

Zusammenfassung der Promotionschrift

**„Zeitsequenzielle Teilstromklassierung zur minimalinvasiven Abwasser-
getrennthaltung in häuslichen Entwässerungssystemen“**

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
an der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von
Stefanie Hörnlein
(interne Doktorandin)
geboren am 23.02.1986 in Suhl

Mentor:
Prof. Dr.-Ing. Jörg Londong

August 2025

Einverstanden:


Prof. Dr.-Ing. Jörg Londong

Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit

1. Die Siedlungswasserwirtschaft spielt im Hinblick auf die Mitigation und Adaption an die bestehenden und zukünftigen Herausforderungen einer nachhaltigen Stadtentwicklung eine zentrale Rolle. Anpassungsstrategien bestehender Infrastrukturen hin zu zukunftsfähigen Systemen sind insbesondere vor dem Hintergrund der bereits messbaren sowie prognostizierten klimatischen Entwicklungen essenziell.
2. Sanitärsysteme, die auf der quellseparierten Teilstrombewirtschaftung basieren, ermöglichen die ressourcenorientierte und zielgerichtete Behandlung von Grauwasser, Schwarzwasser und weitergehend unterteilten Teilströmen (z.B. Urin oder Fäzes). Die deutlichen Unterschiede in der physikochemischen Charakterisierung führen zu hohen Potenzialen zur Begegnung klimatischer Extremereignisse, zum Umgang mit Ressourcen wie Nährstoffrecycling und Energieeinsparungen und -produktion sowie gezielter Abwasserreinigung z.B. im Hinblick auf Mikroplastik oder Probleme durch Antibiotikaresistenzen.
3. Eine getrennte Sammlung, Erfassung und Ableitung der einzelnen Stoffströme ist für die Umsetzung von NoMix-Systemen zwingend. Im Neubau erfolgt die technische Umsetzung durch räumliche Separation mit Installation spezieller Toilettensysteme und mehrerer Abwasserleitungen. Im Baubestand ist das konventionell eingesetzte Verfahren die maximalinvasive Umrüstung des bestehenden Leitungssystems.
4. Eine Abwasserweiche bietet die technische Möglichkeit den besonderen Anforderungen für eine technisch und organisatorisch minimalinvasive Stoffstromseparation für Bestandsgebäude zu begegnen. Das Systemkonzept besteht aus einem Verteilungssystem, das auf Basis von Sensoren und eines komplexen Steuerungssystems die Abwasserteilströme zeitlich versetzt aufteilen soll. Die grundsätzliche Funktionalität der Detektionsmöglichkeit via Schall und der Trennbarkeit mit den erprobten technischen Trenneinrichtungen wurde nachgewiesen.
5. Insbesondere die Fragestellungen der sensorischen Identifizierbarkeit der Herkunftsorte der Abwässer und damit verbunden die Steuerbarkeit der Abwasserweiche sowie die wissenschaftliche Analyse der tatsächlichen Potenziale in der Umsetzung sind nicht untersucht.
6. Diese Problematik greift die vorliegende Dissertation auf, um die parametrisierte Modellabbildung systemisch umzusetzen. Im Fokus stehen die wissenschaftliche Untersuchung und der Nachweis der Funktionalität der technischen Lösung der Abwasserweiche und die Modellierung des Gesamtsystems zur Bestimmung der Umsetzungspotenziale aus der Getrennthaltung von Abwasserteilströmen für verschiedene Nutzungsszenarien.

Stand der Wissenschaft

7. Von der doppelten Leitungsführung abweichende Konzepte zur Getrennthaltung erreichen dies durch räumliche Unterteilung oder zeitliche Sequenzierung. Die existierenden Lösungsansätze sind nach aktuellem Stand technisch nicht zuverlässig einsetzbar oder bedürfen Invasivität technischer oder betrieblicher Natur mit Eingriffen in Leitungssysteme oder Interaktionen mit Nutzenden.
8. Die Charakterisierung von Abwasserteilströmen zeigt deutliche Unterschiede im Hinblick auf die enthaltenen stofflichen und energetischen Ressourcen. Die abzuleitenden Potenziale ermöglichen eine Differenzierung bis auf Ebene der Entwässerungsgegenstände.
9. Transportprozesse in häuslichen Entwässerungssystemen wurden im Hinblick auf die Sicherstellung der Funktionalität und Selbstreinigungsprozessen in den Ableitungsrohren deskriptiv modelliert. Eine detaillierte zeitbezogene Analyse der ressourcen-

relevanten Teilprozesse hausinterner Ableitung wird in der Fachliteratur bisher nicht beschrieben.

