Suchbegriffen weiter gefiltert. Dieser sorgfältige Filterprozess zielte darauf ab, nur diejenigen Publikationen zu berücksichtigen, die in direktem Zusammenhang mit dem sensorbasierten System stehen und somit einen maßgeblichen Beitrag zu dessen Entwicklung und Anwendung leisten können. Durch diese akribische Vorgehensweise wurde sichergestellt, dass ausschließlich relevante Informationen und Erkenntnisse in die weiteren Entwicklungsphasen des sensorbasierten Systems einfließen.

Diese methodische Herangehensweise gewährleistet nicht nur eine hohe Qualität der ausgewählten Literatur, sondern auch eine umfassende Berücksichtigung aller relevanten Aspekte im Zusammenhang mit dem sensorbasierten System. Die präzise Selektion der wissenschaftlichen Veröffentlichungen aus der Scopus-Datenbank und die gezielte Anwendung weiterer Suchbegriffe unterstreichen die Sorgfalt und Genauigkeit, mit der dieses Literaturrechercheverfahren durchgeführt wurde. Somit bildet die auf diese Weise zusammengestellte Literaturgrundlage eine solide Grundlage für die weitere Forschung und Entwicklung des sensorbasierten Systems

Im Institut für Digitales und Autonomes Bauen nimmt die Anwendung von Monitoringsystemen eine zentrale Rolle ein. Besonders in den Disziplinen der smarten Bauwerksüberwachung, des Umweltmonitorings und des Abwassermonitorings sind sensorbasierte KI-Systeme von entscheidender Bedeutung. Zahlreiche Projekte haben gezeigt, dass die Integration von intelligenten Überwachungstechnologien zu einem tieferen Verständnis der Bauwerksleistung, Umweltbedingungen und Abwasserparameter führt.

Ein essenzieller Aspekt dieser Projekte liegt in der Verwendung von Sensorknoten, die mit mehreren Sensoren ausgestattet sind und eine breite Palette von Parametern aufzeichnen können. Durch diese vielfältige Datenerfassung entsteht eine umfassende Datenlage, die den Anwendern wertvolle Informationen für fundierte Entscheidungsfindungen bietet. Die Erfahrungen aus diesen Projekten bilden die Grundlage für die Entwicklung des sensorbasierten KI-Systems im Kontext von INNOWATER.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden drei verschiedene Feuchtigkeitssensoren getestet:

- DEBO CAP SENS Bodenfeuchtesensor (~3€)
- ARD SEN WET1 Bodenfeuchtesensor (~1€)
- ARD SEN WET2 Bodenfeuchtesensor (~1€)

Alle Sensoren wurden unter den gleichen Bedingungen getestet. Die Zuverlässigkeit wurde analysiert, sowie die Handhabung beim Anschluss und der Benutzung. Auch wenn sich die Sensoren preislich unterscheiden, befinden sie sich im gleichen, geringfügigen Preissegment. Daher wurden preisliche Unterschiede nicht für die schlussendliche Entscheidung berücksichtigt. Die endgültige Entscheidung ist auf den DEBO CAP SENS Bodenfeuchtesensor gefallen. Der Sensor bringt das höchste Maß an Kompatibilität mit und die einfachste Handhabung. Er lässt sich problemlos installieren und anschließen, ohne dabei abhängig von anderer Soft- oder Hardware zu sein. ARDUINO-Sensoren weisen optimale Funktionalität erst auf, wenn sie mit ARDUINO-Mikroprozessoren verbunden werden. Für die Skalierbarkeit ist die Flexibilität und Austauschbarkeit von Komponenten des Bewässerungssystems ein wichtiges Merkmal.

In Abbildung 5 ist das KI-System für ein besseres Verständnis dargestellt:

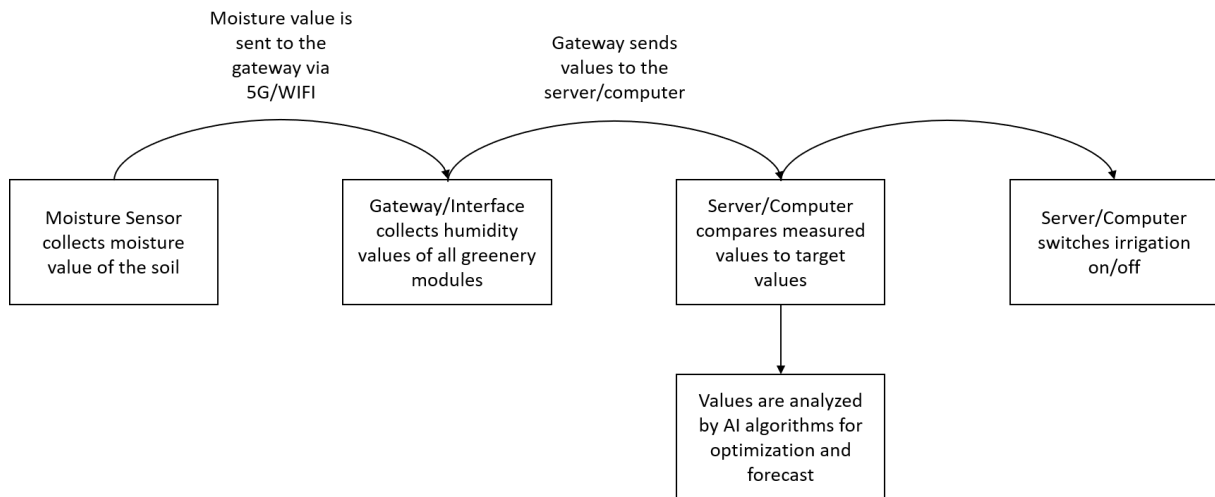


Abbildung 5: Sensorbasiertes KI-System

Die Bodenfeuchtesensoren nehmen in Echtzeit Feuchtigkeitsdaten der zu bewässernden Vegetationsmodule auf und senden diese über eine Schnittstelle an die zentrale Steuerungseinheit. Als Steuerungsparameter gilt der unmittelbare Vergleich der aufgenommenen Feuchtigkeitsdaten mit den optimalen Feuchtigkeits- und Bewässerungsdaten der verpflanzten Vegetationsmodule, die aus der Fachliteratur bekannt sind. Hauptsächlich dienen die KI-Algorithmen der Prognose von Feuchtigkeitsbedarfen in der Zukunft. Realisiert wird diese Prognose mit verschiedenen Algorithmen der Entscheidungsbaumfamilie (Decision Tree Algorithm). Diese trainieren das Datenmodell anhand ausgewählter Parameter (bspw. Bewässerungsmenge, -dauer, -intervall) und optimieren die Ausgabe so, dass die Daten den Vorgaben (optimale Daten aus Fachliteratur) am nächsten kommen. Dafür verkleinert der Algorithmus über die Trainingsdauer das mittlere Abweichungsquadrat so weit wie möglich.

Insbesondere wurde auf den Erkenntnisschatz hinsichtlich intelligenter Bauwerksüberwachung, Umweltmonitoring und Abwassermonitoring zurückgegriffen, um die Effektivität und Anwendbarkeit des sensorbasierten KI-Systems zu optimieren. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen direkt in die Gestaltung und Implementierung des Systems ein, wodurch eine praxisnahe und bewährte Herangehensweise gewährleistet wird. Somit profitiert das sensorbasierte KI-System von einer bewährten Methodik, die auf den Erfolgen vergangener Projekte im Bereich des digitalen und autonomen Bauens basiert.

Im Anschluss wurde ein Prototyp angefertigt, der mit zunehmender Reife hochskaliert werden kann. Da es während der Projektlaufzeit planmäßig nicht zur praktischen Umsetzung der Bewässerung kommen konnte, wurde ein Prototyp entwickelt, mit dem die intelligente Bewässerung simuliert werden kann. Hierbei wurden die verfügbaren Bauteile im Institut sowie die finanziellen Mittel, die von der DBU bereitgestellt wurden, genutzt. Eine übersichtliche Darstellung dieser Komponenten findet sich in den Abbildungen 5 und 6.