10. Für die Detektion der Herkunftsorte von Entwässerungsereignissen in häuslichen Leitungssystemen sind in der Fachliteratur invasive Messsysteme in Haushalten oder am Leitungssystem zur Wasserzuführung sowie wartungsintensive Lösungsansätze im Abwasser-Rohrsystem zu finden. Die Kombination von Smart Metering-Ansätzen mit der Disaggregation der Wasserverbrauchsdaten ermöglicht die Identifikation von Trinkwasserverbrauchereignissen. Die minimalinvasive Detektion von hausinternen Abwasserherkunftsorten mit Bezug zum Entwässerungsereignis unter Nutzung von Schallsignalen im Entwässerungssystem wurde nicht untersucht.
11. Der Grad der Getrennthaltung von Abwasserteilströmen ohne Eingriffe in Leitungssysteme ist direkt abhängig vom Auftreten der Entwässerungsereignisse und der Gleichzeitigkeit verschiedenartiger Ableitungen. Die Ereignismodellierung erfolgte zumeist mit Fokus auf den Zeitpunkt des Wasserverbrauchs ohne Berücksichtigung von Überschneidungen. Sogenannte End-Use-Modelle bieten eine gute Grundlage für die Weiterentwicklung in Teilstromseparationsmodelle.

Eingesetzte Methoden

12. Für die Beantwortung der Forschungsfragen wurde ein multidisziplinäres Forschungsdesign mit experimentellen, analytischen und modellbasierten Komponenten angewendet. Datenauswertungen und Modellberechnungen erfolgten mit Matlab® 2025. Der methodische Aufbau der Untersuchungen folgt der Dreiteilung des betrachteten Systems Abwasserweiche in die temporale Getrennthaltung der Teilströme, die entstehenden Potenziale in erreichbare Qualitäten der Trennungsergebnisse und die Detektion der Abwasserherkunftsorte.
13. Die Detailbetrachtung der Ableitungsprozesse in häuslichen Entwässerungssystemen erfolgte durch technische Untersuchungen in realen Wohngebäuden in Kombination mit einer Modellanlage im technischen Maßstab. Die häuslichen Abwasserteilströme wurden durch synthetische Abwasseräquivalente simuliert. Zeitliche Ableitungsprofile wurden mit Hilfe von Kameraaufnahmen und tracerbasierten Untersuchungen identifiziert.
14. Die Evaluierung der möglichen physischen Getrennthaltung in der Abwasserweiche wurde für Präferenzvarianten der mechanischen Trenneinheit in der Modellanlage im technischen Maßstab durchgeführt. Der Trenngrad wird qualitativ sowie quantitativ anhand einer Bilanzierung der Fracht an sauerstoffzehrenden Inhaltsstoffen (CSB) der getrennten Teilströme beschrieben.
15. Auf Basis einer Literaturrecherche zur physikochemischen Charakterisierung der Teilströme wurden in einer Clusteranalyse mögliche Ressourcen- und Schutzpotenzialgruppierungen erstellt. Darauf aufbauend wurde ein Prioritätenmodell zur Zieldefinition für die Getrennthaltung entwickelt.
16. Die sensorische Identifikation der Abwasserherkunftsorte wurde anhand von Geräuschmessungen aus der Abwassergrundleitung in verschiedenen Wohngebäuden untersucht. Methodisch wurde eine Klassifizierbarkeitsanalyse mit Modellen des Machine-Learning umgesetzt. Ergebnis ist die Klassifizierung von Grauwasser und Schwarzwasser und die Unterscheidung aller Entwässerungsgegenstände (wie WC, Dusche, Badewanne, Küchenspüle etc.).
17. In Anlehnung an bestehende End-Use-Modellierungen aus der Trinkwasserverbrauchsanalyse erfolgte die Modellierung der Trennbarkeit von Entwässerungsereignissen. In der Weiterentwicklung eines probabilistischen Mikrokomponentenmodells zur Generierung von Entwässerungsmustern wurde ein Modell zur Bestimmung der Gleichzeitigkeit mit der Monte-Carlo-Methode erstellt. Zur Plausibilitätsprüfung wurden exemplarische Monitoring-Kampagnen in Beispielhaushalten durchgeführt.