Abbildung 7: Sensorik und Verbindung



Abbildung 6: Sammelbehälter und Photovoltaikanlage

2.3.4 Entwicklung eines Leitfadens für die Grauwassernutzung

Die Ergebniszusammenfassung dieses Forschungsprojekts wurde verwendet, um einen umfassenden Leitfaden für Bauherren und Planer zu entwickeln, der die Bewässerung städtischer Grünflächen und die Integration von Grauwassernutzung zum Inhalt hat. Dieser fungiert als wertvolles Instrument für Fachleute im Bereich der städtischen Planung, um nachhaltige und effiziente Praktiken im Umgang mit Wasserressourcen in urbanen Grünanlagen zu implementieren.

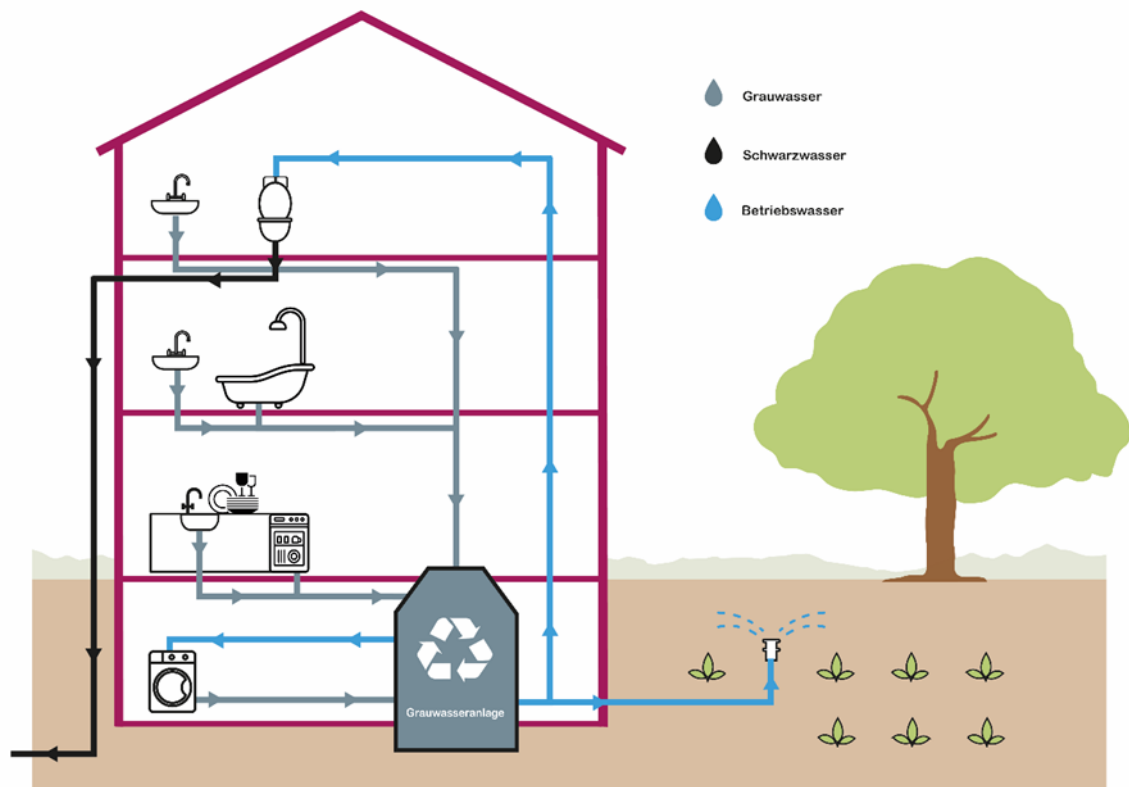


Abbildung 8: Titelbild des Leitfadens für die Grauwassernutzung

Der Leitfaden enthält detaillierte Informationen zu den identifizierten Parametern für den Einsatz von Sensortechnik im Wasser- und Bodenmanagement, wodurch eine präzise Überwachung und Steuerung der Bewässerungsprozesse ermöglicht wird.