18. Die jeweiligen Systembestandteile wurden auf Basis der prozessorientierten Analysen einzeln abgebildet und als Modellkomponenten in einem Gesamtmodell zur Trenngradbestimmung folgerichtig zusammengeführt.

Wesentliche Ergebnisse

19. In Kombination mit normbasierten häuslichen Entwässerungssystemen ist von einer ausreichenden Selbstreinigungsfunktion der Ableitungsrohre und dem ausreichenden Abtransport der festen und flüssigen Stoffe bis zur Abwasserweiche auszugehen. Ablagerungsprozesse, die in einer umfangreichen Kreuzkontamination zwischen den Abwasserteilströmen resultieren, sind in diesen Fällen nicht zu erwarten. Für andere Systeme kann die Reinigung von Ablagerungen durch Nachlaufwasserzeiten in das Ableitungsmodell integriert werden.
20. Toilettenspülungen zeigen ein ungleichmäßiges Ablaufmuster mit stofflich hoher Belastung im zeitlich ersten Volumenanteil. Die Getrennthaltung von Abwasserteilströmen mit detaillierter Klassifizierung in WC, Dusche, Küchenspüle etc. kann für Ereignisse mit inhomogenem zeitlichem Ablaufmuster auf eine Trennung zwischen hoch- und niedrig-belasteten Anteilen erweitert werden. Die Analyse der mechanischen Trennung von verschiedenen belasteten Anteilen der Toilettenspülung resultierte in einer Abtrennung von 98 % der eingetragenen CSB-Fracht in den hochbelasteten Teilstrom in 5% des eingetragenen Abwasservolumens. Die minimale Fließzeit der Abwasserteilströme lag in den untersuchten Entwässerungsanlagen bei 11 Sekunden für Spültoiletten.
21. Aus der Clusteranalyse der physikochemischen Teilstromgruppen folgt ein Prioritätenmodell für die Teilstromauswahl im Hinblick auf deren Ressourcen: Brauchwasser, Nährstoffe, chemische Energie, thermische Energie, Potenzial zur Verdunstungskühlung sowie die Schutzpotenzialgruppen Mikroplastik und mikrobiologische Belastung. Daraus geht eine fünfgeteilte Skalierung auszuwählender Teilströme für jede Gruppe hervor.
22. Die Schallsignale für Entwässerungsereignisse zeigen im Zeitprofil deutliche Unterschiede zwischen den Entwässerungsgegenständen. Die Klassifizierungsanalyse zeigt objektbezogene benötigte Mindestsignaldauern für die Machine-Learning Klassifizierung. Nicht optimierte Klassifikatoren erreichten in der Analyse mit Matlab® hohe Bewertungsmetriken im Modelltest von 73 bis 88 % Macro-F1-Score für die Unterscheidung in Grau- und Schwarzwasser und 56 – 70 % Macro-F1-Score für die Unterscheidung in alle Entwässerungsgegenstände. Die resultierenden Erkennungsraten der Klassifizierung sind event- und objektspezifisch und gehen als Modellparameter in die Gesamtbetrachtung ein. Sich überschneidende gleichzeitig ablaufende Entwässerungsereignisse zeigen in der Klassifizierungsanalyse für die betrachteten Objekte schlechte Erkennungsraten und sind in dieser Betrachtung nicht selektierbar.
23. Die Simulation von nicht gleichzeitig abgeleiteten Entwässerungen im adaptierten End-Use-Modell zeigt für die Klassierung aller Entwässerungsgegenstände abtrennbare Volumina von mehr als 90 % für zwei angeschlossene Einwohnerwerte. Das getrennt sammelbare Gesamtvolumen korreliert mit der Größe und der Anzahl der angeschlossenen Haushalte und liegt in der Simulation für Mehrfamilienhäuser mit Haushalten mit jeweils 2 EW bei bis zu 10 Wohneinheiten bei mehr als 80 % abtrennbarem Gesamtvolumen für Grau- und Schwarzwasser.
24. Die Kopplung aller modellierten Systembestandteile resultiert im Hauptergebnis der Arbeit zur Abbildung des Gesamtsystems unter Berücksichtigung der Ableitungs- und Ablagerungsvorgänge, der priorisierten Teilströme, der möglichen Klassifizierung der Abwasserherkunftsorte und der Überschneidungen von Entwässerungsereignissen in einem Gesamtmodell zur Berechnung des getrennt sammelbaren Volumens präferierter Abwasserteilströme.