Darüber hinaus umfasst der Leitfaden praktische Empfehlungen zur Implementierung von Grauwassernutzungssystemen in städtischen Grünanlagen. Er berücksichtigt dabei nicht nur die technischen Aspekte, sondern auch soziale, wirtschaftliche und umweltbezogene Faktoren. Die Integration von Grauwassernutzung in städtische Grünflächen erfordert eine sorgfältige Abwägung von ökologischen Auswirkungen, gesellschaftlicher Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit. Der Leitfaden dient somit als wertvolles Werkzeug, um die Nachhaltigkeit und Effizienz in der Pflege urbaner Grünanlagen voranzutreiben und dabei die städtische Umweltqualität zu verbessern.

3 Fazit

Um anthropogene Umweltbelastungen zu reduzieren und Städte dauerhaft lebenswert zu gestalten, ist eine effiziente Quartiersentwicklung von entscheidender Bedeutung. Diese Entwicklung sollte nicht nur auf kurzfristige Bedürfnisse reagieren, sondern auch eine langfristige und nachhaltige Weiterentwicklung der städtischen Infrastruktur umfassen. Eine effiziente Quartiersentwicklung strebt danach, die Lebensqualität der Bewohner zu verbessern, während gleichzeitig ökologische Nachhaltigkeit gewährleistet wird.

Städtische Grünanlagen spielen eine entscheidende Rolle für die Lebensqualität in urbanen Gebieten, indem sie Erholungsorte für Bewohner schaffen, die Luftqualität verbessern und zur Biodiversität beitragen. Die Bewässerung dieser Grünflächen ist jedoch oft mit Herausforderungen verbunden, insbesondere in Regionen mit begrenzten Wasserressourcen.

Die Nutzung von Grauwasser kann einen bedeutenden Beitrag dazu leisten, die Bewässerung städtischer Grünanlagen zu ermöglichen und Nutzungskonflikte im Zusammenhang mit der Ressource Wasser zu entschärfen. Grauwasser, das aus Haushalten stammt und nach der Verwendung in Badewannen, Duschen, Waschbecken und Küchen gesammelt wird, bietet eine alternative Wasserquelle, die für die Bewässerung von Grünflächen genutzt werden kann.

Die Integration von Grauwassernutzungssystemen in städtische Bewässerungspraktiken ermöglicht nicht nur eine nachhaltigere Wasserbewirtschaftung, sondern trägt auch dazu bei, den Druck auf konventionelle Trinkwasserquellen zu verringern. Grauwasser, nach angemessener Aufbereitung, kann effizient für die Bewässerung von Parks, Grünflächen und öffentlichen Plätzen genutzt werden.

Im Rahmen des durchgeführten Projekts INNOWATER wurden wichtige Fortschritte in Richtung einer zukunftsfähigen Wasser- und Bodenbewirtschaftung im Wohnquartier erzielt. Die Identifizierung sowohl der technischen, rechtlichen als auch organisatorischen Herausforderungen legt den Grundstein für eine umfassende Lösungsfindung.

Die Untersuchungen am realen Grauwasser und die Entwicklung eines umfassenden Untersuchungsprogramms haben es ermöglicht, die Potenziale der Grauwassernutzung eingehend zu erforschen. Durch die Analyse von tatsächlich in Haushalten anfallendem Grauwasser konnten praxisnahe Erkenntnisse gewonnen werden, die einen realistischen Einblick in die Zusammensetzung und die behandelbaren Aspekte dieses Abwasserstroms bieten.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen haben gezeigt, dass Grauwassernutzung ein vielversprechender Ansatz ist, um Wasserressourcen nachhaltiger zu nutzen. Die Identifizierung von geeigneten Aufbereitungstechnologien und die Anpassung von Nutzungsszenarien an die spezifischen Eigenschaften des Grauwassers sind dabei zentrale Schlüssel. Zudem tragen solche Untersuchungen dazu bei, das Verständnis für die Möglichkeiten und Herausforderungen der Grauwassernutzung in unterschiedlichen Kontexten zu vertiefen.

Die Entwicklung und erfolgreiche Erprobung intelligenter Systeme zur Speicherung und Wiederverwendung von Regenwasser sowie gereinigtem Grauwasser aus den Wohnquartieren erleichtert eine nachhaltige Wassernutzung. Dies ermöglicht nicht nur eine effiziente Bewässerung von Grünflächen, sondern trägt auch zur Ressourcenschonung bei.

Im Rahmen des Projekts wurde ein dezentrales, adaptives und sensorbasiertes KI-System eingehend untersucht. Dieses innovative System bietet die Möglichkeit, eine nachhaltige Bewirtschaftung von Grünflächen im städtischen Umfeld zu unterstützen. Die Integration von künstlicher Intelligenz (KI) in Verbindung mit dezentralen und adaptiven Ansätzen ermöglicht eine effiziente und ressourcenschonende Pflege von urbanen Grünanlagen.

Die dezentrale Struktur des Systems ermöglicht eine breite Anwendung in verschiedenen städtischen Grünflächen, unabhängig von ihrer Größe oder Lage. Diese Flexibilität trägt dazu bei, die Pflege von Grünanlagen effektiver zu gestalten und gleichzeitig den ökologischen Fußabdruck zu minimieren. Insgesamt bietet das untersuchte dezentrale, adaptive und sensorbasierte KI-System vielversprechende Perspektiven für eine zukunftsfähige Bewirtschaftung städtischer Grünflächen.

Die Untersuchung eines Modellquartiers im Rahmen dieses Projekts ermöglichte die praxisnahe Entwicklung von Konzepten zur Bewässerung und Grauwassernutzung. Durch diese praxisorientierte Herangehensweise konnten Lösungsansätze gezielt gestaltet werden, um sicherzustellen, dass die erzielten Ergebnisse direkt auf Planungsprozesse übertragbar und umsetzbar waren. Die Ergebnisse der Modellquartier-Untersuchung lieferten nicht nur wertvolle Erkenntnisse über die Wirksamkeit der entwickelten Ansätze, sondern auch praktische Leitlinien und Empfehlungen für zukünftige städtebauliche Planungen.

Die abschließende Prüfung der Übertragbarkeit auf weitere Wohnquartiere sowie die Erstellung einer Handreichung für Planer und Bauherren bieten einen klaren Mehrwert. Dies ermöglicht eine breitere Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse und Lösungsansätze in verschiedenen urbanen Kontexten und trägt somit zu einer flächendeckenden Implementierung nachhaltiger Praktiken in der Stadtentwicklung bei.

Literaturverzeichnis

ABL Environmental Consultants Ltd (2006). Atlantic Canada Wastewater Guidelines Manual: for Collection, Treatment and Disposal.

ACT Parliamentary Counsel also (1997). ACT ENVIRONMENT AND HEALTH WASTEWATER REUSE GUIDELINES.

Alcalde-Sanz, L., & Gawlik, B.M. (2017). Minimum quality requirements for water reuse in agricultural irrigation and aquifer recharge: Towards a water reuse regulatory instrument at EU level. Joint Research Center.

BSI (2010). Greywater systems - Part 1: Code of practice: BS 8525-1:2010.

Bundesministerium der Justiz (2021). Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch: Trinkwasserverordnung - TrinkwV.

Coutts, C., & Hahn, M. (2015). Green Infrastructure, Ecosystem Services, and Human Health. *International journal of environmental research and public health*, 12(8), 9768–9798.

Department of Environmental Quality (1990). Chapter 340 - Division 53: GRAYWATER REUSE AND DISPOSAL SYSTEMS. Retrieved March 14, 2023, from <https://secure.sos.state.or.us/oard/displayDivisionRules.action?selectedDivision=1470>.

Department of Health Australia (2010). Code of Practice for the Reuse of Greywater in Western Australia 2010.

DIN, 19650 (1999), Bewässerung - Hygienische Belange von Bewässerungswasser, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag

DIN EN ISO 10705-2 (2002), Nachweis und Zählung von Bakteriophagen, Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag

DIN EN ISO 19458 (2006), Wasserbeschaffenheit, Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag

DIN EN ISO 9308-2 (2014), Zählung von Escherichia coli und coliforme Bakterien, Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag

DIN EN 1484 (2019), Wasseranalytik, Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag

DWA (2017). DWA-M 277 Hinweise zur Auslegung von Anlagen zur Behandlung und Nutzung von Grauwasser und Grauwasserteilströmen. DWA-Regelwerk: M 277. Hennef: DWA.

EU (2020). VERORDNUNG (EU) 2020/741 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 25. Mai 2020 über Mindestanforderungen an die Wasserwiederverwendung.

EU Richtlinie, 2006/7/EG (2006). Richtlinie 2006/7/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Februar 2006 über die Qualität der Badegewässer und deren Bewirtschaftung und zur Aufhebung der Richtlinie 76/160/EWG

European Commission (2022). Guidelines to support the application of Regulation 2020/741 on minimum requirements for water reuse. Official Journal of the European Union.

Fachvereinigung Betriebs- und Regenwassernutzung e.V. (fbr) (2005). Grauwasser-Recycling: Planungsgrundlagen und Betriebshinweise fbr-Hinweisblatt H-201.

IDEXX (o. J.), Colilert , online Abrufbar unter: <https://www.idexx.de/de/water/water-products-services/colilert/>

Institut Franais de l'Environnement (2008). *L'économie de l'environnement en (2006)*.

ISO, 16075 (2020), Leitlinien für die Nutzung behandelten Abwassers für Bewässerungsprojekte - Teil 1: Grundlage eines Projekts zur Wiederverwendung für die Bewässerung

LAWA (2022). Endbericht der Lawa-Ad hoc AG/KG Water Reuse an die 163. LAWA-Vollversammlung, Februar 2022.

Luca Száraz (2014). The Impact of Urban Green Spaces on Climate and Air Quality in Cities (Vol. 2).

New South Wales Government (2007). NSW-GUIDELINES-FOR-GREYWATER-REUSE.

Shoushtarian, F., & Negahban-Azar, M. (2020). Worldwide Regulations and Guidelines for Agricultural Water Reuse: A Critical Review. *Water*, 12(4), 971.

The Standardization Administration of the People's Republic of China (2007). The reuse of urban recycling water - Quality of farmland irrigation water: GB 20922-2007.

Umweltbundesamt (2017). Empfehlungen des Umweltbundesamtes für die Entwicklung von EU Mindestqualitätsanforderungen für Wasserwiederverwendung.

US EPA, ORD, NRMRL, Water Supply and Water Resources Division, & CDM Smith (2012). 2012 Guidelines for Water Reuse.

WHO (2006a). Overview of greywater management Health considerations: Discussed and approved at the regional consultation on national priorities and plans of action on management and reuse of wastewater, Amman, Jordan.

WHO (2006b). WHO Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater: Volume IV excreta and greywater use in agriculture.

Anhang

Leitfaden für die Grauwassernutzung (separate Dokumentation)

Bewertungsmatrix (xlsx-File)

INNOWATER

INNOVATIVE UND WISSENSBASIERTE
QUARTIERSENTWICKLUNG FÜR EIN ENERGIE- UND
RESSOURCENEFFIZIENTES WOHNEN



Projektpartner:

