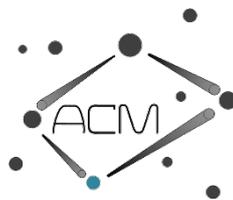


**MINISTERIUM
FÜR EIN
LEBENSWEERTES
ÖSTERREICH**

bmlfuwgv.at

AZM – AKTIVES ZUSTANDSMONITORING VON TRINKWASSER- VERTEILNETZEN



LINZ AG
Immer bestens betreut.



IMPRESSUM



Medieninhaber und Herausgeber:
BUNDESMINISTERIUM
FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT,
UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT
Stubenring 1, 1010 Wien
www.bmlfuw.gv.at

Projektleitung: Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Daniela Fuchs-Hanusch (TU Graz, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau)

Text und Redaktion:

AutorInnen: David Steffelbauer, Markus Günther, Markus Neumayer und Daniela Fuchs-Hanusch

Grafikdesign: Daniela Fuchs-Hanusch, Markus Günther, David Steffelbauer (Logo AZM)

Bildnachweis: TU Graz – Institut für Siedlungswasserwirtschaft (S61, S66, S67, S70, S71, S74-S76, S88, S89, S99-S102, S125 - S129, S132, S133)

Gestaltungskonzept: WIEN NORD Werbeagentur

Alle Rechte vorbehalten.
Wien, März 2017



Original wurde gedruckt von: Zentrale Kopierstelle des BMLFUW,
UW-Nr. 907, nach der Richtlinie „Druckerzeugnisse“ des
Österreichischen Umweltzeichens.

AZM PROJEKTPARTNER



Technische Universität Graz
Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau
Stremayrgasse 10/I, 8010 Graz



Technische Universität Graz
Institut für elektrische Meßtechnik und Meßsignalverarbeitung
Inffeldgasse 23/II, 8010 Graz



Linz AG
Linz Service GmbH Wasser
Wienerstrasse 151, 4021 Linz



Stadt Wien - Wiener Wasser
Abteilung 6 - Rohrnetz
Grabnergasse 4-6, 1060 Wien

INHALTSVERZEICHNIS

IMPRESSUM.....	2
1 ZIELSETZUNG.....	7
2 EINLEITUNG.....	8
PROJEKTSTRUKTUR UND KURZBESCHREIBUNG DER ARBEITSPAKETE.....	11
2.1 ARBEITSPAKET 1 (AP1) – MANAGEMENT UND DISSEMINATION	11
2.2 ARBEITSPAKET 2 (AP2) – GRUNDLAGEN	11
2.3 ARBEITSPAKET 3 (AP3) – ENTWICKLUNG MATHEMATISCHES MODELL	11
2.4 ARBEITSPAKET 4 (AP4) – AUFBAU LABORMODELL	11
2.5 ARBEITSPAKET 5 (AP5) – MODELLGESTÜTZTE LECKAGEEINGRENZUNG IM LABORMODELL.....	12
2.6 ARBEITSPAKET 6 (AP6) – FELDVERSUCH, ANWENDUNG DER METHODIK IM REALEN SYSTEM.....	12
3 GRUNDLAGEN.....	13
3.1 SITUATION DER ÖSTERREICHISCHEN WASSERVERSORGUNG	13
3.2 STAND DER TECHNIK IM WASSERVERLUSTMANAGEMENT	15
3.2.1 WASSERVERLUSTREDUKTION.....	15
3.2.1 TURNUSMÄSSIGE NETZABSCHREITUNG (PASSIVE LECKKONTROLLE).....	19
3.2.2 NACHTMINIMUMDURCHFLUSS-ÜBERWACHUNG.....	19
3.2.3 LAUFENDE ÜBERWACHUNG VON DRUCK UND DURCHFLUSS	20
3.2.4 LECKAGEEINGRENZUNG UND LOKALISIERUNG	20
3.2.4.1 Geräuschlogger	20
3.2.4.2 Stufentest (Steptesting).....	21
3.2.4.3 Korrelatoren.....	22
3.2.4.4 Bodenmikrofon	22
3.2.4.5 Spürgas	23
3.3 STAND DER WISSENSCHAFT LECKAGEDETEKTION UND LOKALISIERUNG.....	25
3.3.1 MODELLGESTÜTZTE METHODEN ZUR LECKAGELOKALISIERUNG	25
3.3.1.1 Leckagelokalisierung.....	26
3.3.1.2 Ideale Sensorplatzierung.....	28
3.3.2 EXPERIMENTELLE TRINKWASSERVERSORGUNGSSYSTEME.....	29
4 METHODIK	32
4.1 MODELLENTWICKLUNG.....	32
4.1.1 HYDRAULISCHE MODELLIERUNG VON TRINKWASSERVERTEILNETZEN	33
4.1.1 MODELLGESTÜTZTE LECKAGEEINGRENZUNG	35
4.1.2 ALGORITHMEN ZUR OPTIMALEN SENSORPLATZIERUNG	36
4.1.2.1 Leakage-Sensitivitätsmatrix.....	36
4.1.2.2 Beispiel für die Berechnung einer Leakage-Sensitivitätsmatrix	38
4.1.2.3 Genetische Algorithmen	40
4.1.2.4 Graphentheoretische Betrachtung von Trinkwassernetzen und Shortest Path Algorithmen....	41
4.1.2.4.1 Shortest Path 1 Algorithmus	41
4.1.2.4.2 Shortest Path 2 Algorithmus	42
4.1.2.4.3 Optimale Platzierung durch Minimierung der Shannon Entropie	42
4.1.2.5 Pérez binärisierte Sensitivitätsmatrix.....	42
4.1.2.6 Projektionsbasierter Ansatz nach Casillas	44
4.1.2.7 SPuDU – Sensor Placement under Demand Uncertainties	46
4.1.2.8 Diskussion der verwendeten Algorithmen.....	50
4.1.3 STOCHASTISCHE MODELLIERUNG VON TRINKWASSERVERTEILNETZEN.....	52
4.1.3.1 Differentielles Hydraulisches Modell	53
4.1.3.2 Linearisiertes differentielles hydraulisches Modell	53

ZIELSETZUNG

4.1.3.3	Momentenberechnung für Verbrauchsfälle	54
4.1.3.4	Anwendung des stochastischen Modells.....	55
4.1.3.5	Numerische Überprüfung.....	56
4.1.3.6	Rechentchnische Anwendung	57
4.1.4	DATENMANAGEMENT UND AUTOMATISIERUNG.....	58
4.1.4.1	OOPNET.....	58
4.1.4.2	OPENSDBM, Zeitseriendatenbank und Grafana	59
4.1.4.3	Jenkins	59
4.2	LABORMODELL.....	61
4.2.1	KONSTRUKTION UND AUFBAU.....	62
4.2.1.1	Randbedingungen im Technikum SWW	66
4.2.1.2	Auswahl der Materialien.....	66
4.2.1.3	Abmessungen und konstruktive Elemente - Vollausbau	68
4.2.1.4	Hydraulisches Modell – Vollausbau	69
4.2.2	SONDEREINBAUTEN UND WASSERVERSORGUNG IM LABORMODELL.....	71
4.2.2.1	Unterwasser/Brunnenpumpe GRUNDFOS SP-8A-15	71
4.2.3	SENORTECHNIK.....	72
4.2.3.1	Durchfluss.....	73
4.2.3.2	Druck	74
4.2.4	APPARAT ZUR SIMULATION VON VERBRAUCHERN UND LECKAGEN.....	75
4.2.5	PROZESSSCHNITTSTELLEN	78
4.2.5.1	0 – 10 V Spannungsschnittstelle.....	78
4.2.5.2	4 – 20 MA Stromschnittstelle	78
4.2.5.3	4 – 20 MA HART	79
4.2.5.4	Profibus DP/PA.....	80
4.2.5.5	Zusammenfassung Feldbusse.....	81
4.2.5.6	Energieversorgung.....	81
4.2.5.7	Datenübertragung.....	82
4.2.6	MESSGENAUIGKEIT UND UNSICHERHEITEN	83
4.2.6.1	Zahlenbeispiel:.....	83
4.2.6.2	Automatisierte Erstellung der Steuerungsmatrix	84
4.2.6.3	Steuerung des labormodells	87
4.2.7	DATENMANAGEMENT	91
4.3	FELDVERSUCH	92
4.3.1	PILOT WIEN – ZONE BLAU IV	92
4.3.2	PILOT WASSERVERBAND GRAZERFELD SÜDOST (HART BEI GRAZ).....	94
4.3.2.1	Lage und Eckdaten Pilot GFSO	95
4.3.2.2	Zeitlicher Ablauf Pilotversuche Hart bei Graz	97
4.3.2.2.1	Ablauf Nachtmessungen August 2015	97
4.3.2.2.2	Messkampagne Frühjahr 2016	98
4.3.2.3	Datenmanagement, Auslesen der Drucklogger.....	101
5	ERGEBNISSE	103
5.1	MODELLBASIERTE LECKAGEEINGRENZUNG – ERGEBNISSE COMPUTERSIMULATION	103
5.1.1	EINFLUSS VON UNSICHERHEITEN AUF DIE IDEALE SENSORPLATZIERUNG	103
5.1.2	LECKAGEEINGRENZUNG – COMPUTERSIMULATION TEILNETZ HART BEI GRAZ	109
5.1.3	EINFLUSSES DER SENSORANZAHL AUF DAS OPTIMIERUNGSPROBLEM DER MODELLBASIERTEN LECKAGEEINGRENZUNG	111
5.1.4	EINFLUSS DER METRIK AUF DIE FITNESSFUNKTION UND KONVERGENZ DES LECKAGEEINGRENZUNGS-ALGORITHMUS.....	115
5.1.5	EINFLUSS VON UMORDNUNGEN DES PARAMETERRAUMES.....	117
5.2	UMSETZUNG DER ENTWICKELTEN METHODEN IM LABORMODELL	120
5.3	UMSETZUNG DER ENTWICKELTEN METHODEN IM FELDVERSUCH.....	124
5.3.1	PILOT WIEN – ZONE BLAU IV	124
5.3.1.1	Messungen an den Systemgrenzen	124
5.3.1.1.1	Messstelle Gallgasse am Behälter Rosenhügel	124

ZIELSETZUNG

5.3.1.1.2	Messstelle Kaiserpavillon	127
5.3.1.2	Temporäre Druckmessungen an Hydranten.....	128
5.3.1.3	Permanente Druckmessungen an Hausanschlussleitungen.....	130
5.3.2	MODELLBASIERTE LECKAGELOKALISIERUNG IM FELDVERSUCH HART BEI GRAZ – ZONE RAGNITZ HB KOPPENHOF.....	134
5.3.2.1	Kalibrierung des hydraulischen Modells	135
5.3.2.2	Vergleich der Lokalisierungsgenauigkeit für Unterschiedlich Platzierte Sensoren.....	136
5.3.2.2.1	Sensorplatzierung Ergebnisse	137
5.3.2.2.2	Leckagelokalisierung	146
6	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK.....	149
6.1	METHODIK MODELLBASIERTE LECKAGEEINGRENZUNG UND SENSORPLACEMENT	149
6.2	LABORMODELL.....	150
6.3	FELDVERSUCHE.....	152
6.3.1	TEMPORÄRE MESSUNGEN UND WASSERENTNAHMEN ZUR KALIBRIERUNG VON HYDRAULISCHEN MODELLEN UND ZUR LECKAGESIMULATION –	152
6.3.1	PERMANENTE INSTALLATION VON DRUCKSENSOREN MIT ONLINE- DATENÜBERTRAGUNG	153
6.3.2	ANWENDBARKEIT MODELLBASIERTE LECKAGELOKALISIERUNG.....	153
6.4	ÖKOLOGISCHER UND VOLKSWIRTSCHAFTLICHER NUTZEN DES AKTIVEN ZUSTANDSMONITORINGS VON TRINKWASSERNETZEN.....	155
6.4.1	UMSETZUNGSMÖGLICHKEITEN DER METHODE IN ÖSTERREICHISCHEN WVU.....	155
	TABELLENVERZEICHNIS	158
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	159
	LITERATURVERZEICHNIS.....	163

1 ZIELSETZUNG

EINE DER Kernaufgaben der Trinkwasserversorger im 21. Jahrhundert ist die Instandhaltung der vorhandenen Infrastrukturen. Die Trinkwasserverteilnetze stellen dabei eine besondere Herausforderung dar, da eine direkte Erfassung und Überwachung des Zustandes dieser Netze nicht möglich ist. Zu spät erkannte Leckagen können infolge langer Laufzeiten zu hohen Wasserverlusten oder zu folgenschweren Rohrbrüchen führen.

Das Forschungsprojekt „Aktives Zustands-Monitoring von Trinkwasserverteilnetzen“, kurz AZM, hat zum Ziel, die Zeit zwischen dem Auftreten und dem Erkennen von Leckagen wesentlich zu verkürzen und damit Wasserverluste sowie Kosten zu minimieren. Um dieses Ziel zu erreichen wird das Prinzip der modellgestützten Leckageeingrenzung unter Zuhilfenahme von hydraulischen Sensoren genutzt.

Grundlegende Idee dieser Methode ist es, Berechnungsergebnisse aus Simulationen in einem hydraulischen Modell den Messungen hydraulischer Parameter an unterschiedlichen Punkten im Netz gegenüberzustellen. Mittels mathematischer Algorithmen erfolgt die Minimierung der Differenz aus den berechneten und den gemessenen hydraulischen Parametern, um den wahrscheinlichsten Ort einer Leckage auf eine Region von wenigen hundert Metern Netzlänge einzugrenzen. Die optimale Platzierung der dazu erforderlichen hydraulischen Sensoren bildet die Basis für die erfolgreiche Anwendung der mathematischen Algorithmen zur Eingrenzung von Leckagen. Neben der Entwicklung der Algorithmen zur Leckageeingrenzung werden daher im Projekt auch Methoden zur optimalen Platzierung von Sensoren in Trinkwassernetzen entwickelt. Neben der Ermittlung der optimalen Positionen für die Installation der Sensoren gilt es auch die optimale Anzahl der Sensoren in Abhängigkeit der Netztopologie abzuleiten. Dabei werden auch die Auswirkungen von Unsicherheiten, insbesondere jene der Verbraucher, einbezogen. Es gilt jene Positionen als ideal auszuschließen, an welchen hohe Unsicherheiten in den Messwerten zu erwarten sind.

Die entwickelten Methoden zur optimalen Platzierung von Sensoren sowie die Methode der Leckageeingrenzung werden an einem experimentellen Trinkwasserverteilnetz, errichtet am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der TU Graz, getestet. Das experimentelle Trinkwasserverteilnetz (experimental water distribution system EWDS-TUG) ermöglicht die Simulation von Verbrauchern und Leckagen sowie deren Auswirkungen auf Durchfluss und Druck im System. Eine zentrale Aufgabe stellt die Abgrenzung zwischen den durch Leckagen hervorgerufenen Druckveränderungen zu jenen der Verbraucher dar und ist bereits bei der Platzierung der Sensoren von großer Bedeutung. Zusätzlich werden im Labornetz die Anforderungen an die Sensortechnik und die Genauigkeit unterschiedlicher Sensoren getestet. Die geeignete Auswahl der Sensoren bildet mitunter die Basis für eine erfolgreiche Implementierung der Methodik in realen Trinkwasserverteilnetzen (TVN).

Im Forschungsprojekt werden abschließend die entwickelten Methoden im Feld umgesetzt. Dies erfolgt zum einen in einem Teilnetz der MA 31 Wiener Wasser und zum anderen bei einem ländlich strukturierten Teilnetz des Wasserleitungsverbandes Grazerfeld Südost.

2 EINLEITUNG

BIS ENDE DES 20. JAHRHUNDERTS war der Ausbau der Wasserver- und Abwasserentsorgungsinfrastruktur die zentrale Aufgabe der Siedlungswasserwirtschaft in den Industrieländern. Die wichtigsten Ziele dieses Ausbaus waren die Abwasserableitung aus den Siedlungen, die Entwässerung der Siedlungen und die zentrale und qualitativ einwandfreie Versorgung der Siedlungen mit Trinkwasser. In den 1980er Jahren kam der Gewässerschutz als Ziel der siedlungswasserwirtschaftlichen Tätigkeiten hinzu. Die Instandhaltung, Erneuerung und Adaptierung dieser Infrastruktur zählt nun zu den zentralen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts.

Im Bericht „Infrastrukturen 2030“ der OECD (OECD, 2007) wird der Bedarf an (Re-)Investitionen in die Wasserinfrastruktur der OECD Länder inkl. Russland, China, Indien und Brasilien auf ca. 500 Milliarden US Dollar jährlich geschätzt. Der höchste Bedarf ergibt sich für Regionen, in welchen neben den Aufgaben der Instandhaltung und Reinvestition, Erweiterungen und Adaptierungen aufgrund von demographischen und klimatischen Entwicklungen anstehen (Rodriguez et al. 2012). Einige der am stärksten wachsenden Städte des 21. Jahrhunderts liegen zudem in Regionen mit stark eingeschränkter Wasserverfügbarkeit (McDonald et al. 2014). 68 % dieser Städte befinden sich in China, Zentralasien und Mexiko. Die Instandhaltung der bestehenden Trinkwasserinfrastruktur hat in diesen Regionen eine enorme Bedeutung, da alternde Rohrnetze zu massiven Wasserverlusten führen können. Eine zusätzliche Ressourcenerschließung ohne die bestehende Infrastruktur zu optimieren, steht im völligen Widerspruch zum Grundsatz der nachhaltigen Ressourcenbewirtschaftung.

Aber auch in den wasserreichen Regionen Europas und Nordamerikas sind Probleme bei der Instandhaltung der siedlungswasserwirtschaftlichen Infrastruktur erkennbar. Betrachtet man das durchschnittliche Alter der Wasserinfrastrukturnetze, wird der Bedarf an Reinvestitionen in diesen Regionen offensichtlich. Insbesondere in den USA und Kanada beträgt das Durchschnittsalter der Netze 50 Jahre und mehr. Die Trinkwassernetze beispielsweise von Philadelphia, Washington und New York weisen ein mittleres Alter von ca. 75 Jahren auf. Die Medienberichte zu gravierenden Rohrbrüchen und Kanaleinstürzen, die nicht nur zu hohen Wasserverlusten, sondern auch zu Folgeschäden an der umliegenden Infrastruktur führen, häufen sich in den letzten Jahren deutlich (Walton 2012).

Die Problematik der Netzüberalterung aufgrund fehlender Investitionen wird auch in Österreich immer deutlicher sichtbar. Bei den Kanalisationsnetzen lagen die Netzerneuerungsraten in den letzten Jahren durchschnittlich bei etwa 0,1 % (Breindl, 2013). In der Wasserversorgung wurde in den letzten 5 Jahren durchschnittlich 0,7 % der Netzlänge erneuert (Neunteufel et al. 2013). Auch wenn Rohrleitungen teilweise Nutzungsdauern von über 100 Jahren erreichen können und 100-jährige Rohre vielfach auch noch technischen und wirtschaftlichen Anforderungen genügen sind diese durchschnittlichen Erneuerungsraten deutlich zu gering. Oftmals begründen sich geringe Erneuerungsraten auch durch einen mangelnden Kenntnisstand über den Zustand der Infrastrukturen. Eine zielorientierte, nachhaltige und langfristig angelegte Erneuerungsplanung kann nur auf Basis fundierter Zustandsinformationen erfolgen.

Zu spät erkannte Schäden infolge mangelhafter Zustandsüberwachung gefährden nicht nur die Einhaltung der siedlungswasserwirtschaftlichen Ver- und Entsorgungsziele, sondern führen auch zu erhöhten Lebenszykluskosten der Infrastrukturanlagen. Beispielsweise entstehen durch Wasseraustritte bei nicht erkannten Schäden zusätzliche Energie- und Aufbereitungskosten. Zusätzlich resultieren aus zu spät erkannten Rohrbrüchen oft enorme Reparatur- und Folgekosten durch Schäden an Dritten, die durch Leckagefrüherkennungssysteme vermeidbar wären. Das gegenständliche Forschungsprojekt AZM beschäftigt sich mit der Thematik der frühzeitigen Leckageeingrenzung in Trinkwasserverteilnetzen. Ziel ist dabei Trinkwasser- und Energieressourcen zu schonen und zudem die Nutzungsdauer der

EINLEITUNG

Trinkwasserleitungen technisch und wirtschaftlich zu optimieren. Die Tatsache, dass diese unterirdische Infrastruktur nur sehr eingeschränkt auf ihren Zustand überprüft werden kann, verdeutlicht zudem die Wichtigkeit von innovativen Herangehensweisen zur Früherkennung von Leitungsschäden und Wasserverlusten.

Die gängigen Methoden zur Leckagedetektion (turnusmäßiges Abschreiten mit akustischen Geräten, Online-Überwachung von hydraulisch begrenzten Teilnetzen) stoßen in komplexen Systemen oft an ihre Grenzen und sind zum Teil sehr zeit- und somit auch kostenaufwändig. Neue technologische Innovationen hinsichtlich Datenübertragung, Datenmanagement und Datenverarbeitung bieten neue Möglichkeiten in der Erfassung des Trinkwasserinfrastrukturzustandes. Immer mehr Wasserversorgungsunternehmen nutzen bereits fernwirktechnische Anlagen um neuralgische Bauwerke wie Trinkwasserbehälter, Pumpen und Brunnen zu überwachen und teilweise auch zu steuern. Der Einsatz von Messtechnik im Trinkwasserverteilnetz hat allerdings nach wie vor untergeordnete Bedeutung in der Praxis und ist vorwiegend Gegenstand der Forschung.

Das gegenständliche Forschungsprojekt beschäftigt sich somit mit dem Thema der Nutzung von Messungen im Trinkwasserverteilnetz und der modelltechnischen Verarbeitung der dabei gewonnenen Messinformation, mit dem Ziel Leckagen aufgrund deren hydraulischer Auswirkungen auf das Gesamtsystem einzugrenzen.

Die für die Projektziele wesentlichen Arbeitsschritte sind in Abbildung 1 grafische Projektstruktur dargestellt.

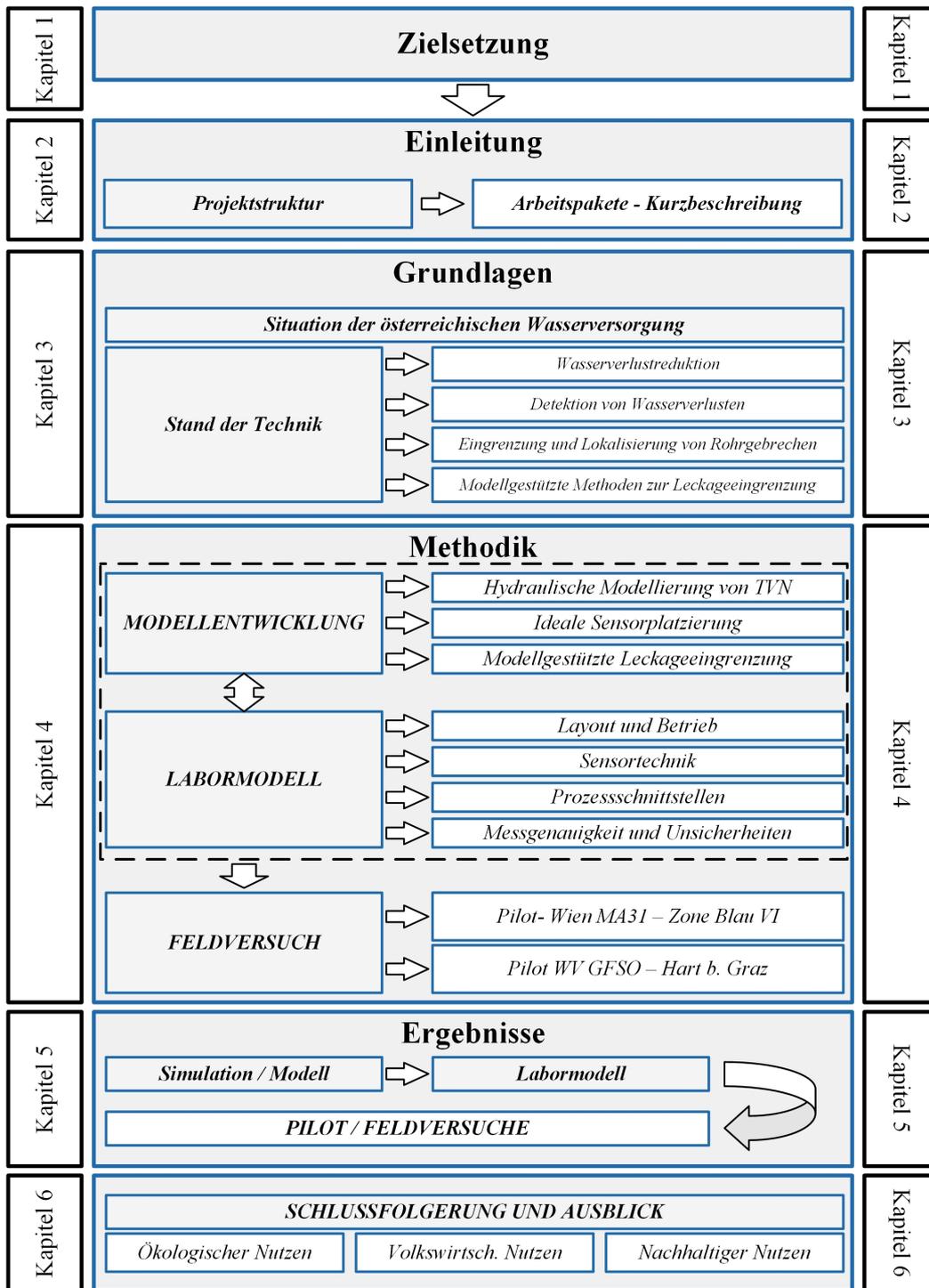


Abbildung 1: Grafische Projektstruktur

PROJEKTSTRUKTUR UND KURZBESCHREIBUNG DER ARBEITSPAKETE

2.1 ARBEITSPAKET 1 (AP1) – MANAGEMENT UND DISSEMINATION

Dieses Arbeitspaket beinhaltet organisatorische Belange im Hinblick auf Projektabwicklung, sowie getätigte Öffentlichkeitsarbeit in Form von Publikation in einschlägigen Fachzeitschriften als auch die Teilnahme an internationalen Konferenzen.

2.2 ARBEITSPAKET 2 (AP2) – GRUNDLAGEN

Dieses Arbeitspaket zeichnet ein kurzes Bild der Situation der Trinkwasserversorgung in Österreich und beinhaltet vor allem den Stand der Technik in den im Projekt gefragten Disziplinen.

Eine umfassende Literaturstudie bildet die Grundlage für die Modellentwicklung im gegenständlichen Projekt. Im Zuge des Forschungsberichtes wird immer wieder auf Weiterentwicklungen von bereits publizierten Methoden zur Leckageeingrenzung sowie Sensorplatzierungsmethoden verwiesen. Dieses Kapitel beschreibt eingehend den Stand der Technik in den Fachbereichen Wasserverlustreduktion, Wasserverlustdetektion- und Eingrenzung als auch Lokalisierung und gibt abschließend einen Überblick über Methoden zur modellgestützten Leckageeingrenzung in Trinkwasserverteilnetzen.

2.3 ARBEITSPAKET 3 (AP3) – ENTWICKLUNG MATHEMATISCHES MODELL

Die Entwicklung der im AZM Projekt verwendeten Modelle, Algorithmen und Programme wird in diesem Arbeitspaket behandelt. Angefangen von der hydraulischen Modellierung von TVN im Allgemeinen wird die Erweiterung dieser Methode auf die stochastische Modellierung behandelt, welche die Möglichkeit bietet, Unsicherheiten in die Modelle direkt einzubinden. Dies resultiert in erheblichen Zeitersparnissen bei der Berechnung von Sensitivitätsmatrizen bzw. bei der Propagation von Unsicherheiten im Netz.

Anschließend werden diverse ideale Sensorplatzierungsalgorithmen vorgestellt, die im Arbeitspaket 6 Feldversuch angewendet werden. Zusätzlich werden die Vor- und Nachteile der einzelnen Algorithmen näher beleuchtet. Darauf folgt ein Unterkapitel, welches sich mit der modellgestützten Leckageeingrenzung und den dahinterliegenden Algorithmen beschäftigt.

Danach wird auf OOPNET, ein von der TU-Graz entwickeltes Programm, eingegangen, das eine Schnittstelle zwischen der Open Source Software EPANET und der Programmiersprache Python liefert, gefolgt von der Beschreibung der Algorithmen und Programme zur automatisierten Datenverarbeitung, -validierung und -visualisierung. Dies ermöglicht eine benutzerfreundliche Verbindung zwischen dem hydraulischen Modell, den entwickelten Algorithmen und den Messdaten aus dem Feld.

2.4 ARBEITSPAKET 4 (AP4) – AUFBAU LABORMODELL

Dieses Kapitel beinhaltet die wesentlichen Schritte von der Planung und dem Aufbau bis hin zum funktionstüchtigen experimentellen Trinkwasserversorgungsnetz EWDS-TUG als Unterstützung der Entwicklung von Algorithmen zur Leckageeingrenzung.

Die Ausführungen beinhalten die theoretische Annäherung an ein skaliertes Wasserverteilnetz und in weiterer Folge die systematische Umsetzung der im Vorfeld getroffenen Idee bis hin zum fertiggestellten Labormodell. Die Beschreibung des Aufbaus vereint alle wesentlichen Schritte von der Auswahl der Materialien, Sensoren und Datenlogger bis hin zur Steuerung des Labormodells. Die Steuerung des

Labormodells zur Simulation des Wasserverbrauchs sowie von Leckagen stellt dabei ein zentrales Element dar.

Abschließend werden in diesem Kapitel detailliert die Möglichkeiten, welche das Labormodell bietet, dargelegt und die gewonnenen Daten aus Beispielerperimenten visuell aufbereitet.

2.5 ARBEITSPAKET 5 (AP5) – MODELLGESTÜTZTE LECKAGEEINGRENZUNG IM LABORMODELL

Der Zweck des Labormodells besteht darin, die Modellentwicklung laufend mit den im Labor gegebenen Optionen zu validieren und etwaige Problempunkte bereits im Vorfeld des Pilotversuches auszuräumen. Neben dem physischen Modell galt es ein hydraulisches Modell des experimentellen Trinkwasserverteilnetzes anzufertigen. Dieser Schritt stellte sich als sehr wesentlich heraus, da im Labormodell lediglich PE-Leitungen zum Einsatz kommen, welche naturgemäß eine sehr geringe Rohrrauigkeit aufweisen.

Zudem wurde in diesem Paket die Eignung der Sensoren geprüft und der Anspruch hinsichtlich Messgenauigkeit untersucht. Im Labormodell wurden bewusst handelsübliche Sensoren installiert, welche für das Lebensmittel Wasser zugelassen sind.

Nach der Fertigstellung des Labormodells wurden erste Versuche zur Leckageeingrenzung durchgeführt. Die erste Versuchsanordnung mit nur drei Drucksensoren, diente als Basis für die ersten Tests der Leckageeingrenzungsalgorithmen. Die ersten Ergebnisse zeigten, dass die entwickelte Methodik zum Eingrenzen der Leckage funktioniert.

Im Zuge des Projektes wurden laufend neue Sensoren angeschafft und Adaptierungen am EWDS-TUG vorgenommen.

Nach dem Ankauf weiterer Drucksensoren unterschiedlicher Genauigkeit und Messbereiche folgend auf den ersten Test der Leckageeingrenzungsalgorithmen, wurde eine optimale Sensorplatzierung für das Labormodell berechnet. Die angekauften Sensoren wurden an den berechneten Positionen installiert und folglich für die darauffolgenden Experimente und Tests herangezogen.

2.6 ARBEITSPAKET 6 (AP6) – FELDVERSUCH, ANWENDUNG DER METHODIK IM REALEN SYSTEM

Dieses Arbeitspaket beinhaltet die Umsetzung der entwickelten Methode zur optimalen Platzierung von hydraulischen Sensoren in Trinkwasserverteilnetzen als auch die Anwendung der entwickelten Methode zur Leckageeingrenzung an zwei realen Trinkwasserverteilnetzen.

Beide Pilotnetze unterscheiden sich hinsichtlich Komplexität deutlich voneinander. Das erste Pilotnetz ist ein Teilnetz des Wiener Trinkwasserversorgungssystems und besitzt eine Gesamtlänge von rund 40 km. Die zweite Pilotregion liegt im Osten von Graz in der Gemeinde Hart bei Graz, dieses Versorgungsnetz weist eine Länge von rund 15 km Länge auf. Diese Region zeichnet sich speziell durch große Unterschiede in den geodätischen Höhen aus, der maximale Höhenunterschied beträgt rund 100 m.

Beide Teilnetze trugen wesentlich dazu bei, die Umsetzung der entwickelten Methode auf Eignung in realen Systemen zu evaluieren. Durch die signifikanten Unterschiede konnten weitere wertvolle Erkenntnisse hinsichtlich der Umsetzbarkeit der vorgestellten Methode und etwaiger Schwierigkeiten in der Umsetzung gewonnen werden.

3 GRUNDLAGEN

DIESE KAPITEL BESCHÄFTIGT sich mit Grundlagen des Wasserverlustmanagements mit einem Schwerpunkt auf die Aktive Leckkontrolle. Es umfasst die Aufarbeitung der Situation der österreichischen Wasserversorgung in Bezug auf den Umgang mit dem Thema Wasserverluste aus Trinkwassernetzen. Es beschreibt den Stand der Technik im Themenbereich Wasserverlustmanagement mit einem Fokus auf die Aktive Leckkontrolle. Neben der modellgestützten Leckageeingrenzung werden die anerkannten Methoden der Wasserverlustreduktion, folgend den Ansätzen der International Water Association (IWA), beschrieben und diskutiert.

3.1 SITUATION DER ÖSTERREICHISCHEN WASSERVERSORGUNG

Österreich ist in der glücklichen Lage, Trinkwasser aus Grund- und Quellwasser meist in nativer Qualität und ausreichender Quantität nutzen zu können. Klimatische Extremsituationen, wie beispielsweise zwischen 2001 und 2003 oder zuletzt 2015, führten bei einigen österreichischen Wasserversorgung zu Problemen und teilweise auch zu Engpässen in der Versorgung. Diese Versorgungseingpässe wurden beispielsweise durch Beeinträchtigung der Qualität von Karstquellen infolge von Starkregenextremereignissen oder durch das Absinken von Grundwasserspiegeln aufgrund anhaltender Trockenperioden hervorgerufen.

In Anbetracht der auch in Österreich wahrzunehmenden Klimawandelfaktoren steht außer Acht, dass der schonende Umgang mit der Ressource Wasser auch im Hinblick auf die Nutzung in der Trinkwasserversorgung von zentraler Bedeutung ist. Ressourcenschonung in der Trinkwasserversorgung bedeutet, Wasserverluste aus den Trinkwasserversorgungsanlagen zu minimieren. Dadurch wird nicht nur die Menge an verlorenem Trinkwasser minimiert, sondern auch die für die Versorgung, inklusiver der Kosten der Aufbereitung, benötigte Energie und die damit verbundenen Kosten.

In Österreich stellen mehr als 5.500 Wasserversorgungsunternehmen (WVU) die Versorgung der Bevölkerung mit Trinkwasser in ausreichender Qualität und Quantität sicher. Die Anzahl von 5.500 WVU gliedert sich in 165 Wasserverbände, 1.900 kommunale Versorgungsunternehmen sowie rund 3.400 Genossenschaften (OEVGW Aktuell, 2016).

Insgesamt gilt es in Österreich eine Länge von rund 80.000 km an Trinkwasserleitungen (Transport- und Versorgungsleitungen) zu betreiben, instand zu halten und gegebenenfalls zu erneuern. Die Speicherung und Verteilung erfolgt über rund 2.900 Trinkwasserbehälter, 2.600 Quellfassungen sowie 1.000 Brunnen. Mit diesen Trinkwasserinfrastrukturanlagen werden rund 92 % der österreichischen Haushalte versorgt (Versorgungsstruktur: Infoportal Trinkwasser, 2016). Abbildung 2 b zeigt, dass dabei mehr als 50 % der Bevölkerung von großen Wasserversorgungsunternehmen versorgt werden. Mittlere und kleine WVU stellen die Versorgung der restlichen Bevölkerung, mit Ausnahme der Privatversorgungen, sicher.

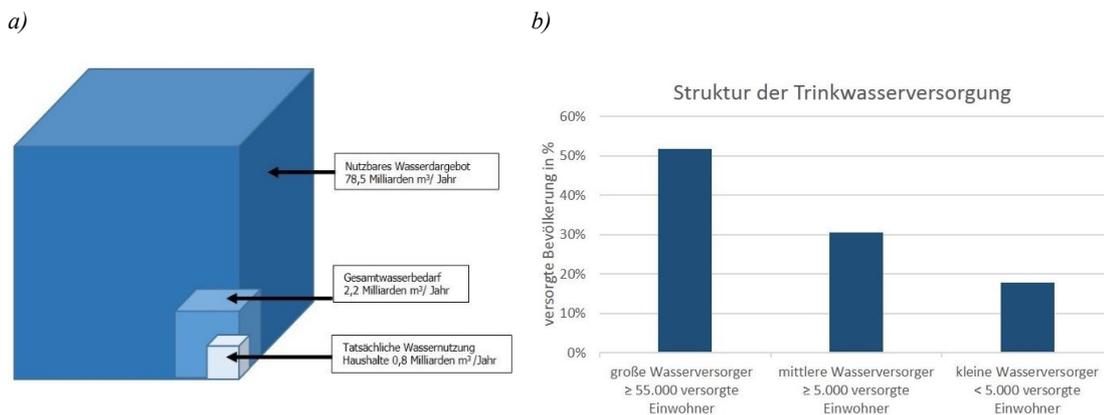


Abbildung 2: Wasserdargebot und Struktur der österreichischen Wasserversorgung (Versorgungsstruktur: Infoportal Trinkwasser, 2016)

Ermöglicht es die geographische Lage und Versorgungsstruktur erfolgt die Versorgung teilweise rein gravitativ aus Hochbehältern, welche wiederum von Quellen gespeist werden. Viele Versorger betreiben zur Trinkwasserversorgung neben Quellstuben auch Brunnen, aus denen Wasser mittels Pumpen gefördert wird. Zusätzlich erfordern topographische Randbedingungen bei manchen WVU auch ein Pumpen von Trinkwasser in Hochzonen. Der Energiebedarf eines WVU kann daher je nach Versorgungsstruktur beträchtlich sein. WVU in Österreich sind demnach am energieoptimierten Betrieb Ihrer Anlagen interessiert. Neben dem effizienten Betrieb der Pumpen stellt die Minimierung von Wasserverlusten eine wesentliche Aufgabe dazu dar.

Der Stromverbrauch von Wasserversorgungsunternehmen kann in Anlehnung an (Mayr et al., 2012) wie folgt zusammengefasst werden: Brunnen, Pumpwerke und Drucksteigerungsanlagen verbrauchen ca. 92 % der insgesamt aufgewendeten Energie in Wasserversorgungsunternehmen. Jeweils 3 % entfallen auf Aufbereitung und Desinfektion sowie sonstige Stromverbraucher. Lediglich 1 % des Energiebedarfes entfällt auf Speicherbauwerke (siehe Abbildung 3).

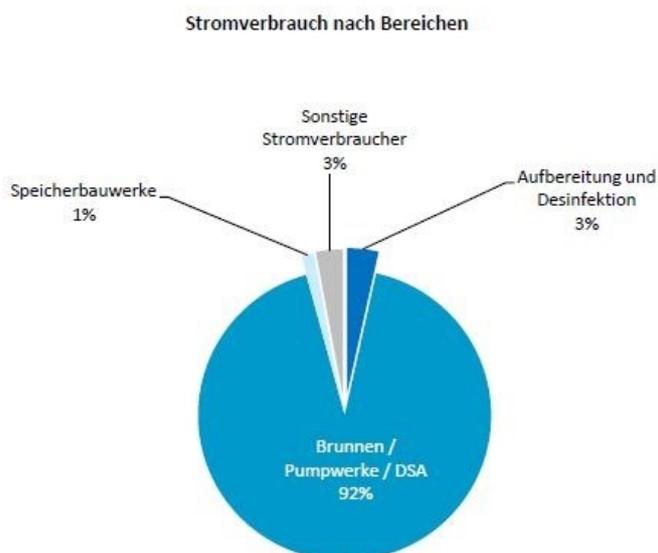


Abbildung 3: Stromverbrauch nach Bereichen (Mayr et al., 2012)

Die Wasserverluste, genauer die nicht in Rechnung gestellte Wassermenge (NRW), welche reale Wasserverluste und scheinbare Wasserverluste ebenso beinhaltet, wie auch gemessene und nichtgemessene nicht in Rechnung gestellte Wassermengen, wird in Anlehnung an (Neunteufel et al., 2016) in Österreich auf

rund 10 % der Systemeinspeisung beziffert. In kleinen Versorgungsstrukturen können Wasserverluste allerdings einen signifikanten Anteil der gesamten Systemeinspeisung ausmachen.

3.2 STAND DER TECHNIK IM WASSERVERLUSTMANAGEMENT

Der Prozess des Erkennens der Leckage bis hin zur Feststellung der Leckageposition und Reparatur des Lecks, aber auch die Auswahl geeigneter Methoden im Umgang mit Wasserverlusten, wird als Wasserverlustmanagement bezeichnet.

Die vier Grundkomponenten des Wasserverlustmanagements gemäß IWA (International Water Association – Water Loss Specialist Group), sind in Abbildung 4 dargestellt und beinhalten Druckmanagement, Geschwindigkeit und Qualität der Reparaturmaßnahmen, Instandhaltungs- und Erneuerungsmanagement und die Wasserverlustüberwachung und Leckortung, mit welcher sich das gegenständliche Forschungsprojekt vorwiegend auseinandersetzt. Die kleine weiße Box (UARL) betrifft die Komponente der unvermeidbaren Wasserverluste, welche auch in sehr gut erhaltenen Systemen nicht weiter reduzierbar sind. Diese resultieren aus spontanen Rohrbrüchen, Fremdbeschädigungen oder nicht detektierbaren Hintergrundverlusten. Die zentrale graue Box in der Mitte betrifft jenen Anteil der aktuellen jährlichen Wasserverluste (Current Annual Real Losses - CARL), der vermeidbar ist und durch die 4 Aufgaben des Wasserverlustmanagements reduziert werden kann.

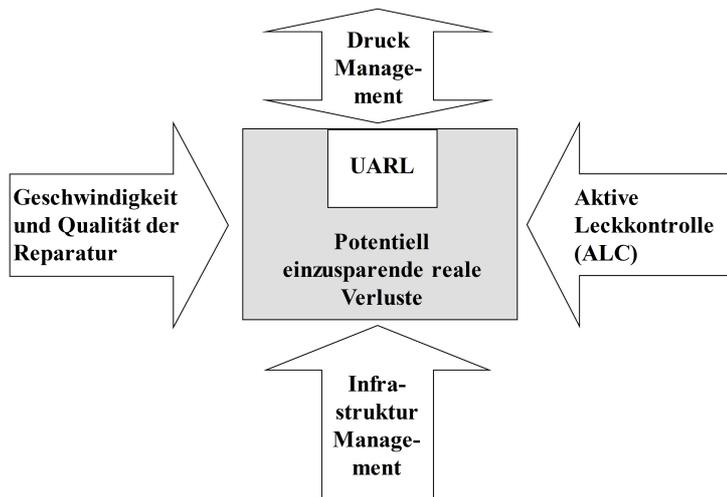


Abbildung 4: Die 4 Säulen einer erfolgreichen Wasserverlustmanagement Strategie (OEVGW Richtlinie W 63, 2009)

Neben praxisorientierter Literatur zum Thema Wasserverlustmanagement bietet die Österreichische Vereinigung des Gas- und Wasserfaches (ÖVGW) Richtlinien zum Umgang mit eben diesem Thema an. Die Richtlinie W63 bietet einen detaillierten Einblick in den Umgang mit Wasserverlusten in Trinkwassersystemen (OEVGW Richtlinie W 63, 2009). Zudem wird in (OEVGW Richtlinie W 105, 2011) die Verarbeitung und Erfassung von Schadensereignissen in Trinkwasserversorgungssystemen geregelt.

3.2.1 WASSERVERLUSTREDUKTION

Basis für eine effektive Reduktion der Wasserverluste in einem Versorgungssystem bildet die Wasserbilanz. Der Aufbau der Wasserbilanz sowie die standardisierten Begrifflichkeiten in der IWA Wasserbilanz sind in Abbildung 5 dargestellt.

System- einspeisung Q_{sys}	Wasser- abgabe	Entgeltliche Abgabe	Gemessener entgeltlicher Verbrauch	In Rechnung gestellte Wasser- menge
			Nicht gemessener entgeltlicher Verbrauch	
		Un- entgeltliche Abgabe	Gemessener unentgeltlicher Verbrauch	
			Nicht gemessener unentgeltlicher Verbrauch	
	Wasser- verluste Q_{VR}	Scheinbare Verluste	Zählerabweichungen und Fehler bei der Rechnungslegung	Nicht in Rechnung gestellte Wasser- menge Q_{NRW}
			Schleichverluste	
			Unzulässige Wasserentnahme	
		Reale Wasser- verluste	Zubringerleitungen	
			Behälter	
			Versorgungsleitungen	
Anschlussleitungen bis zum Wasserzähler				

Abbildung 5: IWA Wasserbilanz (OEVGW Richtlinie W 63, 2009)

Messungen an den Einspeisepunkten und eine möglichst genaue Zählerablesung am Endkunden bilden das Fundament einer jeden Wasserbilanz. Je genauer die einzelnen Komponenten erhoben werden können, desto aussagekräftiger ist die Wasserbilanz und damit die Quantifizierung der Wasserverluste.

Eine erfolgreiche Reduktion der Wasserverluste basiert auf einem ausgewogenen Zusammenspiel der vier in Abbildung 4 ersichtlichen Säulen. Je nach Versorgungsstruktur und Randbedingungen des Versorgungssystems ändert sich der Einfluss der einzelnen Strategien auf die Reduktion der Gesamtverluste.

Eine der Aufgaben der WVU besteht im Setzen von kurzfristigen sowie langfristigen Instandhaltungsmaßnahmen zur möglichst störungsfreien Versorgung der Bevölkerung mit Trinkwasser in ausreichender Qualität und Quantität sowie mit ausreichendem Druck. Diese Maßnahmen sind in der Säule Infrastrukturmanagement zusammengefasst. Je nach Versorgungssystem und Information über systemspezifische Daten gilt es eine geeignete Strategie für die Instandhaltung der Trinkwasserinfrastruktur zu treffen. Die Strategien reichen von Ausfalls- oder ereignisorientierter Strategie über vorbeugende intervallorientierte Strategie der Instandhaltung bis zu vorbeugender, zustandsorientierter Strategie für die Instandhaltung bzw. Inspektion, wobei eine zustandsorientierte Instandhaltungsstrategie anzustreben ist (OEVGW Richtlinie W 100, 2007).

Die Eingriffszeit vom Erkennen einer Leckage bis zur Reparatur und die qualitativ hochwertige Ausführung dieser tragen ebenfalls zur Reduktion von Wasserverlusten bei, ebenso die Implementierung eines Druckmanagementsystems. Ziel des Druckmanagements ist es, Drücke zu verbrauchsarmen Zeiten zu reduzieren, um in weiterer Folge Wasserverluste gering zu halten. Die erfolgreiche Implementierung eines Druckmanagements hängt vom Alter des Systems, den verwendeten Materialien und der Verbindungstechnik wie auch vom Untergrund ab. In österreichischen WVU findet Druckmanagement nur sehr vereinzelt statt. Eine Art den Versorgungsdruck den Randbedingungen eines TVN anzupassen geschieht allerdings schon während der Planung durch gezielte Druckzonenbildung. Wenn aufgrund der Netztopologie die Notwendigkeit besteht unterschiedliche Druckzonen einzurichten, sind die WVU bestrebt in den einzelnen Zonen keine unnötig hohen Drücke bereitzustellen. Im Vordergrund der Druckzonenbildung steht

jedoch in den meisten Fällen nicht die Reduktion der Wasserverluste. Zudem kann die Reduzierung von Drücken in TVN dazu führen, dass Rohrbrüche aufgrund der geringen Drücke nicht mehr als austretendes Wasser an die Oberfläche gelangen, sondern lange unentdeckt bleiben und damit ggf. sehr lange Lecklaufzeiten nach sich ziehen.

Die laufende Überwachung der Wasserverluste und die Leckortung stellen einen zentralen Aufgabenbereich zur Wasserverlustreduktion dar. Die Aufgaben der aktiven Rohrbruchsuche umfassen dabei nicht nur die Ortung und Eingrenzung von Leckagen, z.B. mit akustischen Leckortungsgeräten, sondern auch die laufende Überwachung der System- oder Zoneneinspeisung, um auf das Vorhandensein von Leckagen im System schließen zu können (Leckagedetektion).

Die Methoden zur Wasserverlustdetektion unterscheiden sich hinsichtlich des Einsatzbereiches bzw. des Ortes der Detektion. Die Detektion von Wasserverlusten an Haupt- und Zubringerleitungen unterscheidet sich signifikant von Methoden zur Auffindung von Undichtigkeiten an Versorgungsleitungen. Ab einem gewissen Durchmesser in Verbindung mit verhältnismäßig niedrigem Versorgungsdruck kommen auf Zubringerleitungen teilweise auch Inneninspektionsmethoden (Invasive Methoden) zum Einsatz, welche in Versorgungsleitungen nicht dem Stand der Technik entsprechen.

Welche Methoden in Abhängigkeit des Versorgungsdruckes sowie Funktion der Leitung in Frage kommen, fassen (Hamilton & Charalambous, 2013) zusammen. Je nach Versorgungsstruktur, Durchmesser, Material und Betriebsdruck haben sich unterschiedliche Methoden als zur Detektion und Lokalisierung von Wasserverlusten geeignet herausgestellt (Abbildung 6).

Diameter	mm	75	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800	900	1000+
	inches	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	28	32	36	40+
Material																
Metallic all	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,C,D	A,C,D	A,C,D	C,D,E	C,D,E	C,D	C,D	D,E	D,E	D,E
	D,F,G	D,F,G	D,F,G	D,F,G	D,F,G	D,F,G	E,F,G	E,F,G	E,F,G	F,G	F,G	E	E			
Concrete all	A,C	A,C	A,C	A,D	A,D	A,D,E	A,D,E	A,D,E	E	E	E	E	E	E	E	E
	D,F,G	D,F,G	D,F,G													
Asbestos Cement	A,C	A,C	A,C	A,C	A,C	A,D	A,D	A,D	E	E	E	E	E	E	E	E
	D,F,G	D,F,G	D,F,G	D	D	E	E	E								
GRP	A,C	A,C	A,C	A,C	A,C	A,D	A,D	A,D	E	E	E	E	E	E	E	E
	D,F,G	D,F,G	D,F,G	D	D	E	E	E								
PVC	A,C	A,C	A,C	A,D	A,D	A,D	A,D	A,D	E	E	E	E	E	E	E	E
	D,F,G	D,F,G	D,F,G			E	E	E								
Polyethylene all	A,C	A,C	A,C	A,D	A,D	A,D	A,D	A,D	E	E	E	E	E	E	E	E
	D,F,G	D,F,G	D,F,G			E	E	E								

Method A Gas Injection
 Method B Traditional Techniques with Manual Listening Stick
 Method C Non-Intrusive Acoustic Techniques that is, Standard Correlator, Correlating Noise Loggers (Accelerometers)
 Method D Intrusive Acoustic Techniques that is, Standard Correlator or Correlating Noise Loggers (Hydrophones)
 Method E Inline Inspection Techniques (Tethered and Free-swimming)
 Method F Noise Loggers (Non-Correlating), Non-Intrusive Magnetic Connection
 Method G Electronic Amplified Listening Ground Microphone

Abbildung 6: Empfohlene Methoden zur Leckage Detektion und Lokalisierung (Hamilton & Charalambous, 2013)

Die Detektion und Lokalisierung von Wasserverlusten stellt eine Kernaufgabe in Wasserversorgungsunternehmen dar. Das rasche Erkennen von Leckagen verringert nicht nur die Laufzeit des Rohrbruches und spart Wasser, vielmehr können auch Schäden an angrenzenden Infrastrukturen, beispielsweise durch Auswaschungen im Straßenuntergrund, verhindert werden. Basierend auf dem „Burst and Background Estimates Concept“ (BABE- Konzept) können reale Wasserverluste bzw. Leckagen in drei Kategorien eingeteilt werden, die in nachstehender Abbildung 7 ersichtlich sind (Lambert, 1994).

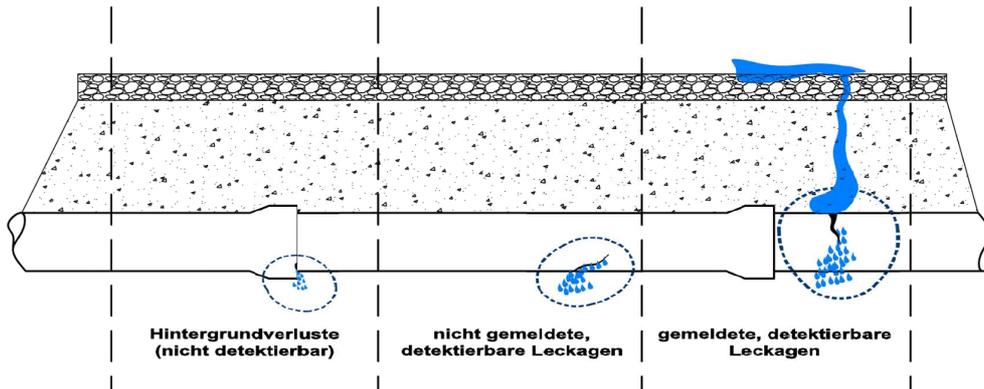


Abbildung 7: Kategorien von Leckagen in Anlehnung an das BABE-Konzept (adaptiert von (Thornton et al., 2008))

Gemeldete detektierbare Leckagen weisen in der Regel einen sehr großen Leckagefluß auf, haben jedoch kurze Laufzeiten, bis die Leckagen von Kunden bzw. der Bevölkerung dem Wasserversorger gemeldet werden. Nicht gemeldete aber detektierbare Leckagen sind jene, die zum Teil beträchtliche Lecklaufzeiten aufweisen. Bei moderatem Ausfluss durch die Leckage ist die Gesamtmenge über die Laufzeit der Leckage gesehen meist sehr hoch. Diese Leckagen werden nach Stand der Technik mittels Methoden der aktiven oder passiven Leckkontrolle detektiert und lokalisiert. Eine proaktive Leckkontrolle durch Überwachung von Einspeisemengen in zuvor definierte hydraulisch begrenzte Messzonen kann die Laufzeiten dieser Leckagen geringhalten, ist aber kosten- und personalintensiv. Hintergrundverluste treten meist an Verbindungsbauteilen auf und besitzen eine geringe, nicht detektierbare Wassermenge. Diese Art von Verlusten kann durch die Regelung des Versorgungsdruckes minimiert werden.

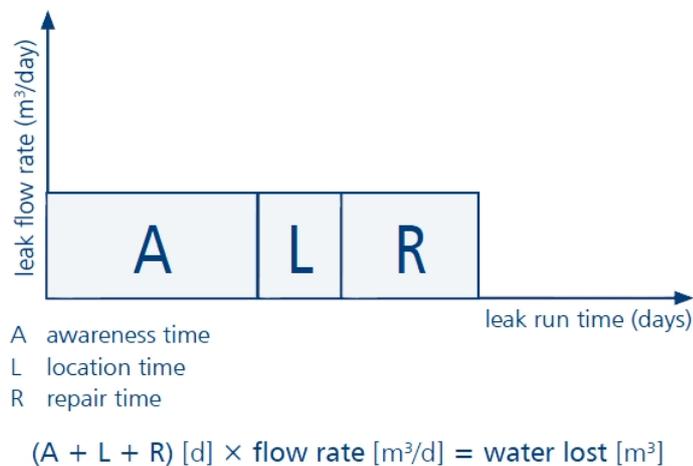


Abbildung 8: Einfluss der Lecklaufzeit (Frauendorfer & Liemberger, 2010)

Der funktionelle Zusammenhang zwischen Lecklaufzeit detektierbarer aber nicht an die Oberfläche tretender Leckagen und der austretenden Wassermenge zeigt deutlich das Potential und den Nutzen von Methoden zur frühzeitigen Erkennung und Eingrenzung von Leckagen. Die Zeit zwischen dem Erkennen eines Lecks noch ohne den genauen Ort zu kennen, bis zum Auffinden des Lecks, kann durch proaktive Leckkontrolle signifikant verkürzt werden. Zudem besteht in der Verkürzung der sogenannten „awareness time“ (Zeitdauer die verstreicht bis das WVU erkennt, dass ein Leck im System existiert) großes Potential Wasserverluste zu senken. Durch die laufende Überwachung des Systems mit Durchfluss und Drucksensoren kann diese Zeit stark reduziert werden.

Ziel des gegenständlichen Forschungsprojekts ist die Reduktion der Laufzeit von Leckagen. Die modellgestützte Leckageeingrenzung kann hierbei die Eingriffszeit zwischen Detektion und Lokalisierung sowie Punktortung einer Leckage effektiv verkürzen. Die Leckortungstrupps können dadurch in einen Teilbereich des Netzes von nur wenigen hundert Metern entsandt werden, um die potentielle Leckage punktgenau zu orten und die Reparatur des Schadens einzuleiten.

Die Methoden am Stand der Technik können nicht strikt in Methoden zur Detektion und Methoden zur Lokalisierung getrennt werden, vielmehr geht die Detektion je nach eingesetzter Technologie bereits mit einer Lokalisierung einher. Ausgewählte Methoden werden nachfolgend kurz angeführt. Am Ende des Kapitels ist eine vollständige Zusammenfassung der gängigsten Methoden in Anlehnung an (OEVGW Richtlinie W 63, 2009) angeführt.

3.2.1 TURNUSMÄSSIGE NETZABSCHREITUNG (PASSIVE LECKKONTROLLE)

Das turnusmäßige Abschreiten des Versorgungsnetzes unterstützt das Auffinden nicht gemeldeter aber detektierbaren Leckagen. Die Prüfung der Armaturen im Versorgungssystem auf Leichtgängigkeit, Prüfung der Hydranten auf Dichtheit und die visuelle Prüfung der Geländeoberfläche gehört unter anderem zu den in regelmäßigen Abständen durchzuführenden Aufgaben. Die Turnusmäßige Überwachung des Versorgungssystems und die empfohlenen Abstände für die genannten Tätigkeiten sind in der OEVGW Richtlinie W59 (OEVGW Richtlinie W 59, 2014) bzw. ÖNORM B 2539 (OENorm B 2539, 2014) im Detail ersichtlich.

3.2.2 NACHTMINIMUMDURCHFLUSS-ÜBERWACHUNG

Die weitverbreitetste Methode Wasserverluste in einem Versorgungssystem zu erkennen bzw. zu detektieren, ist unter dem Begriff Nachtmindestverbrauchsmessung bekannt. Wie dieser Begriff schon impliziert, werden die Einspeisemengen in den Nachstunden (zwischen 1 Uhr und 4 Uhr, in manchen Versorgungszonen durchaus unterschiedlich) laufend überwacht und analysiert. Die Systemeinspeisung in eine abgegrenzte Versorgungszone (district metered area – DMA) kann empirischen Verbrauchswerten gegenübergestellt werden. In Österreich werden gemäß (OEVGW Richtlinie W 63, 2009) Einspeisemengen von ca. 0.4 m³/h bis 0.8 m³/h je 1.000 Einwohner als Grenzwert definiert. Diese Grenzwerte gelten allerdings für Versorgungsstrukturen bzw. Teilnetze in der Größe von rund 2.000 bis 40.000 Einwohnern.

Ein Anstieg im Nachtminimum muss nicht in allen Fällen mit einem aufgetretenen Leck zusammenhängen, sondern könnte auch aus außergewöhnlichem Verbrauch – z.B.: Poolfüllungen bzw. Veranstaltungen etc. – resultieren. Wie bereits erwähnt unterliegen die Systemeinspeisemengen täglichen, wöchentlichen wie auch monatlichen und jährlichen Schwankungen.

Die kontinuierliche Überwachung der Systemeinspeisemengen stellt jedoch eine einfache und effektive Methode dar, Ereignisse bzw. Veränderungen des Verbrauchsverhaltens infolge auftretender Rohrgebrechen festzustellen. Die Nachtmindestverbrauchsmessung zählt technisch gesehen zu den turnusmäßigen Tätigkeiten. Die Überwachung kann dabei in unterschiedlicher Form erfolgen. Das Vorhandensein entsprechender Fernwirktechnik im WVU erleichtert die kontinuierliche Überwachung. Ist keine Fernwirktechnik oder Ähnliches vorhanden, muss die Nachteinspeisemenge in regelmäßigen Abständen, vorzugsweise immer zur selben Zeit der Nachstunden, manuell erhoben werden. Die manuelle Erhebung der Durchflüsse stellt in diesem Fall einen nicht zu unterschätzenden Personal- und damit auch Kostenaufwand dar. Eine laufende Überwachung der Systemeinspeisemengen ist daher grundsätzlich zu empfehlen.

3.2.3 LAUFENDE ÜBERWACHUNG VON DRUCK UND DURCHFLUSS

Das kontinuierliche Erfassen hydraulischer Parameter im Versorgungssystem sowie die Speicherung und Aufbereitung der Daten stellt die Grundlage für die laufende Überwachung dar. Die erfassten Messwerte aus Druck und Durchfluss an neuralgischen Punkten im System (DMA oder bei kleineren Versorgern am Einspeisepunkt und ausgewählten Positionen im Netz) lassen Rückschlüsse auf etwaige Ereignisse im System zu.

Eine permanente Überwachung kann je nach Versorgungsstruktur in unterschiedlicher Art und Weise erfolgen. Die Herstellung abgegrenzter Messzonen bietet den Vorteil den Durchfluss in eine Zone bzw. den Druck am Übergabepunkt in die Zone zu überwachen, jedoch geht aufgrund der Trennung der Zone von den angrenzenden Versorgungsstrukturen die Versorgungssicherheit bzw. Redundanz in der Versorgung verloren. Die Auftrennung des vermaschten Versorgungssystems in einzelne abgegrenzte Bereiche muss daher im Vorfeld gründlich auf Machbarkeit geprüft werden.

Neben der physischen Trennung einzelner Zonen und dem damit einhergehenden Verlust an Redundanz stellen virtuelle Versorgungszonen eine Alternative dar. Hierbei werden die Versorgungszonen nicht physisch voneinander getrennt, sondern es erfolgt ein Einbau von Sensoren an Leitungsabschnitten, die es erlauben auf das Auftreten von Leckagen in nachfolgenden Netzbereichen schließen lassen. Das Einführen virtueller Zonen erfordert mehr technischen Aufwand hinsichtlich Sensorinstallation, Datenübertragung und Verwaltung der entstehenden Daten.

3.2.4 LECKAGEEINGRENZUNG UND LOKALISIERUNG

In diesem Kapitel werden die gängigen am Stand der Technik befindlichen Methoden zur Leckageeingrenzung und Lokalisierung eingeführt. Grundsätzlich kann bei den Methoden eine Unterscheidung zwischen Eingrenzung bzw. Lokalisierung und Punktortung getroffen werden. Die Genauigkeit der Leckagelokalisierung steht in engem Zusammenhang mit einer großen Anzahl an Faktoren wie Leitungsmaterial, Grad der Vermaschung oder Versorgungsdrücke. Einige Methoden erlauben eine entsprechende Eingrenzung der Rohrgebrehen, wohingegen andere in der Lage sind den exakten Ort des Rohrgebrehens zu lokalisieren.

3.2.4.1 GERÄUSCHLOGGER

Das Ausbringen von Geräuschloggern in Teilen des Versorgungsnetzes findet vor allem in Netzen mit überwiegendem Anteil an metallischen Leitungen Anwendung. Je nach Strategie des WVU können Geräuschlogger temporär oder fest installiert zur zonalen Überwachung herangezogen werden. Für gewöhnlich werden Geräuschlogger an verfügbaren Schieberelementen (in Schieberkappen am Schiebergestänge mittels Magneten) angebracht.

Die Geräuschlogger werden zum Aufzeichnen der Geräusche in den Nachstunden, in denen auch die Hintergrundgeräusche durch Verkehrslärm geringer sind, programmiert. Die Auswertung der aufgezeichneten Daten erfolgt mit den vom Hersteller gelieferten Softwarelösungen. Geräuschlogger bieten eine Möglichkeit Zonen im Versorgungssystem auf potentielle Schadstellen zu überprüfen und sind demnach den Methoden der aktiven Leckkontrolle zuzuordnen. Rohrgebrehen können mit dieser Technologie auf einen kleinen Teil eingegrenzt werden, allerdings muss die Punktortung der Leckage mit akustischen Methoden erfolgen.



Abbildung 9: Geräuschlogger und Funktionsprinzip (Quelle: www.sebakmt.com)

Bei den Geräuschloggern wird zwischen korrelierenden und nicht korrelierenden Loggern unterschieden. Heutzutage sind die meisten Geräuschlogger-Systeme bereits netzwerkfähig und ermöglichen aufgrund der Korrelation zwischen den installierten Sensoren die Eingrenzung auf den wahrscheinlichsten Ort der Leckage. Diese Systeme stellen demnach eine geeignete Technologie zur Vorortung von Leckagen dar. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass die Anzahl und Dichte der Geräuschlogger stark von den im Netz vorherrschenden Rohrmaterialien abhängt. Die permanente Überwachung von Zonen mit Geräuschloggern erfordert demnach eine große Anzahl an Sensoren. An nichtmetallischen Materialien ist diese Technologie nur eingeschränkt einsetzbar.

3.2.4.2 STUFENTEST (STEPTESTING)

Das sogenannte Steptesting, auch Stufentest genannt, ist eine effektive aber personalaufwendige Methode um Rohrbrüche auf einen kleinen Teilbereich eines Versorgungsnetzes einzugrenzen. Hierbei werden systematisch kleinere Zonen durch das Schließen von Streckenschiebern von der Versorgung getrennt. Verringert sich der Durchfluss durch das Wegschiebern einer Zone, kann darauf geschlossen werden, dass sich die Leckage in diesem Bereich befindet.

Ein wesentlicher Vorteil dieser Methode besteht darin, dass keine großen technischen Hilfsmittel benötigt werden, eine Durchflussmessung am Einspeisepunkt reicht für die Eingrenzung meist aus. Der Einsatz neuer Messtechnik in Verbindung mit einer permanenten Datenübertragung (z.B.: webbasierter Zugriff) erleichtert und beschleunigt die Arbeit beträchtlich.

Ob die Methode Stufentest als Werkzeug zur Eingrenzung bzw. Detektion von Rohrgebrechen auch geeignet ist, hängt stark von der Struktur des Netzes ab. Zum einen kann die Netztopologie ein Grund dafür sein, dass diese Methode nicht zum Erfolg führt. Betriebliche Aspekte wie beispielsweise der hohe Personalaufwand, als auch die Arbeit in den Nachstunden sind als Nachteile der Methode zu werten. Das Eingrenzen der Leckagen mit der Methode Stufentest wird in österreichischen WVU flächendeckend angewandt.

Durch das systematische Abschiebern einzelner Teilbereiche kann es zu Fließrichtungsänderungen und damit zu Ablösungen von Inkrustationen kommen, was gegebenenfalls zu Einbußen der Trinkwasserqualität und Verfärbungen des Trinkwassers führen kann. In jedem Fall ist auf eine sorgfältige Arbeitsweise beim Öffnen und Schließen von Armaturen zu achten, um auch ungewollten Druckstößen und damit einhergehenden plötzlichen Schäden an bereits geschwächten Rohrabschnitten vorzubeugen.

3.2.4.3 KORRELATOREN

Mit Korrelatoren erfolgt nach erfolgreicher Vorortung der Leckage die Eingrenzung bzw. die Punktortung am Leitungsabschnitt. An einem Leitungsabschnitt wird der Sender und Empfänger an benachbarten Schieberkappen am Schiebergestänge angebracht. Im Vorfeld muss die Distanz zwischen den beiden Korrelatoren vermessen werden. Unter der Voraussetzung, dass das Rohr einen konstanten Innendurchmesser und das selbe Material besitzt, kann aufgrund der Laufzeitdifferenz des Signals vom Sender zum Empfänger und der Änderung des Signals aufgrund der Leckage, auf die exakte Lage geschlossen werden. Abbildung 10 zeigt das Funktionsprinzip von Korrelatoren.

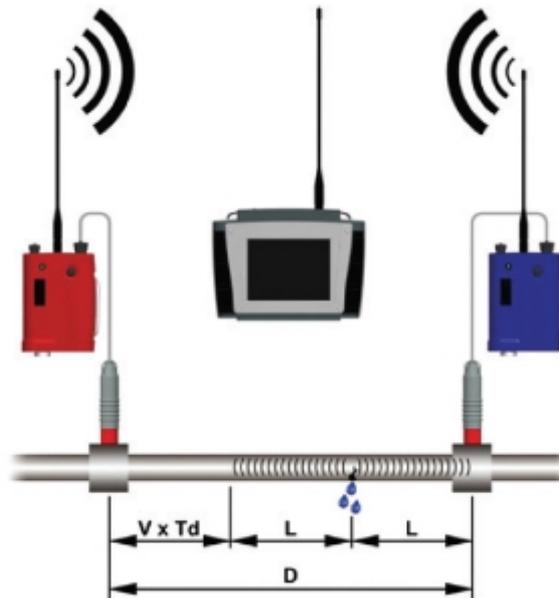


Abbildung 10: Funktionsprinzip Korrelatoren (Hamilton & McKenzie, 2014)

3.2.4.4 BODENMIKROFON

Bodenmikrofone nutzen ebenfalls das akustische Signal des durch eine Leckage austretenden Wassers. Abhängig vom Material und dem Versorgungsdruck breitet sich das Leckagegeräusch entlang des Mediums aus. Das Signal breitet sich zum einen in Rohrlängsachse aus und variiert von Material zu Material, wobei bei metallischen Leitungen die Ausbreitung über deutlich größere Distanzen erfolgt bzw. das Leckgeräusch auch in entsprechendem Abstand von der Leckage im Gegensatz zu nichtmetallischen Leitungen noch gemessen werden kann.



Abbildung 11: Bodenmikrofon mit diversen Adaptern für unterschiedliche Untergründe (Quelle: www.sewerin.com)

Neben der Ausbreitung des Schalls in Rohrlängsachse erfolgt auch eine Übertragung der Schwingungen orthogonal zur Rohrachse und wird durch das angrenzende Bodenmaterial weitergeleitet.

Um das Ergebnis der Leckage-Geräusch-Korrelation zu überprüfen werden meist Bodenmikrofone eingesetzt. Durch die elektronische Unterstützung bzw. Verstärkung der Signale kann geschultes Personal auch kleinere Leckagen, wie sie beispielsweise an Hausanschlüssen oder Rohrverbindungen auftreten, erkennen.

3.2.4.5 SPÜRGAS

Diese Methode, Rohrbrüche zu lokalisieren wird vor allem, aber nicht nur, bei nichtmetallischen Leitungsmaterialien verwendet. Aufgrund der Tatsache, dass nichtmetallische Rohre den Schall, welcher durch den Ausfluss aus einem Leck entsteht, nicht ausreichend gut weiterleiten, kann mit Korrelatoren in den meisten Fällen nicht gearbeitet werden. Diese Methode kann zudem gut in unbefestigten Gelände, wenn die Lage der Leitung nicht exakt bekannt ist, oder die Schieberabstände sehr groß sind, gut angewandt werden.

Beim Suchen eines Rohrbruches mittels Spürgas, wird am nächstmöglichen Zugangspunkt zum System gesundheitlich unbedenkliches Gas (in den meisten Fällen Helium oder Wasserstoff) in die Leitung eingebracht und die Leitungstrasse mit einem Gasspürgerät abgeschnitten. Die Methode kommt für Nenndurchmesser von DN 75 mm bis ca. DN 1.000 mm in Frage. Aufgrund der großen Menge an Spürgas, das für Durchmesser > 1.000 mm benötigt würde, wird Spürgas für größere Nennweiten kaum mehr angewandt. Wird Spürgas zur Leckagelokalisierung herangezogen, muss die Fließrichtung des Wassers in der untersuchenden Leitung bekannt sein. Zudem ist es gegebenenfalls notwendig, angrenzende Versorgungsleitungen durch das Schließen von Schiebern vom zu untersuchenden Leitungsabschnitt zu trennen, um Dissipation des Gases in diese Abschnitte zu verhindern.

Abschließend werden in Tabelle 1 die gängigsten Methoden zur Leckagevorortung und Punktortung zusammenfassend dargestellt.

TABELLE 1: ZUSAMMENFASSUNG VON METHODEN ZUR LECKAGEEINGRENZUNG UND ORTUNG (OEVGW RICHTLINIE W 63, 2009)

Einsatz	Art	Methode	Beschreibung der Methode und Einsatzbereich	
Vor-Ortung Eingrenzung	nicht-akustisch	Visuelle Prüfung	Sichtkontrollen auf direkte und indirekte Auswirkungen von austretendem Wasser.	
		Nachtmindestverbrauchs-messung	Bei der Nachtmindestverbrauchsmessung werden die in einen Kontrollbezirk eingespeisten Mengen gemessen und mit Verbrauchs-Erfahrungswerten (0,4 m ³ /h bis 0,8 m ³ /h je 1000 versorgte Einwohner) verglichen. Ist der gemessene Nachtmindestverbrauch höher, kann ein Wasserverlust vermutet werden.	
		Nullverbrauchs-messung	Die Nullverbrauchsmessung erfordert kleine Messbereiche und geht davon aus, dass innerhalb eines kurzen Messzeitraumes von den Abnehmern kein Wasser entnommen wird. Stellt sich im Beobachtungszeitraum kein Nullverbrauch ein, ist der Restverbrauch zu analysieren und sind gegebenenfalls Maßnahmen zu setzen.	
		Stufentest	Kurzzeitiges, stufenweises Wegschiebern einzelner Netzbereiche mit gleichzeitiger Überwachung der Einspeisemengen. Eine Verringerung der Einspeisemenge nach Schließen eines gewissen Absperrorganes weist auf eine Leckage im abgeschieberten Bereich hin.	
	akustisch	Horchdose	Eine Art Stethoskop wird an Armaturen (Absperrorgane, Hydranten) gehalten - das Leckgeräusch wird von der Armatur zum Ohr übertragen.	
		Elektronischer Taststab	Ein Taststab wird an Armaturen (Absperrorgane, Hydranten) gehalten, das Leckgeräusch wird von der Armatur zum Mikrophon übertragen.	
		Permanente Geräuschlogger	Geräuschlogger werden mit starken Magneten an Armaturen fixiert und sind auf das Detektieren typischer Leckgeräusche programmiert.	Einsatz in Bereichen, die mit anderen Methoden schwer zu inspizieren sind (Stadtzentren, Straßen mit viel Verkehr).
Temporäre Geräuschlogger			Einsatz bei kurzen Leckortungskampagnen durch kurzzeitige Situierung in einzelnen Netzbereichen.	
kombinierte Verfahren	Kombinierte Multi-Parameter-Messungen	Mittels kombinierter Messung von Durchfluss und/oder Druck und/oder Geräusch an mehreren permanenten Messstellen im Rohrnetz kann der Bereich der Leckage eingegrenzt werden. Eine Kombination mit Stufentests kann sinnvoll sein.		
Lokalisieren Punktortung	akustisch	Bodenmikrophon	direkte Sondierung: Fixierung an einer Armatur indirekte Sondierung: Einsatz am Boden - direkt über der Leitung. Das Leckgeräusch wird vom Mikrophon detektiert.	
		Leckgeräusch-Korrelator (Körperschallmikrophon)	Ist weit verbreitet (v.a. bei metallischen Leitungen). Über 2 Sensoren an 2 unterschiedlichen Orten (z.B. 2 Schieber) wird das Leckgeräusch aufgenommen. Durch Kenntnis von Leitungsmaterial und -durchmesser kombiniert mit der Zeitdifferenz des Eintreffens des Leckgeräusches an den beiden Sensoren wird die Position der Leckage berechnet.	

Einsatz	Art	Methode	Beschreibung der Methode und Einsatzbereich
		Leckgeräusch-Korrelator (Hydrophon)	Verfahren wie oben, allerdings werden die Geräuschsignale direkt im Wasser gemessen (über Hydrophone an Hydranten). Der Vorteil besteht darin, dass die Schallausbreitung im Wasser deutlich höher ist als über die Leitungswand und daher Leckagen besser detektiert werden können (auch an Kunststoffleitungen).
		Interner Geräusch-detektor	Ein Geräuschdetektor wird direkt in die Leitung eingebracht. Der Wasserdurchsatz transportiert den Detektor - auch kleinste Leckagen können lokalisiert werden.
	nicht-akustisch	Gasprüf-verfahren	Wird angewandt, wenn akustische Methoden nicht zum Erfolg führen. Üblicherweise wird industrieller Wasserstoff (ca. 95% Stickstoff und 5% Wasserstoff) in die Leitung gefüllt und das entweichende Gas an der Geländeoberfläche detektiert.
		Intelligente Molche	Die Prüfeinrichtung (Molch) detektiert in der Leitung mittels Ultraschallmessungen die Wandstärke, Korrosionserscheinungen, Deformationen und Risse. Wird nur in Transportleitungen (ohne Armaturen) angewandt.

In Anbetracht der großen Anzahl an unterschiedlichen Methoden und der ständigen Weiterentwicklung der technischen Hilfsmittel zur Leckagedetektion und Eingrenzung gilt es seitens der Versorger, die geeignetste Methode für die Gegebenheiten im Versorgungssystem zu finden. In den meisten Fällen kommt eine Kombination der genannten Technologien zum Einsatz. Die Eignung hängt dabei stark mit den technischen Voraussetzungen und dem Ausbildungsstand des Personals zusammen.

Die Punktortung wird auch in Zukunft nicht entfallen können, jedoch kann die Zeit zwischen Erkennen einer Leckage und der Punktortung und darauffolgenden Reparatur mit modernen Technologien zur Netzüberwachung signifikant verkürzt werden. Gut ausgebildetes Personal bildet die Basis für ein erfolgreiches Wasserverlustmanagement.

Die Auswahl der geeignetsten Methode(n) muss individuell auf die Rahmenbedingungen des Versorgungssystems abgestimmt werden.

3.3 STAND DER WISSENSCHAFT LECKAGEDETEKTION UND LOKALISIERUNG

3.3.1 MODELLGESTÜTZTE METHODEN ZUR LECKAGELOKALISIERUNG

Eine weitere Methode Leckagen zu finden, stellt die modellgestützte Leckageeingrenzung dar. Hierzu werden Messungen im Feld mit hydraulischen Rechenetzmodellen – z.B. EPANET (Rossman, 2000) – zu einem sogenannten „Inversen Problem“ kombiniert und die Leckageeingrenzung als Optimierungsproblem formuliert. Durch Lösung des Optimierungsproblems kann auf die Position der Leckage rückgeschlossen werden. Es sei hier angemerkt, dass diese Methoden immer nur einen ungefähren Bereich und nicht die exakte Position des Lecks liefern, weswegen immer „Pinpointing“-Methoden (Horchdosen, Leck-Geräusch Korrelatoren, Einsetzen von Spürgas, etc.) folgen müssen, damit nicht an einer falschen Stelle aufgegraben wird, weil dort ein Leck vermutet wird. Dennoch haben sie den entscheidenden Vorteil, dass durch Verwendung von modellgestützten Methoden:

1. Die Eingriffszeit deutlich reduziert wird, da sie die Detektion von Fehlern aufgrund von abnormalem hydraulischen Verhalten des Systems ermöglichen

2. Obwohl nur eine ungefähre Position mit diesen Methoden geliefert wird, sich der Bereich, in dem man aufwendiger Weise das Leck exakt lokalisieren muss, deutlich reduziert, was Personal- und Zeitressourcen spart.

Die Eingrenzbarkeit von Leckagen ist immer mit der Anzahl und den Positionen der hydraulischen Sensoren verknüpft. Hier liegt eine weitere Stärke von modellbasierten Ansätzen. Die Verwendung von hydraulischen Modellen ermöglicht es ebenfalls, die idealen Positionen für hydraulische Sensoren im System zu finden und zusätzlich die benötigte Anzahl der Sensoren abzuschätzen.

Die Vorteile der modellgestützten Methoden haben natürlich ihren Preis. Um diese Methoden anwenden zu können, muss ein hydraulisches Modell vorhanden sein, welches mit relativ hohem Aufwand kalibriert werden muss (Nachtmesskampagnen), damit es die realen Verhältnisse im TVN widerspiegelt. Außerdem müssen weitere hydraulische Sensoren im TVN installiert werden, was mit zusätzlichem Aufwand für Instandsetzung und Wartung verbunden ist.

Im Folgenden wird auf die zwei Teilbereiche modellgestützte Leckageeingrenzung und ideale Sensorplatzierung näher eingegangen.

3.3.1.1 LECKAGELOKALISIERUNG

Die modellgestützte Leckageeingrenzung nahm in den letzten Jahrzehnten ihren Anfang. In der Literatur wird zwischen zwei Methoden unterschieden

- Steady-State Analyse
- Transientenanalyse (Colombo et al., 2009)

Transientenanalysen verwenden hydraulische Modelle, die hyperbolische partielle Differentialgleichungen nutzen, um den Druck und den Durchfluss in einem TVN in Abhängigkeit von Ort und Zeit zu simulieren, und ermöglichen eine Simulation von dynamischen Effekten, die in kompressiblen Flüssigkeiten entstehen (z.B. Druckstöße). Dies ist mit hohem Rechenaufwand verbunden, weswegen diese Methoden bis heute nur auf einzelnen Leitungen mit wenigen oder gar keinen Verzweigungen angewendet werden. Eine Ausdehnung dieser Methoden auf echte Systeme brachte bis heute nur mäßigen Erfolg.

Aufgrund der Nachteile und der Unausgereiftheit der Transientenanalyse lag der Fokus im gegenwärtigen Projekt auf der modellgestützten Leckageeingrenzung mittels stationärer (Steady-State) Analysemethoden.

Wenn die Anzahl der Leitungen, Pumpen und Schieber in einem System wächst, tendieren TVN dazu, sich statischer zu verhalten und Transienten spielen im Gesamtverhalten keine große Rolle mehr.

Zudem ist die Abtastrate der hydraulischen Sensoren in einem System üblicherweise viel geringer als seine Dynamik im Hinblick auf Druckstöße. Dies resultiert daraus, dass im Feld in der Regel Abtastzeiten von Minuten, bis Stundenintervalle verwendet werden.

Werden einige Vereinfachungen in der Modellierung durch Lösen des Systems nur für inkompressible Flüssigkeiten in Druckleitungen durchgeführt, so vereinfachen sich die hydraulischen Gleichungen wesentlich, was in einer drastischen Reduktion der Berechnungszeit der Algorithmen resultiert. Dies ermöglicht die Simulation von vermaschten, größeren Systemen.

Im Zuge des AZM Projektes wurde für die hydraulischen Simulationen die Software EPANET verwendet, welche eine Steady-State Analyse von TVN durchführt. Es sei hier angemerkt, dass es sich bei der

Extended-Period-Simulation (EPS), welche in EPANET zur Verfügung steht, um eine Aneinanderreihung von Steady-State Simulationen und nicht um eine echte Transientenanalyse handelt. Durch die EPS können ebenfalls dynamische Effekte in einem TVN dargestellt werden, die durch Behälterfüllungen und -entleerungen, durch Pumpensteuerungen oder durch zeitliche Schwankungen der Tagesverbräuche entstehen.

Erste Erwähnung fand die modellbasierte Leckageeingrenzung in (Pudar & Liggett, 1992). Die Leckageeingrenzung wurde als inverses Problem formuliert, in dem der Unterschied zwischen hydraulischem Modell und Messungen im Feld, abgebildet als Fehlerquadratsumme, minimiert wird. Die Lösung dieses Problems liefert die Position der Leckage. Zusätzlich wurde in dieser Publikation darauf hingewiesen, dass die Qualität des Ergebnisses stark davon abhängt, wo und wie viele Sensoren im TVN vorhanden sind und wie gut das System im Hinblick auf Rohrrauigkeiten kalibriert ist.

Poulakis (Poulakis et al., 2003) benutzte eine Methode die Bayes'sche Wahrscheinlichkeitstheorie verwendet, um Leckagen einzugrenzen. Dies hat den Vorteil, dass auch unvermeidbare Messunsicherheiten und Modellfehler in das Problem miteinbezogen werden können.

In (Wu et al., 2009) werden Leckagen als druckabhängiger Verbrauch mit Hilfe der Emittergleichung in EPANET simuliert. Ein Optimierungsproblem wird definiert, um die Größe und die Position der Leckage zu finden. Dieses Optimierungsproblem wird anschließend mit Hilfe eines genetischen Algorithmus gelöst.

(Perez et al., 2011) vergleicht zwei Methoden um Leckagen zu finden, die beide auf der Auswertung von gemessenen Drücken im System und der Analyse der Leckage-Sensitivitätsmatrix basieren. In der ersten Methode wird die Information aus der Sensitivitätsmatrix binärisiert, was zu einem Informationsverlust über das System führt. Die zweite Methode verwendet die vollständige Information, die in der Sensitivitätsmatrix vorhanden ist, durch Berechnung von Korrelationen zwischen den Messungen und den Spalten der vollen Sensitivitätsmatrix. Beide Methoden wurden anschließend verglichen und beide schienen gut unter idealen Bedingungen zu funktionieren. Allerdings zeigte sich, dass die zweite Methode wesentlich robuster in Bezug auf Unsicherheiten ist.

(Casillas Ponce et al., 2014) lieferte eine Untersuchung, welche von insgesamt fünf Sensitivitätsbasierten Methoden am besten funktioniert, um Leckagen einzugrenzen. Die Winkelmethode zeigte die besten Resultate hinsichtlich der Position, an der die Leckage vom Algorithmus gefunden wurde, und der Entfernung zum tatsächlichen Ort der Leckage. Die Methode wurde auch unter echten Bedingungen angewendet, wo ein reales Leck mit einer Größe von 5.5 l/s und einer Laufzeit von 30.5 Stunden auf 100 Meter genau eingegrenzt wurde.

Im Jahr 2015 veröffentlichte (Casillas et al., 2015b) eine weitere Methode, die eine neue Darstellung des Leckageeingrenzungsproblems in einem „Leak-Signature“ Raum verwendet. Erste Tests haben gezeigt, dass diese Methode robust auf Unsicherheiten ist.

(Cugueró-Escofet et al., 2015b) untersuchte die Auswirkung von Verbraucherunsicherheiten auf die Leckageeingrenzung und entwickelt einen Ansatz mittels Zonotopen, die Robustheit gegenüber Unsicherheiten besitzen. Allerdings wurde diese Methode bis jetzt nur auf ein sehr einfaches Testnetz angewandt.

Eine weitere Methode Leckagen zu finden, welche ohne hydraulisches Modell arbeitet, wird in (Romano et al., 2013) beschrieben. Dies wird mittels künstlicher neuronaler Netze (Artificial Neural Networks ANN) und geostatistischen Methoden realisiert. Die Methode benötigt mehrere Wochen an leckagefreien Daten, um das neuronale Netz zu trainieren. Außerdem wurde die Methode bis jetzt nur auf Lecks (simuliert an

Hydranten durch das Öffnen für eine Dauer von 15 Minuten) im Bereich von 5 l/s bis 19 l/s realisiert und zeigte trotz des großen Ausflusses der Leckage nur mäßigen Erfolg.

3.3.1.2 IDEALE SENSORPLATZIERUNG

Der Erfolg der modellgestützten Leckageeingrenzung hängt stark von den Positionen der hydraulischen Sensoren im Wasserversorgungsnetz ab (Kang & Lansey, 2010).

Methoden zur optimalen Sensorplatzierung existieren für verschiedene Teilbereiche in der Trinkwasserversorgung, zum Beispiel:

- Kalibrierung des hydraulischen Modells
- Auffinden von Kontaminationen
- Leckageeingrenzung

Im Review von (Savic et al., 2009), der Modellkalibrierung im Allgemeinen behandelt, findet man im Kapitel „Sampling Design“ verschiedene Ansätze, wie man Sensoren in einem TVN ideal zum Zweck der Rohrnetzkalibrierung verteilt, um einen maximalen Nutzen zu erzielen. „Sampling Design“ schließt die ideale Platzierung von Sensoren mit ein, beinhaltet aber zusätzlich Entscheidungen, welche Variablen (Druck, Durchfluss, Qualität, ...) gemessen werden bzw. wo (ideale Sensorpositionen), wann (Abtastrate, Dauer, Zeitpunkt) und unter welchen Randbedingungen (Nachtminimum, Spitzenverbrauchzeiten) sie gemessen werden sollen.

Seit den Terroranschlägen am 11. September 2001 in New York bekam die Entwicklung von Algorithmen zur idealen Sensorplatzierung enormen Auftrieb, vor allem um absichtlich oder unabsichtlich eingebrachte Kontaminationen in Wasserverteilnetzen schnell zu finden und somit die möglichen Auswirkungen von Terroranschlägen auf die kritischen Infrastrukturen zu mindern. Im Jahr 2006 gab es in Cincinnati, Ohio, einen wissenschaftlichen Wettbewerb, die „Battle of the Water Sensor Networks“ (BWSN) (Ostfeld et al., 2008), zu diesem Thema. Dies hatte zur Folge, dass in den darauffolgenden Jahren zahlreiche Publikationen mit unterschiedlichen Ansätzen zu diesem Thema erschienen.

(Berry et al., 2006) betrieben Sensorplatzierung als Optimierungsaufgabe mittels mixed-integer programming (MIP). (Krause et al., 2008) entwickelte den Greedy Algorithmus mit anschließendem Simulated Annealing (SA), den bis dato besten Algorithmus um Sensoren zu platzieren und Verunreinigungen aufzuspüren. 2010 veröffentlichten (Dorini et al., 2010) den SLOTS-(Sensor Local Optimal Transformation System)-Algorithmus, der noch bessere Ergebnisse als der Greedy-Algorithmus erzielte.

Zusätzlich zu MIP, Greedy und SLOTS wurden Ansätze entwickelt, die zur Lösung der optimalen Sensorplatzierung verschiedene Genetische Algorithmen (GA) verwendeten. So lösten (Tryby et al., 2010) und (Ostfeld & Salomons, 2004) das Problem mittels multi-objective GAs und machten auch Gebrauch von diesen Algorithmen, allerdings integrierten sie das multi-objective Problem in einer einzelnen skalaren Zielfunktion.

Algorithmen zum Auffinden von Kontaminationen können jedoch nicht direkt für das Auffinden von Leckagen genutzt werden, da eine Leckage im Gegensatz zur Verunreinigung die hydraulische Situation des zu untersuchenden Netzwerks ändert. Außerdem ist das Optimierungsproblem mit Verunreinigungen leichter handhabbar, da die mathematische Zielfunktion des Optimierungsproblems einfach gefunden werden kann.

Die optimale Platzierung von hydraulischen Sensoren in einem Wasserverteilnetz spielt zur Leckageauffindung eine wichtige Rolle. Nur anhand von Messsignalen an wichtigen, neuralgischen Punkten im System, kann eine optimale Leckageeingrenzung unterstützt werden.

Obwohl 1992 in (Pudar & Liggett, 1992) schon erwähnt wurde, dass die Qualität der Leckageeingrenzung mit der Position und der Anzahl der Sensoren im System zusammenhängt und, wie bereits erwähnt, die Basis zur idealen Platzierung in der Leckage-Sensitivitätsmatrix liegt, begann die erste wissenschaftliche Auseinandersetzung mit dem Thema erst 16 Jahre später mit (Farley et al., 2008, 2010b, 2010a, 2013).

(Pérez et al., 2009) entwickelte einen idealen Sensorplatzierungsalgorithmus, der die Sensitivitätsmatrix binärisiert, um die idealen Positionen zu finden. Dies führt allerdings zu einem Informationsverlust über das System (Quevedo et al., 2011) und somit sind die Messpositionen, die der Algorithmus findet, weniger ideal als bei Algorithmen, die auf eine Binärisierung verzichten und von der kompletten Sensitivitätsmatrix Gebrauch machen (Casillas et al., 2013a) (Casillas et al., 2015a).

(Pérez et al., 2014) entwickelten einen Ansatz, der den Schwerpunkt der Projektionen für die Beurteilung, wie gut durch entsprechende Sensorplatzierung eine Leckage eingegrenzt werden kann, verwendet. Dies hat den Vorteil, dass ausgewählte Sensorpositionen robuster gegenüber Unsicherheiten im System sind.

(Cugueró-Escofet et al., 2015a) erweiterten den projektionsbasierten Ansatz von (Casillas et al., 2013a) um einen Index, der praktische Überlegungen, wie beispielsweise eine akzeptable Distanz von der gefundenen Leckage zum tatsächlichen Ort der Leckage, berücksichtigt.

(Sarrate et al., 2012) macht von einer Strukturanalyse der Netztopologie Gebrauch und benötigt damit kein hydraulisches Modell. In (Sarrate Estruch et al., 2013) wurde dieser Ansatz noch mit Clustering-Techniken erweitert (Sarrate et al., 2014b), um auch entsprechend große Netze behandeln zu können. Da dieser Sensorplatzierungsalgorithmus, auf reiner Strukturanalyse basiert, wird die Hydraulik des Systems vernachlässigt und somit wesentliche Eigenschaften des Systems ignoriert. In (Sarrate et al., 2014a) wurde dieser Ansatz daher durch einen projektionsbasierten Ansatz wieder mit der Sensitivitätsmatrix verknüpft.

(Casillas et al., 2015c) entwickelte einen Sensorplatzierungsalgorithmus, der in dem von ihr definierten Leak-Signature Raum arbeitet (Casillas et al., 2015b).

(Christodoulou et al., 2013) wählten einen Ansatz, welcher mit Hilfe der Minimierung der Shannon Entropie, einem Kriterium aus der Informationstheorie, optimale Sensorpositionen für Druck- und Durchflussmessungen liefert.

Zusätzlich existieren Ansätze, welche direkt mittels genetischer Algorithmen (Goulet et al. 2013) und auf Basis von Leckagedatenbanken Sensoren zur Leckageeingrenzung platzieren. Dieser Zugang wurde in diesem Projekt nicht in Betracht gezogen, da die erforderlichen Datenmengen, welche beispielsweise für das Versorgungssystem der Stadt Wien entstehen würden bzw. notwendig wären, zu einem kaum handhabbaren Rechenaufwand führen würden.

3.3.2 EXPERIMENTELLE TRINKWASSERVERSORGUNGSSYSTEME

Die Implementierung neuer Methoden bzw. das Testen von neuen Methoden im Trinkwassersektor gestaltet sich in den meisten Fällen nicht einfach. Die Bereitschaft der WVU und das Interesse an Weiterentwicklungen ist zwar präsent, allerdings sind Tests im Feld, vor allem wenn es sich um Methoden handelt die Messtechnik erfordern, mit entsprechenden Kosten verbunden. Zudem gibt es keine Garantie, dass die neuen Methoden auch tatsächlich funktionieren. Aus diesem Grund bieten Labormodelle eine vergleichsweise kostengünstige Alternative zum Testen neuer Ansätze.

Das Thema von Wasserverlusten beschäftigt die Forschung weltweit. Das Thema Druckmanagement wird speziell von der International Water Association (IWA) als schnelle und effektive Variante zur Wasserverlustsenkung empfohlen. Der Grund, warum ein Druckmanagement in den meisten Fällen zu zufriedenstellenden Ergebnissen führt, ist auf das elastische Verhalten von Leckagen und die generelle Druckabhängigkeit von Leckagen zurückzuführen.

Genau diese Aspekte der Druckabhängigkeit wurden bereits in zahlreichen Veröffentlichungen behandelt. Für die grundlegende Betrachtung der Druckabhängigkeit von Leckagen sowie des Zusammenhanges zwischen Schadensart und Material wurde von (Greyvenstein & van Zyl, 2007) eine experimentelle Anordnung entwickelt, welche die Untersuchung dieser Zusammenhänge erlaubte. Im Zuge dieser Untersuchungen konnten in Abhängigkeit des Materials sowie der Schadensart Emitter-Exponenten, welche die Druckabhängigkeit von Leckagen hinsichtlich Leckageausfluss abbilden, experimentell ermittelt werden. Neben Greyvenstein und Van Zyl beschäftigten sich neben vielen mehr auch (Walski et al., 2009) und (Bennis et al., 2011) mit der experimentellen Ermittlung des Zusammenhangs zwischen der Form der Leckage, Leckageausfluss und Druck.

Für das bessere Verständnis von Leckagen entstanden eine Vielzahl an wissenschaftlich Arbeiten und Experimenten, speziell hinsichtlich des viskoelastischen Verhaltens von Plastik bzw. PVC- und PE-Leitungen, wobei dieses Thema nach wie vor noch immer intensiv behandelt wird. Experimentelle Anordnungen diesbezüglich entstanden an der Universität von Perugia, Italien (Ferrante et al., 2011; Ferrante, 2012; Ferrante et al., 2013). Des Weiteren untersuchten (Franchini & Lanza,) die Eignung der modifizierten Torricelli Gleichung zur Beschreibung des druckabhängigen Verhaltens von Leckagen. Kürzlich wurde an der Universität von Enna, Italien, ein ca. 500 m langes experimentelles Netz errichtet. Ziel war es die beiden weltweit anerkannten Methoden zur Modellierung von Leckagen - den Ansatz der IWA unter Verwendung der Emitter Gleichung und jener von (Cassa & van Zyl, 2009, 2013; van Zyl & Cassa, 2014) unter Verwendung der FAVAD-Gleichung - zu vergleichen und zu verifizieren.

Neben dem generellen Verhalten von Rohrbrüchen in Bezug auf Druckabhängigkeit beeinflussen auch weitere Rahmenbedingungen den Leckageausfluss. Trinkwasserversorgungsleitungen sind im Untergrund verborgen und damit unmittelbar von Erdreich bzw. dem entsprechenden anstehenden Boden umgeben. Den Effekt des umgebenden Bodenmaterials auf den Ausfluss der Leckage betrachteten unter anderem (Walski et al., 2006a) (De Paola et al., 2014), wobei nicht alle Forschungsgruppen zum selben Ergebnis kamen. Dies lag beispielsweise an zu kleinen experimentellen Anordnungen, welche das umgebende Bodenmaterial nur begrenzt real nachbilden konnten. Viele Expertinnen und Experten halten jedoch den Einfluss des umgebenden Bodens auf die Menge des Leckageausflusses für untergeordnet. (Ćipranić & Sekulić, 2015) kamen zum Ergebnis, dass der umgebende Boden als nicht vernachlässigbar einzustufen sei.

Den Aspekt der Netzkalibrierung, und die geeigneten Methoden dafür sind ebenso Gegenstand experimenteller Untersuchungen. (Walski et al., 2006b) präsentierte einen Ansatz zur automatisierten Kalibrierung eines kleinen experimentellen Versorgungsnetzes mittels genetischem Algorithmus. Die Methode funktionierte am kleinen Labornetz zufriedenstellend und konnte geschlossene Scheiber wie auch Rauigkeiten ermitteln. Die Kalibrierung von Trinkwassernetzen auf Basis von Rohrrauigkeiten ist generell bekannt, (Ashby & Yost, 2013) verwendeten Wasserqualitätsparameter um ein hydraulisches Modell zu kalibrieren und verifizierten die Ergebnisse mittels des bereits für die Entwicklung der Methodik eingesetzten experimentellen Trinkwasserverteilnetzes.

Das Thema der Trinkwasserqualität und die Mischungsvorgänge an unterschiedlichen Kreuzungspunkten im Versorgungssystem gewann seit den terroristischen Anschlägen 2001 in New York immer mehr an Bedeutung. Trinkwasserversorgungssysteme sind diesbezüglich eine als kritisch anzusehende Infrastruktur. Die Detektion von potentiellen Kontaminationen in Verteilnetzen ist von großem Interesse und wurde unter

anderem von (Mora Rodríguez et al., 2011; Shao et al., 2014; Yu et al., 2015; Fontanazza et al., 2015) im Detail untersucht.

Nahezu zu jedem Themenbereich in der Analyse von Trinkwasserverteilnetzen finden sich experimentelle Testnetze. Neben den bereits erwähnten Modellen zur Untersuchung von Leckageverhalten, Wasserqualität, Einfluss des umgebenden Bodens und der Kalibrierung hydraulischer Modelle liegt ein weiterer Forschungsbereich im Thema Transienten, also Schwingungen, die durch plötzliche Änderungen im Rohrnetz, wie beispielsweise das Auftreten eines Rohrbruches, hervorgerufen werden. Transientenanalysen wie in (Brunone & Meniconi, 2013; Covas & Ramos, 2010; Evangelista et al., 2015; Misiunas et al., 2005) eignen sich ausgezeichnet für die Detektion von Ereignissen bzw. für das Auffinden teilweise geschlossener Schieber etc. in überregionalen Transportleitungen. In hochgradig vermaschten Netzen eignet sich diese Methode aufgrund der Vielzahl an Einbauten nicht.

Wie aus den vorangegangenen Ausführungen ersichtlich wird, gab es in den letzten Jahren bis Jahrzehnten eine Vielzahl an Forschungstätigkeiten, welche sich experimenteller Netze bediente. Zur Methode der modellgestützten Leckageeingrenzung gibt es bislang keine experimentellen Testnetze.

Das, an der TU Graz errichtete, experimentelle Trinkwasserverteilnetz (EWDS-TUG) stellt in dieser Form eine einzigartige Versuchsanlage dar, welche neben dem eigentlich gedachten Zweck, Methoden zur Leckageeingrenzung zu testen, auch eine Vielzahl weiterer Adaptionen erlaubt. Beispielsweise kann ohne Probleme ein defekter Leitungsabschnitt eingebaut werden um unter Laborbedingungen beispielsweise die Abhängigkeit zwischen Leckagedehnung und Druck zu untersuchen.

Die implementierte Art der Steuerung sowie die Datenübertragung in Echtzeit bietet die Möglichkeit, Methoden zur gezielten Steuerung von Anlagenteilen auf Basis von erhaltenen Messsignalen zu testen. Es besteht die Option auf Basis von erhaltenen Messwerten und deren automatisierte Interpretation gezielt in das experimentelle Trinkwasserverteilnetz einzugreifen. Somit können anhand des experimentellen Trinkwassernetzes auch Versuche zum automatisiertes Druckmanagement durchgeführt werden.

Das Thema Smart Water Management erlangt in den letzten Jahren durch die rasante Technologieentwicklung im Bereich Sensorik, drahtlose Kommunikation, Big Data Algorithmen immer größerer Bedeutung. Daten, und vor allem die Menge dieser, stellen keinen limitierenden Faktor mehr dar. Die Technologien hinsichtlich intelligenter Ventile bestehen bereits. In Zukunft bzw. in den nächsten Jahren bis Jahrzehnten wird die Herausforderung vermehrt darin bestehen, neue Technologien in die seit Jahrzehnten bestehenden Trinkwasserverteilnetze mit den oft schwierigen Rahmenbedingungen zu integrieren, um langfristig eine nachhaltige Bewirtschaftung der Trinkwasserinfrastruktur zu gewährleisten. Eine wesentliche Herausforderung dabei besteht vor allem im Themenbereich Cybersicherheit. Der Umgang mit intelligenten Zählern (Smart Meter) wie auch die rechtlichen Rahmenbedingungen sind an dieser Stelle als Beispiel genannt.

4 METHODIK

DIESES KAPITEL UMFASST die Beschreibung der Methodenentwicklung sowie die mathematischen Grundlagen für die im Projekt AZM entwickelte Methode der modellgestützten Leckageeingrenzung. Es werden Grundprinzipien von Methoden beschrieben, welche die Leckagesensitivität in hydraulischen Systemen nutzen, um Messungen ideal zum Auffinden von Leckagen zu platzieren. Die Methode, wie Sensoren optimal im Verteilnetz zu platzieren sind, bildet neben der Methode der modellgestützten Leckageeingrenzung das Kernthema dieses Kapitels. Der Umgang mit Unsicherheiten, insbesondere jenen resultierend aus dem schwankenden Verbrauchsverhalten, wird ebenfalls im Detail erläutert sowie ein Ansatz zur stochastischen Modellierung hydraulischer Systeme.

4.1 MODELLENTWICKLUNG

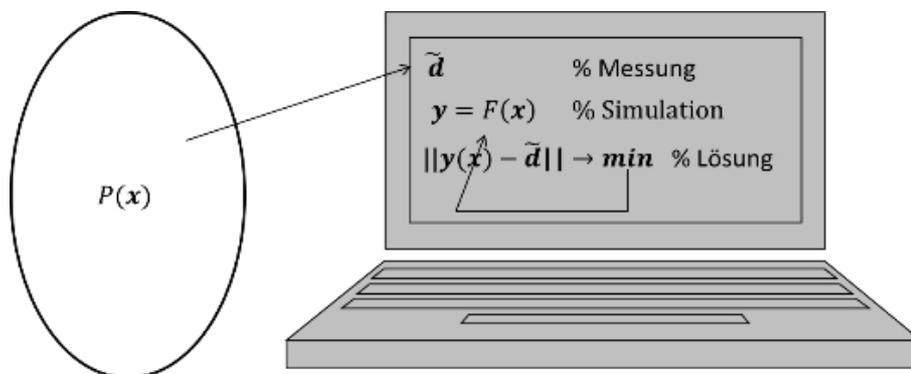


Abbildung 12: Prinzip eines modellbasierten Lösungsansatzes.

Die Anwendung von Modellen ist ein zentrales Element der Methodenentwicklung im Projekt AZM. Da die Erfassung von Leckagen ein indirektes Messproblem darstellt, kann nur aus indirekten Beobachtungen auf das Vorhandensein einer oder mehrerer Leckagen rückgeschlossen werden. Folgende Verfahren kommen dafür in Frage:

- Akustische Ortung: Der Wasseraustritt an Leckagestellen erzeugt ein „typisches“ Geräusch, das zur Detektion von Leckagen verwendet werden kann. Die Möglichkeit für weitere Rückschlüsse, wie beispielsweise auf die Quantität der Leckage, ist jedoch eingeschränkt. Modelle zur Beschreibung der Schallentwicklung durch Leckagen sind komplex, die Beschreibung der Schallausbreitung ist mit hohem Aufwand verbunden.
- Korrelatoren basieren ebenfalls auf einer Auswertung von Schallsignalen. Zusätzlich zur reinen Messung der Schallausbreitung an einzelnen Messpunkten werden hier immer zwei oder mehr Messmikrofone verwendet. Aus der Korrelation der Sensorsignale kann auf die Leckageposition rückgeschlossen werden. Dieser Rückschluss auf die Position ist durch ein einfaches Schallausbreitungsmodell möglich.
- Bei der Leckageeingrenzung basierend auf hydraulischen Messungen werden Drücke und Durchflüsse im Wasserverteilnetz gemessen. Werden z.B. die Durchflüsse am Anfang und am Ende einer Leitung gemessen und weichen die Durchflussmesswerte im Rahmen der Messgenauigkeit zu stark voneinander ab, so kann auf eine Leckage geschlossen werden. Dies ist ein einfaches Beispiel, im Zusammenhang mit der Problemlösung im System

Trinkwasserversorgungsnetz wird dafür ein hydraulisches Modell benötigt. Der Rückschluss auf eine mögliche Leckage basiert dabei auf dem Erhaltungssatz (Kontinuitätsbedingung).

- Transientenbasierte Verfahren beruhen auf der Messung und Interpretation dynamischer Vorgänge im System, wie beispielsweise Schwingungen und deren Ausbreitung infolge eines Druckstoßes. Durch die Dämpfung der Druckschwingungen bzw. des Signals kann auf den Ort der aufgetretenen Leckage geschlossen werden.

Die Lösung des inversen Messproblems unter Verwendung von hydraulischen Modellen stellt einen flexiblen Ansatz dar. Die Verwendung von nicht hydraulischen Messungen, wie mit Schall, erlaubt Rückschlüsse lediglich in sehr eingeschränkter Form.

Abbildung 12 zeigt das Prinzip eines modellbasierten Lösungsansatzes zur Leckagedetektion und Lokalisierung. Die Abbildung stellt das Wasserverteilnetz, in welchem Messungen durchgeführt werden, und ein hydraulisches Modell, symbolisiert durch den Computer, dar. Messungen aus dem Verteilnetz werden im Computer unter Anwendung des hydraulischen Modells simuliert, um Aussagen über Ort und Größe möglicher Leckagen zu generieren. Kennzeichnend für diesen Ansatz der Messsignalverarbeitung ist die Kombination von Modell und Messung zur Gewinnung von Zustandsinformation.

Die Anwendung von modellbasierten Methoden und Ansätzen erfordert ein genaues Verständnis jener Prozesse, die der Modellierung zugrunde liegen. Dieses umfassende Verständnis erlaubt die Entwicklung von verbesserten und neuen Ansätzen. Anhand der Fragestellung der idealen Platzierung und Anzahl von Sensoren im System wird im Folgenden ein neuartiger Ansatz im Kontext zu den genannten modellbasierten Verfahren zur Leckdetektion & -lokalisierung vorgestellt. Im folgenden Kapitel wird daher die hydraulische Modellierung von Trinkwasserverteilnetzen für die Lösung von inversen Problemen dargestellt. Darauf aufbauend erfolgt die Beschreibung des Ansatzes zur Sensorplatzierung sowie zur Leckagelokalisierung. Zusätzlich wird die Möglichkeit der stochastischen Modellierung von Trinkwassernetzen zur effizienten Umgang mit Unsicherheiten beschrieben.

4.1.1 HYDRAULISCHE MODELLIERUNG VON TRINKWASSERVERTEILNETZEN

In diesem Kapitel werden die grundlegenden Schritte der hydraulischen Modellierung und Simulation von Rohrnetzsystemen betrachtet. Im Projekt AZM wird für die Simulation von Wasserverteilnetzen das bewährte Softwarepaket EPANET verwendet.

Die Grundlage der hydraulischen Modellierung stellt die Modellierung der Verbindungselemente dar. Abbildung 13 zeigt ein Rohrelement als zentrales Netzwerkelement innerhalb eines Wasserverteilnetzes.

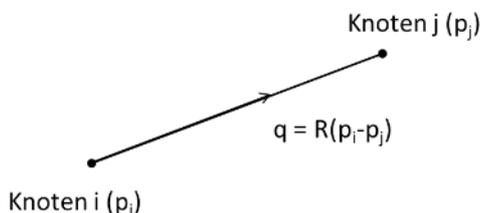


Abbildung 13: Reibungsmodell zur Modellierung von Rohrleitungen.

Die Enden einer Leitung werden als Knoten bezeichnet. Jedem Knoten ist ein Druck zugeordnet. Die Druckdifferenz zwischen Knoten i und Knoten j ist im Ruhezustand des Systems mit

$$\Delta p_{i,j} = p_i - p_j - p_{h,i,j}$$

gegeben, wobei $p_{h,i,j}$ den hydrostatischen Druck aufgrund eines Höhenunterschiedes darstellt.

Der Zusammenhang zwischen dem Druckabfall Δp entlang einer Leitung und dem Durchfluss q wird durch ein Reibungsmodell beschrieben. Zur Beschreibung von Rohrleitungen haben sich verschiedene Reibungsmodelle etabliert. Allgemein lassen sich diese Gesetze durch

$$\Delta p = r q^n + m q^2$$

anschreiben, wobei r , n und m Modellparameter sind.

Die Modellierung des Verhaltens in einem Knoten erfolgt auf Basis von Erhaltungssätzen. Für den Fluss q_N in einen Knoten gilt

$$q_N = q_D + q_E$$

Hierbei bezeichnet q_D den konstanten Verbrauchsfluss und q_E einen druckabhängigen Fluss, welcher in der verwendeten Modellierungssoftware EPANET mit

$$q_E = c_e p^{e_e}$$

beschrieben wird.

Mit den Modellen für die Leitungen und die Knoten lässt sich das hydraulische Gesamtmodell formulieren. Aufgrund der nichtlinearen Modellgleichungen ist ein hydraulisches Modell von nichtlinearer Gestalt.

Wasserversorgungssysteme stellen ein Netzwerk dar, dessen Zustände sich in einem Gleichgewicht befinden, die Beschreibung kann daher über die Knotengrößen erfolgen. Sei p der Vektor der Knotendrucke, so kann der Druckabfall Δp entlang aller Leitungen durch

$$\Delta p = A p - p_h$$

beschrieben werden. Der Vektor p_h enthält die hydrostatischen Drücke für die Leitungen. Die Matrix A bildet die Differenzdrücke zwischen den Knoten und enthält daher nur die Einträge ± 1 und 0 (Null). Diese Matrix kann direkt aus der Netzwerkstruktur abgeleitet werden und wird als Inzidenzmatrix bezeichnet. Es ist anzumerken, dass ein Knoten des Netzwerkes als Referenzknoten verwendet werden muss und daher nicht im Gleichungssystem verwendet wird.

Die Durchflüsse q in den Leitungen können über das Durchflussgesetz dargestellt werden. In der verwendeten Matrix-Vektor Notation kann dies durch

$$q = C(\Delta p)(A p - p_h)$$

beschrieben werden, wobei $C(\Delta p)$ eine Diagonalmatrix mit den individuellen Reibungsgesetzen der Rohrleitungen ist. Das Gleichungssystem ist somit um die nichtlinearen Reibungsgesetze erweitert.

Zur Formulierung der Knotengleichungen kann wieder die Inzidenzmatrix A formuliert werden. Es ergibt sich das nichtlineare hydraulische Gesamtmodell

$$A^T C(\Delta p)(A p - p_h) = q_D + q_E$$

wobei der Vektor q_D die Verbraucherflüsse enthält und der Vektor q_E die druckabhängigen Entnahmen enthält.

Aufgrund der Abhängigkeit der Matrix $C(\Delta p)$ und des Vektors q_E ist das hydraulische Gesamtmodell ein nichtlineares Modell. Die Lösung erfordert iterative Methoden wie das Newton-Raphson Verfahren.

Hydrauliksimulationen wie das Programmpaket EPANET lösen das hydraulische Gesamtmodell. Der Benutzer kann graphisch sein Netzwerk eingeben und editieren, die Lösung des hydraulischen Problems, sowie die Berechnung von zusätzlichen Modellgrößen werden für den Benutzer in aufbereiteter Form durchgeführt. Der Programmbenutzer kann sich somit auf die Analyse des Netzwerkes konzentrieren, ohne sich mit der Lösung des hydraulischen Modells im Detail beschäftigen zu müssen. Durch Softwareinterfaces kann EPANET auch in eigene Applikationen eingebunden werden. Obwohl EPANET nur die Lösungsvektoren als Rechenoutput zur Verfügung stellt, lassen sich mit dem hier abgeleiteten hydraulischen Modell sehr vorteilhaft erweiterte Analysen durchführen, die so aktuell nicht in EPANET abgebildet werden, die aber für die effiziente Umsetzung von modellbasierten Methoden erforderlich sind.

4.1.1 MODELLGESTÜTZTE LECKAGEEINGRENZUNG

Im AZM Projekt werden Leckagen durch Lösen eines inversen Problems mittels eines modellbasierten Ansatzes eingegrenzt. Hierzu werden die hydraulischen Parameter Druck und Durchfluss an n Positionen in einem TVN gemessen. Gleichzeitig werden in einem kalibrierten hydraulischen Modell die Drücke und Durchflüsse an denselben n Positionen simuliert. Der Vektor x repräsentiert die Position L_P und den Emitterkoeffizienten c_e der Leckage

$$x = \begin{pmatrix} c_e \\ L_P \end{pmatrix}$$

Der Emitterkoeffizient c_e ist proportional zur Größe der Leckage, der Zusammenhang ist über die Emittergleichung in EPANET gegeben

$$Q_L = c_e \cdot p^{e_e}$$

Wobei Q_L der Fluss aus der Leckage ist, p der Druck an der Leckageposition L_P und e_e der Emitterexponent, der die Druckabhängigkeit der Leckage beschreibt. Es hat sich gezeigt, dass der Emitterexponent für Steady-State Simulationen in EPANET konstant gesetzt werden kann, da jeder beliebiger Leckageausfluss Q für einen Zeitschritt durch den Emitterkoeffizienten c_e eingestellt werden kann (Steffelbauer et al., 2014).

Der Vektor x ist der Eingabeparameter des hydraulischen Modells. Das inverse Problem wird wie folgt definiert

$$\min_x d(m, \hat{m}(x))$$

m ist ein Vektor, der die Messwerte enthält und $\hat{m}(x)$ der Vektor mit den simulierten Werten an denselben Positionen bei Eingabe des Leckagevektors x . Die Funktion d stellt eine nicht näher definierte Distanzfunktion zwischen den zwei Vektoren bzw. den Unterschied zwischen Messung und Simulation dar. Durch Minimierung dieser Distanz bzw. des Unterschiedes durch Variation des Vektors x wird jener Leckagevektor gefunden, der die Messwerte am besten beschreibt. Dadurch kann auf die Position und die Größe der Leckage rückgeschlossen werden.

Es gibt viele Möglichkeiten die Distanz d zwischen zwei Vektoren zu berechnen. Eine Möglichkeit stellt die Berechnung der Summe der Fehlerquadrate dar.

$$d(\mathbf{m}, \hat{\mathbf{m}}(\mathbf{x})) = \sum_{i=1}^n (m_i - \hat{m}_i(\mathbf{x}))^2$$

wobei der Index i für das i -te Element des Mess- bzw. des Simulationsvektors steht. Die Minimierung der Fehlerquadratsumme führt zur Position der Leckage im System. Diese Minimierung stellt ein Optimierungsproblem dar, das zum Beispiel mit genetischen Algorithmen gelöst werden kann (Goldberg, 1989). Im Zuge des AZM Projektes wurde für die Leckageeingrenzung der Differential Evolution Algorithm aufgrund seiner guten Konvergenzeigenschaften ausgewählt (Storn & Price, 1997).

4.1.2 ALGORITHMEN ZUR OPTIMALEN SENSORPLATZIERUNG

Zur optimalen Platzierung von Sensoren mit dem Ziel der Leckageerfassung und Lokalisierung kommen graphentheoretische Methoden sowie Methoden, welche die Drucksensitivität im Verteilnetz in Abhängigkeit von Leckagen an unterschiedlichen Positionen im System untersuchen, zum Einsatz. Im Folgenden werden die im gegenständlichen Projekt untersuchten Methoden und die darauf aufbauenden Erweiterungen beschrieben.

4.1.2.1 LECKAGE-SENSITIVITÄTSMATRIX

Bei vier der im Folgenden näher beschriebenen Algorithmen zur optimalen Sensorplatzierung von Drucksensoren zur Lokalisierung von Lecks in TVN spielt die Leckage-Sensitivitätsmatrix eine wesentliche Rolle, weswegen hier näher auf diese eingegangen wird. Die Sensitivitätsmatrix enthält die Information, wie empfindlich alle möglichen Druckmesspunkte im System auf alle möglichen Positionen reagieren, wo Leckagen auftreten können. Bei der Leckage-Sensitivitätsmatrix S handelt es sich um eine $(m \times n)$ Matrix

$$S = \begin{pmatrix} s_{11} & \cdots & s_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{m1} & \cdots & s_{mn} \end{pmatrix}$$

wobei n die Nummer der möglichen Druckmesspunkte im TVN ist und m die Anzahl der berücksichtigten Leckage-Szenarios. Im Folgenden nehmen wir an, dass ein Leck auf jeder Leitung im System auftreten kann, weswegen m mit der Anzahl der Leitungen im System gleichzusetzen ist. Untersuchungen haben gezeigt (Blesa et al., 2014), dass die Leckage-Sensitivitätsmatrix nicht empfindlich auf die Größe der Leckage ist, weswegen nur eine gängige Leckage-Größe im System berücksichtigt wurde.

Die einzelnen Elemente s_{ij} der Sensitivitätsmatrix werden wie folgt gebildet

$$s_{ij} = \frac{\partial p_j}{\partial f_i} = \frac{|p_j^{f_i} - \hat{p}_j|}{f_i}$$

wobei es sich bei p_j um den Druck an Knoten j im System und bei f_i um die Größe einer Leckage an der Stelle i handelt. Die partielle Ableitung in der Mitte der obigen Gleichung wird durch einen Differenzenquotienten angenähert. Bei $p_j^{f_i}$ handelt es sich um den Druck an Knoten j bei Auftreten einer Leckage an Leitung i . \hat{p}_j beschreibt den Druck an der gleichen Position ohne Leckage, normiert auf die Größe der Leckage. Die Sensitivitätsmatrix wird mittels Subtraktion des Leckage-freien Systems vom System mit Leck gebildet. Daher sind die Elemente der Sensitivitätsmatrix normalerweise negativ. Das

Auftreten eines Lecks im System führt je nach Leckagegröße zu einem mehr oder weniger großen Druckabfall im System. Durch Bildung des Betrags dieser Subtraktion wird die Sensitivität als positive Größe dargestellt.

Im hydraulischen Simulator EPANET können Leckagen mittels der bereits erwähnten Emitter-Gleichung abgebildet. Der druckabhängige Leckageausfluss wird in der Folge als Q_L bezeichnet.

$$Q_L = c_e \cdot p^{e_e}$$

Bei Q_L handelt es sich um den Fluss des austretenden Wassers aus der Leckage, p ist der Druck an der Position des Lecks, c_e ist der Emitter-Koeffizient und e_e der Emitter-Exponent.

Mit Hilfe der Leckage-Sensitivitätsmatrix kann auch die Sensitivität \bar{s}_j eines Druckmesspunktes auf alle möglichen Leckagen im System berechnet werden. Hierzu wird der Mittelwert über die Zeilen der Sensitivitätsmatrix gebildet

$$\bar{s}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_{ij}$$

Dies dient einerseits zur grafischen Darstellung der sensitiven Druckmesspunkte im System, andererseits geht diese Kennzahl auch direkt in den optimalen Sensorplatzierungsalgorithmus unter Verwendung der Shannon Entropie ein (siehe Unterkapitel „Optimale Platzierung durch Minimierung der Shannon Entropie“, Seite 42).

Um den Einfluss aller Leckagen gleichmäßig in der Matrix abzubilden, kann die Matrix S auf den größten Einfluss aller Leckagen auf den Sensor j normiert werden. Hierzu wird pro Spalte durch den größten auftretenden Wert dividiert, um die normierte Sensitivitätsmatrix zu erhalten

$$S = \begin{pmatrix} \frac{s_{11}}{\sigma_1} & \dots & \frac{s_{1n}}{\sigma_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{s_{m1}}{\sigma_m} & \dots & \frac{s_{mn}}{\sigma_m} \end{pmatrix}$$

Wobei es sich bei σ_i um das Maximum über die jeweilige Zeile i handelt.

$$\sigma_i = \max(s_{i1}, \dots, s_{in})$$

Zur Berechnung von S wird der Differenzenquotient ∂p_j für jedes einzelne Leckage-Szenario gebildet und die jeweiligen Drücke auf den möglichen Sensorpositionen „gemessen“. Dazu ist neben den Simulationen der Leckage-Szenarien an allen Netzpositionen zusätzlich eine Simulation des Leckage-freien Systems erforderlich. Dies resultiert in $m + 1$ hydraulischen Simulationsdurchläufen.

Durch die im Kapitel 4.1.3.1 (Seite 53) beschriebene Methode entsteht Potential, um Rechenzeit zu sparen, da diese Methode nur einen hydraulischen Simulationsdurchlauf benötigt, um die Sensitivitätsmatrix abzuleiten. Dies spielt insbesondere bei großen hydraulischen Systemen mit einer hohen Anzahl von Leitungen eine Rolle.

4.1.2.2 BEISPIEL FÜR DIE BERECHNUNG EINER LECKAGE-SENSITIVITÄTSMATRIX

In diesem Kapitel wird verdeutlicht, wie die Sensitivitätsmatrix berechnet wird. Als Beispiel dient hier ein Netz aus der Literatur, das Netz von Poulakis (Poulakis et al., 2003), welches in Abbildung 14 dargestellt ist. Dieses Netz besteht aus 30 Verbrauchern mit sehr großen Verbräuchen von jeweils 50 l/s ($J-02$ bis $J-31$) und 50 Leitungen ($P-01$ bis $P-50$). Das Netz wird gravitativ durch ein Reservoir gespeist (Knoten $J-01$). Die Leitungen besitzen Durchmesser zwischen 300 mm und 600 mm und alle Leitungen gehorchen dem Darcy-Weißbach Rauigkeitsgesetz mit einem Rauigkeitskoeffizienten von 0.26 mm.

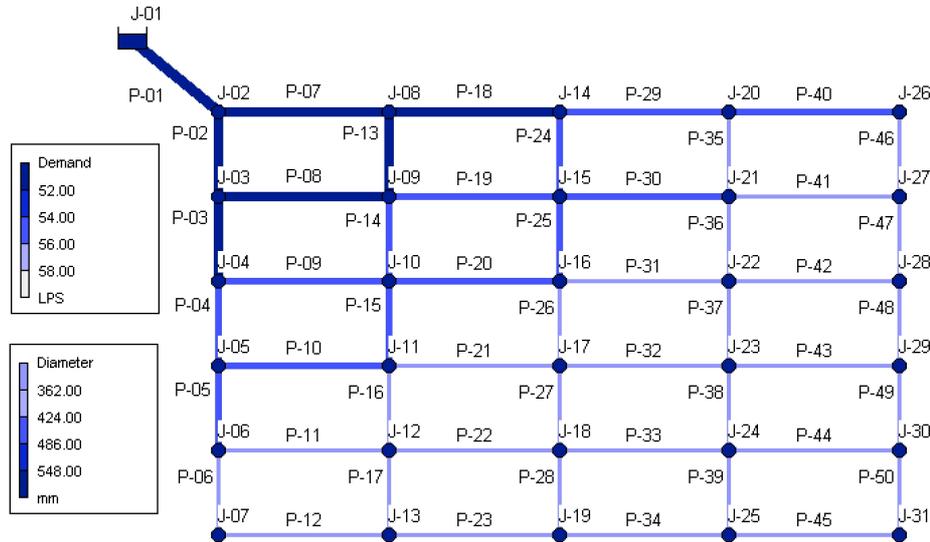


Abbildung 14: Beispielnetz von Poulakis

In EPANET können Emitter nur auf Knoten und nicht direkt an den Leitungen angesetzt werden, an denen sie eigentlich auftreten (mit Ausnahme von Verbindungsschäden). Diesem Problem kann begegnet werden, indem automatisiert „virtuelle“ Knoten in der Mitte der Leitungen angesetzt werden (Fuchs-Hanusch et al., 2015). Zum Ansetzen von Leckagen auf Leitungen wurde das Programm OOPNET (Steffelbauer & Fuchs-Hanusch, 2015, 2016a) um eine Funktion erweitert, welche schematisch wie folgt funktioniert (siehe auch Abbildung 15):

1. Eigenschaften des Startknoten $J-01$ und des Endknoten $J-02$, welche die Leitung verbindet, auf der die Leckage angesetzt werden soll, aus der objektorientierten Struktur extrahieren.
2. Extrahieren der geodätischen Höhe und der Koordinaten der zwei Knoten aus den durch OOPNET zugewiesenen Eigenschaften der Knoten.
3. Abspeichern der charakteristischen Parameter der Leitung (Länge, Durchmesser, Rauigkeit) und Schließen der Leitung aus der EPANET Input-Datei.
4. Platzieren eines „virtuellen“ Knotens DN genau in der Mitte der zwei Knoten $J-01$ und $J-02$ mit der mittleren geodätischen Höhe dieser umgebenden Knoten.
5. Verbinden des Knoten $J-01$ mit dem virtuellen Knoten DN durch Einführung einer neuen Leitung in der EPANET Input-Datei mit demselben Durchmesser und derselben Rauigkeit der zugrundeliegenden, aber mit der halben Länge.
6. Gleich wie Punkt zuvor, nur diesmal Verbinden von DN mit $J-02$.

- Dem „virtuellen“ Knoten DN den gewünschten Emitter Koeffizienten zuweisen.



Abbildung 15: Schematische Darstellung der Methode, einen "virtuellen" Knoten an einer Leitung anzusetzen, um die Leakage der Leitung zuordnen zu können.

Für die Erstellung der Leakage-Sensitivitätsmatrix werden die Schritte 1 bis 7 für jede Leitung im Netz wiederholt um die Leakage-Szenarien zu erzeugen. Nach jedem Durchlauf der Punkte 1 bis 7 wird eine hydraulische Simulation ausgeführt, um die Drücke an allen möglichen Messpunkten zu berechnen. Zusätzlich werden die Drücke für den Leakage-freien Fall berechnet, daher resultiert die Berechnung der Sensitivitätsmatrix in $m + 1$ hydraulischen Simulationen, wobei m die Anzahl der betrachteten Leakage-Szenarien bzw. im gegenständlichen Fall die Anzahl der Leitungen im Netz darstellt. Die hydraulischen Simulationen wurden mit OOPNET durchgeführt, wobei der EPANET Rechenkern verwendet wurde.

In Abbildung 16 ist die Sensitivitätsmatrix dargestellt. Diese ergibt sich, indem an jeder Leitung im Netz ein Leck mit einem Emitter-Koeffizienten $c_e = 0.2$ und einem Exponenten von $e_e = 0.5$ angesetzt, und jeweils eine hydraulische Simulation durchgeführt wird. Dies führt zu Leckagen in der Größe von 0.6 l/s bis zu 1.5 l/s, je nachdem, wo die Leakage im System angesetzt wurde.

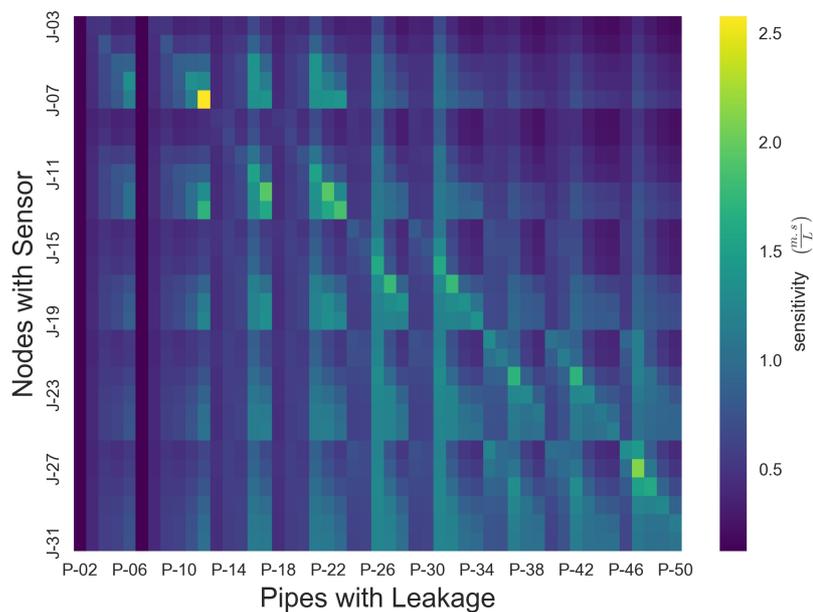


Abbildung 16: Sensitivitätsmatrix für das Netz von Poulakis

Die Sensitivität der einzelnen möglichen Druckmesspunkte auf alle möglichen Leakage-Szenarien im System ist in Abbildung 17 dargestellt.

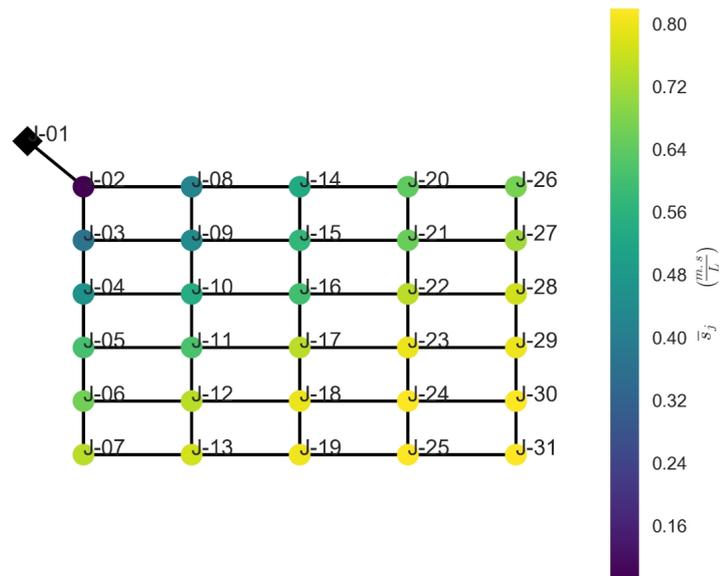


Abbildung 17: Sensitivität der möglichen Druckmesspunkte im Netz von Poulakis über alle Leckage-Szenarios

In Abbildung 18 ist die normierte Sensitivitätsmatrix dargestellt, die durch Division der Spalten der Sensitivitätsmatrix durch den jeweils größten Wert in der Spalte erzeugt wird.

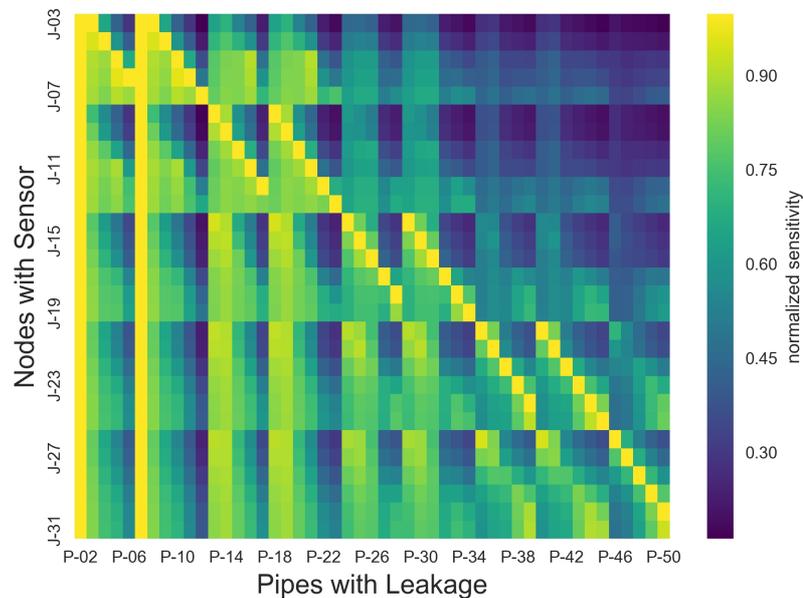


Abbildung 18: Normierte Sensitivitätsmatrix für das Netz von Poulakis

4.1.2.3 GENETISCHE ALGORITHMEN

Für die im gegenständlichen Projekt entwickelten Methoden zur Ermittlung optimaler Sensorpositionen und zur Berechnung der wahrscheinlichsten Position von Leckagen werden genetische Algorithmen angewendet.

Entwickelt in den 70er-Jahren des letzten Jahrhunderts (Rechenberg, 1973; Holland, 1975; De Jong, 1975; Goldberg, 1989) kommen Genetische Algorithmen (GA) besonders in den Ingenieurwissenschaften aufgrund immer schnellerer Computer vermehrt zur Anwendung. Inspiriert von der natürlichen Evolution

und angetrieben vom Ehrgeiz, diese zumindest in ihren wesentlichen Grundzügen zu kopieren, bestechen sie vor allem durch ihre Einfachheit. Bei simplen GA (sGA) reichen schon drei einfache mathematische Operatoren aus, um eine wesentliche Verbesserung in der Optimumssuche zu bewerkstelligen. GA gehören zur Klasse der stochastischen Optimierungsverfahren. Dies hat den Nachteil, dass sie keine optimale Lösung garantieren können, allerdings ergibt sich daraus der Vorteil, dass GA zu den wenigen Algorithmen gehören (neben z.B. Simulated Annealing SA), die überhaupt eine global optimale Lösung finden können. Ein Vorteil von GA besteht auch darin, dass sie durch ihre Populationsbasiertheit hochgradig parallelisierbar sind. Dies ist auch ein wesentlicher Grund für ihr aktuell starkes Auftreten, da moderne Computer mit immer mehr Rechenkernen ausgestattet sind.

4.1.2.4 GRAPHENTHEORETISCHE BETRACHTUNG VON TRINKWASSERNETZEN UND SHORTEST PATH ALGORITHMEN

Die Graphentheorie ist ein Teilgebiet der Mathematik, welches sich mit der Struktur und den Eigenschaften von Graphen beschäftigt. Ein Graph ist eine mathematische, abstrakte Struktur, welche eine Menge von *Knoten* und deren *Verbindungen* untereinander beschreibt. Auch Trinkwasserverteilnetze (TVN) können als Graphen beschrieben werden, indem Behälter, Reservoirs und Verbraucher als *Knoten* betrachtet werden, welche über Trinkwasserleitungen verbunden sind.

Viele algorithmische Probleme können auf Graphen zurückgeführt werden. Eines der bekanntesten Probleme ist die Berechnung der kürzesten Wege zwischen zwei Punkten, welches z.B. in Routenplanern gelöst wird. Auch im Projekt AZM wurde die Berechnung der kürzesten Wege verwendet.

Zum einen kann das optimale Sensorplatzierungsproblem auf diese Weise gelöst werden, zum anderen wird es bei der Auswertung der Qualität der Leckagelokalisierung verwendet, indem die kürzeste Entfernung von der vom Algorithmus gefundenen Leckage zur echten Leckage im System berechnet wird.

4.1.2.4.1 SHORTEST PATH 1 ALGORITHMUS

Dieser Algorithmus aus der Graphentheorie ist im Detail in (de Schaetzen et al., 2000) beschrieben. Mögliche Druckmesspunkte werden mittels eines Shortest Path Algorithmus nach der Entfernung über den kürzesten Weg zum Einspeisepunkt in das System gereiht, in unserem Fall wurde der Algorithmus von Dijkstra (Dijkstra, 1959) verwendet. Als Gewicht für den Shortest Path Algorithmus dienen die Längen der einzelnen Leitungen. Der Messpunkt, welcher am weitesten vom Einspeisepunkt entfernt ist, ist der erste Messpunkt.

Anschließend wird vom Einspeisepunkt zum Messpunkt im Graph eine „Dummy“-Leitung der Länge 0 eingeführt. Damit ändern sich die kürzesten Wege von der Quelle zu den in der Umgebung des Druckmesspunktes gelegenen Leitungen. Das führt dazu, dass keine Messpunkte in der Nähe des bestehenden Messpunktes mehr ausgewählt werden.

Diese Prozedur wird so lange wiederholt, bis die gewünschte Anzahl der zu platzierenden Sensoren erreicht ist.

Es sei hier erwähnt, dass diese Methode Druckmesspunkte bevorzugt, welche sich im inneren Bereich des Systems befinden. Des Weiteren muss für diesen Algorithmus kein hydraulisches Modell existieren. Es wird lediglich die Information benötigt, welche Leitungen welche Knoten im TVN miteinander verbinden.

4.1.2.4.2 SHORTEST PATH 2 ALGORITHMUS

Diese Methode ist ebenfalls in (de Schaetzen et al., 2000) zu finden. Auch hier werden die Druckmesspunkte mittels des Shortest Path Algorithmus gewichtet nach den Längen der einzelnen Leitungen gereiht.

Der einzige Unterschied zur vorigen Methode ist, dass die Längen aller Leitungen, welche sich auf dem gefundenen kürzesten Pfad vom Einspeisepunkt zum Messpunkt befinden, auf null gesetzt werden.

Im Gegensatz zur ersten Methode bevorzugt diese Methode Messpunkte, welche sich in Randlagen des Netzes befinden. Wie in der vorigen Methode benötigt diese Methode kein hydraulisches Modell, sondern ebenfalls nur die Topologie des Netzes.

4.1.2.4.3 OPTIMALE PLATZIERUNG DURCH MINIMIERUNG DER SHANNON ENTROPIE

Die Shannon Entropie ist ein wahrscheinlichkeitstheoretisches Maß für die Unsicherheit, die in einem System existiert. Durch Integrieren der Shannon Entropie in das Problem der optimalen Sensorplatzierung, kann der Informationsgehalt über das System erhöht werden, dabei wird die Shannon Entropie maximiert.

Ursprünglich wurde der Algorithmus für die Kalibrierung von Rohrrauigkeiten genutzt (siehe (de Schaetzen et al., 2000)). Im Projekt AZM wurde der Algorithmus durch Ersetzen der Rauigkeits-Sensitivitätsmatrix durch die Leckage-Sensitivitätsmatrix S für die optimale Sensorplatzierung nutzbar gemacht.

Im Algorithmus von (de Schaetzen et al., 2000), werden zwei Funktionen maximiert. Die erste Funktion maximiert die Sensitivität der Platzierung der Sensoren auf Leckagen. In einer Formel ausgedrückt ergibt sich

$$F_1(x) = \sum_{i=1}^m \sigma_i$$

Wobei σ_i das Maximum einer Zeile der Sensitivitätsmatrix ist, wie zuvor in Kapitel 4.1.2.1 „Leckage-Sensitivitätsmatrix“ (Seite 36) beschrieben. Die zweite Funktion, die maximiert werden soll, ist die Shannon Entropie Funktion, welche dem Algorithmus auch den Namen gibt.

$$F_2(x) = - \sum_{i=1}^m p_i \ln p_i \quad \text{mit} \quad p_i = \frac{\sigma_i}{\sum_{i=1}^m \sigma_i}$$

Während das Maximieren von $F_1(x)$ zu einer Platzierung der Sensoren auf die auf Leckagen empfindlichsten Positionen führt, werden beim Maximieren von $F_2(x)$ Sensorpositionen bevorzugt, welche sich hinsichtlich Position im Netz deutlich voneinander unterscheiden. Da Drucksensoren vor allem in ihrer Umgebung empfindlich auf Leckagen reagieren, ist es wichtig, dass die Sensoren über das gesamte Netz verteilt sind.

4.1.2.5 PÉREZ BINÄRSIERTE SENSITIVITÄTSMATRIX

Ausgangspunkt für den Algorithmus von Pérez (Pérez et al., 2009) ist die normierte Sensitivitätsmatrix aus dem Unterkapitel „Leckage-Sensitivitätsmatrix“ (Seite 36). Diese Matrix wird binärisiert, um sie leichter verarbeiten zu können. Hierzu wird ein Grenzwert (auch Threshold) τ eingeführt. Matrixelemente mit einem Wert größer-gleich τ werden auf eins gesetzt, Elemente kleiner als τ auf null. In Abbildung 19 ist die binärisierte Sensitivitätsmatrix für das Netz von Poulakis für verschiedene Thresholds τ dargestellt.

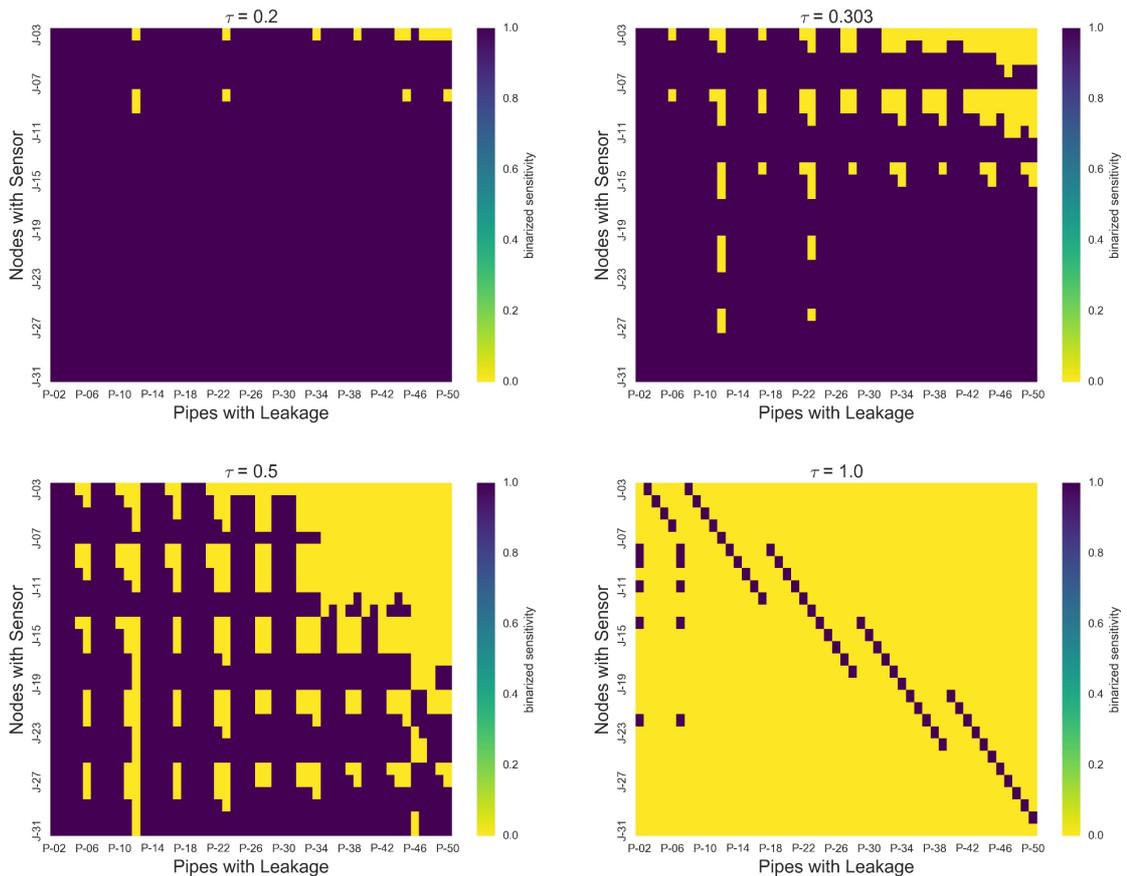


Abbildung 19: Binärisierte Sensitivitätsmatrix für verschiedene Thresholds

Setzt man den Threshold τ auf einen zu kleinen Wert, z.B. $\tau = 0.2$, so sind fast alle Matrixelemente eins. Bei sukzessiver Erhöhung von τ werden mehr und mehr Matrixelemente null, bis schließlich bei einem großen τ -Wert von 1.0 nahezu alle Matrixelemente, bis auf die Hauptdiagonalwerte, null sind.

Die Idee ist nun, dass wenn ein Sensor im System installiert wird, dieser eine Zeile in der Matrix darstellt. Leckagen, die dieser Sensor nun registrieren kann, sind alle Werte mit einer Eins in dieser Zeile.

Wird ein Sensor bei $\tau = 0.2$ an einem beliebigen Punkt im System positioniert, so registriert er alle Leckagen, kann aber nicht unterscheiden, woher die Leckage stammt. Bei $\tau = 1.0$ hingegen sind Leckagen nur mehr unmittelbar an der Sensorposition detektierbar. Eine Lokalisierung der Leckagen ist möglich, geht aber auf Kosten der maximalen Anzahl von Sensoren im System. Ziel ist es, die maximale Anzahl an Leckagen lokalisieren zu können und zugleich die geringste Anzahl an Sensoren zu verwenden. Dies ist der Fall, wenn die Zeilen der binärisierten Sensitivitätsmatrix so unterschiedlich wie möglich sind. Wie der ideale Threshold gefunden werden kann, der diese Bedingung erfüllt, wird ebenfalls in (Pérez et al., 2009) beschrieben. Dies ist der Fall, wenn die Anzahl der unterschiedlichen Zeilen („number of signatures“) der maximalen Anzahl der gleichen Zeilen („maximum number of nodes“) in der Matrix entspricht, also genau auf dem Schnittpunkt der beiden Kurven für das Netz von Poulakis in Abbildung 20, dies entspricht einem idealen Threshold von $\tau = 0.303$. Die ideale binärisierte Sensitivitätsmatrix befindet sich in Abbildung 19 rechts oben.

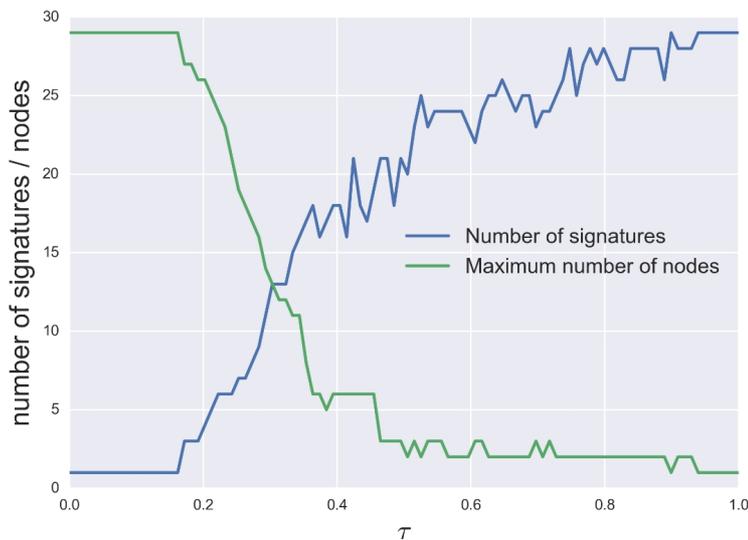


Abbildung 20: Anzahl der gleichen Zeilen ("Number of signatures") und maximale Anzahl der gleichen Zeilen ("Maximum number of nodes") als Funktion des Thresholds für das Netz von Poulakis um den idealen Threshold zu finden.

Das optimale Sensorplacement für n Sensoren entspricht dem Auswählen von jenen n Zeilen in der binärisierten Sensitivitätsmatrix, die eine Detektion sämtlicher Leckagen ermöglichen (in jeder Spalte der n ausgewählten Zeilen muss zumindest eine 1 stehen), wobei die Zeilen so unterschiedlich wie möglich sein sollen, damit die Leckagen auch voneinander unterscheidbar und somit lokalisierbar werden. Dazu wurden von Pérez genetische Algorithmen angewendet.

4.1.2.6 PROJEKTIONSBASIERTER ANSATZ NACH CASILLAS

Mit der Binärisierung der Sensitivitätsmatrix geht ein Informationsverlust im System einher (Quevedo et al., 2011). Deswegen wird im Folgenden ein Ansatz vorgestellt, der gänzlich auf die Binärisierung verzichtet und so eine bessere Sensorplatzierung garantiert. Dieser Ansatz ermöglicht zudem die Berücksichtigung von Unsicherheiten, wie zum Beispiel dem Effekt von unsicheren Verbrauchern bzw. Verbrauchsschwankungen (siehe dazu auch Kapitel 4.1.3 „Stochastische Modellierung von Trinkwasserverteilnetzen“, Seite 52).

Der Methode wurde von Myrna V. Casillas im Jahr 2013 entwickelt und verwendet die normierte Sensitivitätsmatrix mit einem auf Projektionen basierten Leckagelokalisierungsschema (Casillas et al., 2013a, 2013b). Hierzu werden neben der Sensitivitätsmatrix auch noch die Residuen r verwendet.

$$r_k = \begin{bmatrix} p_1^{f_k} - p_1 \\ \vdots \\ p_n^{f_k} - p_n \end{bmatrix}$$

Bei den Residuen handelt es sich um die simulierten Messunterschiede an den n Messpunkten, die sich zwischen dem Leckage-freien und dem System mit einer Leckage der Größe f_k an der Position k im System ergeben. Bei der Sensitivitätsmatrix handelt es sich um die gleiche Matrix, welche in Unterkapitel „Leckage-Sensitivitätsmatrix“ (Seite 36) verwendet wurde. Die Sensitivitätsmatrix besteht aus m Spalten, welche die m verschiedenen Leckage-Szenarien symbolisieren.

$$S = [s_1 \quad \cdots \quad s_m]$$

Wir nennen s_j im Folgenden den Sensitivitätsvektor an der Position j . Analog kann eine Residuenmatrix R gebildet werden, die ebenfalls aus m Spalten analog zu den m betrachteten Leckagen besteht.

$$R = [r_1 \quad \cdots \quad r_m]$$

bei r_j handelt es sich um den j -ten Residuenvektor. Die Sensorpositionen, welche die ausgewählten Messpositionen repräsentieren, können über einen binären Vektor beschrieben werden.

$$q = [q_1 \quad \cdots \quad q_m]$$

Hier bedeutet $q_i = 1$, dass sich ein Sensor an Position i befindet, respektive bedeutet $q_i = 0$, dass kein Sensor an dieser Position installiert ist. Hieraus lässt sich eine Matrix $Q(q)$, die Matrix der Sensorpositionen, produzieren, indem der Vektor der Sensorpositionen in eine Diagonalmatrix umwandelt wird.

$$Q(q) = \text{diag}(q_1, \dots, q_m)$$

Mit Hilfe der Matrix Q lassen sich die Zeilen der Sensitivitätsmatrix S auswählen, an denen Messungen vorgenommen werden. Dies geschieht durch Multiplikation der Matrix $Q(q)$ mit dem j -ten Sensitivitätsvektor.

$$s_j(q) = Q(q)s_j$$

Durch Multiplikation von $Q(q)$ mit dem k -ten Residuenvektor, erhält man die Residuen an den entsprechenden Sensorpositionen.

$$r_k(q) = Q(q)r_k$$

Casillas löste das Problem eine Leckage zu finden in früheren Arbeiten mit Hilfe eines Projektionsansatzes. Für die Residuen können die gemessenen Werte eingesetzt werden, während es sich bei s_j um die Sensitivitätsvektoren handelt. Daraus lässt sich der Projektionsvektor ψ folgendermaßen berechnen.

$$\psi_j = \frac{r^T s_j}{|r||s_j|}$$

Die errechnete Leckageposition k lässt sich dann über die Position des Maximums von ψ bestimmen.

$$\psi_k = \max(\psi_1, \dots, \psi_m)$$

Dieser Ansatz kann mittels der Residuenmatrix und der Matrix der Sensorpositionen erweitert werden. Die daraus abgeleitete Projektionsmatrix ψ , hängt von den Sensorpositionen q im System ab. Die einzelnen Elemente ψ_{kj} dieser Projektionsmatrix berechnen sich zu.

$$\psi_{kj}(q) = \frac{r_k^T Q(q)s_j}{|Q(q)r_k||Q(q)s_j|}$$

$Q(q)$ kommt im Zähler nur einmal vor, da das Produkt der transponierten Matrix von $Q(q^T)$ und $Q(q)$ wieder die Matrix der Sensorpositionen ergibt.

$$Q(q^T)Q(q) = Q(q)$$

Die vollständige Projektionsmatrix ergibt sich dann zu:

$$\psi(q) = \begin{bmatrix} \psi_{11}(q) & \cdots & \psi_{1m}(q) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_{m1}(q) & \cdots & \psi_{mm}(q) \end{bmatrix}$$

Aus der Projektionsmatrix lässt sich ein Parameter ε berechnen, der angibt, ob die aktuelle Position der Sensoren die Leckage im Leckage-Szenario i richtig gefunden hat (0) oder nicht (1). Die richtige Identifizierung der Leckage erfolgt, wenn das Maximum der Zeile i sich in der Diagonale der Projektionsmatrix befindet.

$$\varepsilon_i(q) = \begin{cases} 0 & \text{if } \psi_{ii}(q) = \max(\psi_{i1}(q), \dots, \psi_{im}(q)) \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Anschließend wird über alle so erhaltenen ε Werte gemittelt.

$$\bar{\varepsilon}(q) = \sum_{i=1}^m \frac{\varepsilon_i(q)}{m}$$

Die Minimierung des gemittelten ε Wertes durch Variation der Sensorpositionen q führt zur idealen Sensorplatzierung um Leckagen zu finden,

$$\min_q \bar{\varepsilon}(q)$$

wobei die Einschränkung gilt, dass n Sensoren zur Verfügung stehen. Dies bedeutet, dass die Summe über den binären Vektor der Sensorpositionen immer n ergeben muss.

$$\sum_{i=1}^m q_i = n$$

Es gilt, dass für kleine Systeme noch alle möglichen Kombinationen sukzessive durchgerechnet werden können, während bei größeren Systemen aufgrund des riesigen Lösungsraumes wieder genetische Algorithmen genutzt werden können.

4.1.2.7 SPUDU – SENSOR PLACEMENT UNDER DEMAND UNCERTAINTIES

Unsichere Verbräuche haben verschieden starke Auswirkungen auf unterschiedliche Messpunkte in einem Wasserverteilnetz.

Abbildung 21 illustriert dieses grundlegende Problem und zeigt einen unsicheren Verbrauch an einer beliebigen Stelle. Der rote Pfeil markiert einen Verbraucher im Wasserverteilnetz. Der genaue Verbrauchswert desselben ist nicht bekannt, es existiert nur Wissen über einen typischen Wert und die Streuung des Verbrauchs. Tatsächlich ist jeder Verbrauch im Verteilnetz ein unsicherer Verbrauch. Die Unsicherheit des Verbrauchs hat Auswirkung auf den hydraulischen Zustand im gesamten Netz, in Abbildung 21 ist dies durch den schwarzen Pfeil illustriert. Die Auswirkung betrifft jedoch nicht, wie in Abbildung 21 dargestellt, eine einzelne Stelle im Netz, sondern jede Stelle im Verteilnetz. Dieser Effekt kann beispielsweise mit Hilfe einer Monte Carlo Analyse simuliert werden.



Abbildung 21: Auswirkung eines unsicheren Verbrauchers.

Die Berücksichtigung des Effekts dieser Unsicherheiten lässt eine Verbesserung der modellbasierten Leckageerfassung erwarten.

Anhand des Modellnetzes aus (Poulakis et al., 2003) wurde die Unsicherheit des Verbrauches mit einer Normalverteilung $\mathcal{N}(x)$ angesetzt und die daraus resultierenden Effekte auf die Drucksituation in potentiellen Messknoten untersucht (siehe Abbildung 22).

$$\mathcal{N}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

Der Mittelwert der Normalverteilung μ wurde auf den angesetzten Verbrauch dieses Knotens, im Nachtminimum, gesetzt. Die Standardabweichung σ wurde auf 10 % von μ gesetzt. Da im Netz von Poulakis an jedem Knoten der gleiche Verbrauch von 50 l/s angesetzt wurde, ergibt sich für jeden Punkt im Netz die gleiche Normalverteilung. Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen, die sich für die Abweichungen vom Verbrauch q_D an den jeweiligen Knoten im Netz ergeben, sind in Abbildung 22 auf der linken Seite angegeben. Der Effekt dieser unsicheren Verbraucher auf die Druckmesspunkte im System wurde mittels EPANET durch eine Monte Carlo Analyse berechnet und auf der rechten Seite in Abbildung 22 dargestellt. Die Abweichungen des Drucks vom berechneten Druck, der sich mit den tatsächlichen Verbräuchen ergibt, ist ebenfalls normalverteilt. Hieraus lässt sich eine Standardabweichung σ für die Druckmesspunkte berechnen. Diese Standardabweichung ist eine direkte Abbildung des Rauschens der Messwerte aufgrund der unsicheren Verbräuche. Es ist sofort erkennbar, dass sich die Unsicherheit der Verbräuche unterschiedlich stark auf die verschiedenen Messpunkte auswirkt.

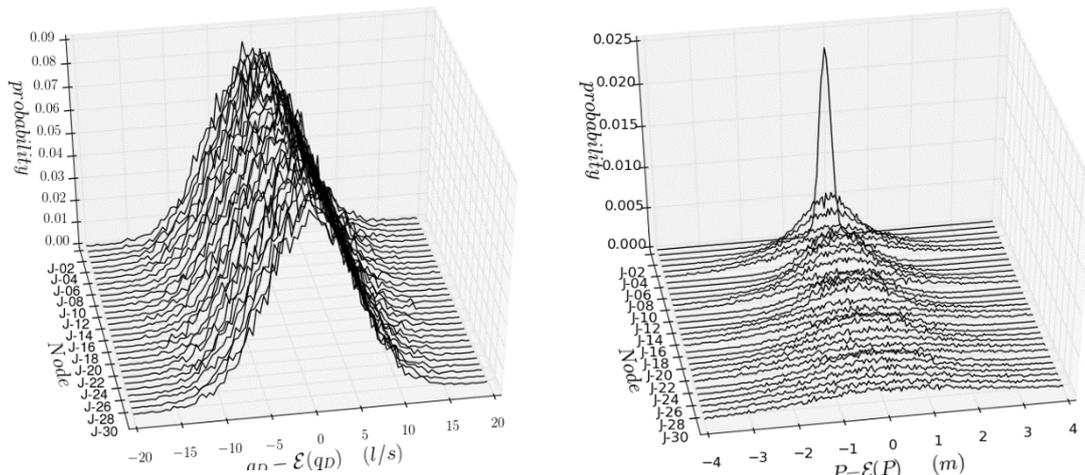


Abbildung 22: Ergebnisse einer Monte Carlo Analyse für das Netz von Poulakis. Auf der linken Seite sind die Abweichungen der Verbräuche von den tatsächlichen Verbräuchen im Nachtminimum dargestellt. Die Verbräuche wurden mittels einer Normalverteilung mit einer Standardabweichung σ von 10 % vom tatsächlichen Verbrauch am Knoten verrauscht. Auf der rechten Seite sind die Druckabweichungen an den einzelnen Druckmesspunkten aufgrund der unsicheren Verbräuche dargestellt. Diese sind wieder Normalverteilt, allerdings mit unterschiedlicher Standardabweichung σ .

Wird die Standardabweichungen σ der Druckvariation aufgrund der Verbrauchsschwankungen im Netz von Poulakis im Netz dargestellt (Abbildung 22), so wird erkennbar, dass sich die Verbrauchsunsicherheit am Einspeisepunkt (Knoten J-02) am geringsten auswirkt. Je größer die Distanz zum Einspeisepunkt, umso stärker wirkt sich die Verbrauchsunsicherheit aus. Am weitesten entfernten Punkt, dem Knoten J-31, ist der größte Effekt erkennbar.

Beim Vergleich der Punkte mit der größten Standardabweichung aufgrund des Rauschens mit den Punkten, welche am sensitivsten auf Leckagen reagieren (siehe Abbildung 24), geht hervor, dass jene Messpunkte, die am sensitivsten sind, auch jene Punkte sind, an denen die Auswirkungen der Verbrauchsunsicherheiten maximal sind. Dies ist der Grund, warum davon auszugehen ist, dass das Einbinden von Unsicherheiten in die Methodik zur Sensorplatzierung zweckmäßig erscheint.

Wird die gleiche Methode auf das Netz Linz-Pichling angewendet (siehe Abbildung 25), so ist der vorher erwähnte Zusammenhang nicht mehr so deutlich erkennbar. Die sensibelsten Knoten für Leckagen sind nicht mehr unbedingt die sensibelsten Knoten in Bezug auf das Rauschen. Dies hat zwei Gründe. Das Netz von Poulakis hat die gleichen nominalen Verbräuche von 50 l/s an allen Knoten im System, während das Netz Linz-Pichling, aufgrund der Tatsache das es sich um ein echtes und nicht ein fiktives Netz handelt, verschieden große Verbräuche an den Knoten aufweist. Zum Zweiten ist das Netz von Poulakis flach, d.h. alle Knoten haben die gleiche Höhe, während das Netz von Linz-Pichling unterschiedliche Knotenhöhen besitzt. Dies wirkt sich natürlich auf die Hydraulik im System aus und hat daher einen Einfluss auf die Ausbreitung der Effekte von Unsicherheiten des Verbrauchs, auf die Systemdrücke.

Nichtsdestotrotz ist eine Einbindung des Prozessrauschens in die Algorithmen zur optimalen Sensorplatzierung auch in diesem Fall wichtig. Aufgrund des Kriteriums, dass eine ideale Sensorplatzierung alle möglichen Leckagen im System registrieren und isolieren können muss, werden Sensoren an voneinander weit entfernten Punkten im System positioniert. Dies hat zur Konsequenz, dass der zweite oder dritte Sensor, der im Netz Linz-Pichling positioniert wird, sich im auf Leckagen empfindlichen Gebiet im Norden befinden wird. Die Punkte im Norden sind aber auch die sensitivsten Messpunkte in Bezug auf die Effekte des unsicheren Verbrauches, weswegen die Berücksichtigung dieser Tatsache optimalere und robustere Sensorplatzierungen erwarten lässt.

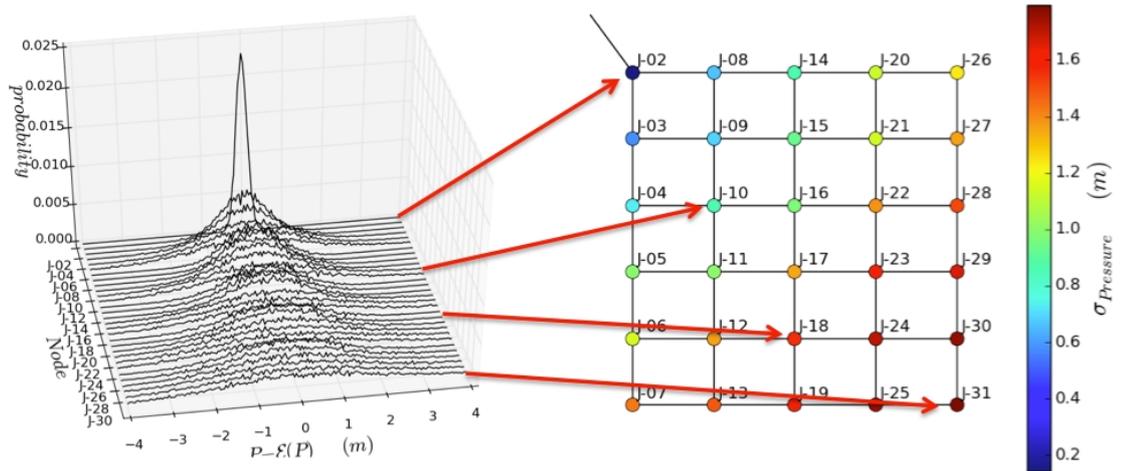


Abbildung 23: Darstellung der Auswirkung des Verbrauchsrauschens auf die Druckmesspunkte im System. Je weiter die Entfernung zum Zuflussknoten J-02, desto stärker wirkt sich das Rauschen im Netz von Poulakis aus.

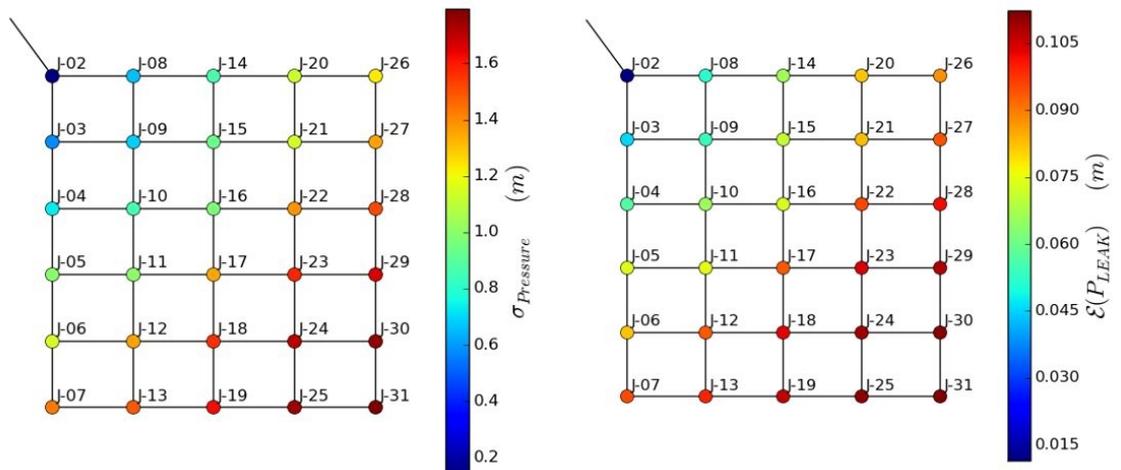


Abbildung 24: Auf der linken Seite ist das Rauschen in den Druckmesspunkten aufgrund von Verbraucherschwankungen dargestellt. Auf der rechten Seite sieht man den gemittelten Effekt von Leckagen verteilt im ganzen System auf die einzelnen Druckmesspunkte. Es ist ersichtlich, dass im Netz von Poulakis Knoten, die empfindlich auf Leckagen reagieren, auch die Knoten sind, an denen das Rauschen am stärksten ist.

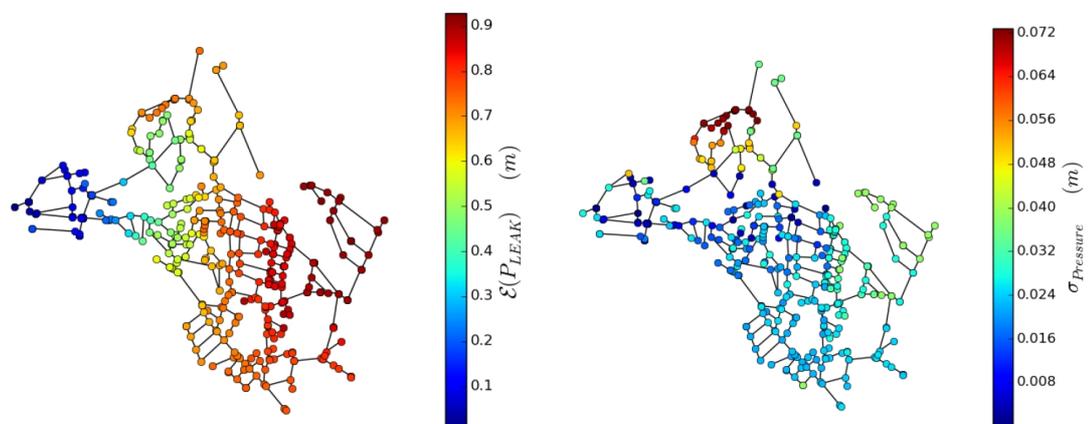


Abbildung 25: Gleiche Darstellung wie in Abbildung 24, allerdings für das Netz Linz-Pichling. Die farblichen Unterschiede in der linken und in der rechten Abbildung lassen sich damit erklären, dass im Netz Linz-Pichling

verschieden große Verbraucher an unterschiedlichen Positionen im Netz vorhanden sind. Zusätzlich besitzen die Knoten im Netz Linz-Pichling im Gegensatz zum Netz von Poulakis unterschiedliche Höhenlevels.

Wie das Prozessrauschen im idealen Sensorplatzierungsalgorithmus Berücksichtigung findet, wird in den nachstehenden Absätzen kurz erläutert. Diese Methode ist näher in (Steffelbauer & Fuchs-Hanusch, 2016a) beschrieben. Hierfür wurde der Ansatz von Casillas, welcher im Unterkapitel 4.1.2.6 (Seite 44) beschrieben wurde, erweitert. Die knotenbezogene Standardabweichung der Druckmessungen, die sich aufgrund der unsicheren Verbräuche ergibt, wird von den Residuen an den Knoten abgezogen,

$$\psi_{kj}(q) = \frac{(r_k^T - \omega \cdot \sigma_k)Q(q)s_j}{|Q(q)(r_k - \omega \cdot \sigma_k)||Q(q)s_j|}$$

wobei es sich bei ω um einen Gewichtungsfaktor handelt.

Dies führt dazu, dass Messpunkte mit einem hohen Rauschen bestraft werden, da die jeweiligen Residuen und die Sensitivitätsvektoren nicht mehr übereinstimmen, was zu einer Verkleinerung der mit diesen Werten errechneten Projektionen führt. Dies wirkt sich auf den daraus berechneten ε Parameter aus. Dadurch resultieren im Allgemeinen andere ideale Sensorpositionierungen, als sich ohne die Berücksichtigung des Rauschens ergeben hätten.

4.1.2.8 DISKUSSION DER VERWENDETEN ALGORITHMEN

Die oben beschriebenen Algorithmen zur idealen Sensorplatzierung unterscheiden sich in wesentlichen Punkten. Zum einen in der Rechenzeit, die sie benötigen, um das Problem zu lösen, zum anderen auch in den Voraussetzungen, welche für bestimmte Algorithmen vorhanden sein müssen. So ist für einige Algorithmen ein hydraulisches Modell notwendig, teilweise kombiniert mit Verbraucherinformationen, während andere komplett auf ein Modell verzichten. Dies macht sie leichter in der Anwendung, führt aber aufgrund dieser fehlenden Information zu nicht-optimalen Lösungen. Es sei hier noch erwähnt, dass ein ideales Sensorplacement immer ideal in Punkto einer zu definierenden Zielfunktion ist. Die Zielfunktionen in den vorgestellten Algorithmen unterscheiden sich, wodurch sie auch zu unterschiedlichen „idealen“ Sensorpositionen im System führen. Ein ideales Sensorplacement hängt daher sehr stark von der definierten Zielfunktion ab. Ignoriert ein Algorithmus zum Beispiel jegliche hydraulische Information, so ist fraglich, ob dieser Algorithmus ideal in dem Sinne ist, hydraulische Veränderungen, wie sie beim Auftreten einer Leckage entstehen, zu detektieren.

Im Folgenden werden Vor- und Nachteile der untersuchten Algorithmen genauer beschrieben. Eine Zusammenfassung der Vor- und Nachteile ist in Tabelle 2 zu finden.

Die Algorithmen **Shortest Path 1 und 2** benötigen kein hydraulisches Modell, es geht nur die Länge der Leitungen und die Topologie des Netzes ein. Dies macht den Algorithmus interessant um Sensoren in Systemen zu platzieren, in denen kein (kalibriertes) hydraulisches Modell existiert. Graphentheoretische Algorithmen sind aufgrund ihrer breiten Anwendung für vielfältige Fragestellungen bereits sehr ausgereift und in der Lösungsfindung sehr effizient. Das Sensorplatzierungsproblem kann daher mit graphentheoretischen Algorithmen auch bei großen Systemen auf normalen Rechnern rasch gelöst werden. Zusätzlich sind die Algorithmen leicht implementierbar, da ein EPANET-Modell mit geringem Programmieraufwand in einen mathematischen Graphen übersetzt werden kann. Den weitesten Abstand zu einer Quelle als Kriterium für Drucksensoren zu definieren macht logisch Sinn, da Drucksensoren nur „Upstream“ Signale registrieren. Die Maximierung der „Upstream“ Signale wird dadurch erzwungen. Zusätzlich führen diese Algorithmen auch zu einer guten Aufteilung der Sensoren über das ganze System. Allerdings stellt der Vorteil, dass kein hydraulisches Modell vorhanden sein muss, auch den hauptsächlichsten Nachteil dar. Da die Lokalisierung von Leckagen im AZM Projekt auf Messwerten von hydraulischen

Sensoren aufbaut, ist zu hinterfragen, ob diese Algorithmen für das Problem ideal im eigentlichen Sinn sind. Durch Weglassen der Hydraulik wird ignoriert, dass manche Positionen im System empfindlicher auf Leckagen reagieren als andere und der mathematische Zusammenhang der reinen Topologie des Netzes mit der bestmöglichen Platzierung für Sensoren für das Leckagelokalisierungsproblem ist rein mathematisch nicht gegeben ist.

Im Gegensatz dazu fußt der Ansatz mittels Maximierung der **Shannon Entropie** auf mathematischen Prinzipien aus der Informationstheorie und stellt somit einen gesicherten mathematischen Zusammenhang her. Zudem wird von einem hydraulischen Modell Gebrauch gemacht, es gehen also die hydraulischen Gleichungen über Sensitivitätsmatrizen in die Positionierung der Sensoren ein, was zu besseren idealen Positionen führen sollte. Allerdings stellt dies auch einen Nachteil dar, da hierfür ein hydraulisches Modell notwendig ist, welches mit entsprechendem Aufwand kalibriert werden muss. Es sei auch erwähnt, dass der informationstheoretische Begriff der Entropie recht schwer intuitiv zu verstehen ist. Außerdem ist bei großen Systemen mit hohen Rechenzeiten zu rechnen, einerseits aufgrund der Erstellung der Sensitivitätsmatrizen und andererseits aufgrund des wachsenden Lösungsraums des Sensorplacement-Problems. Dieses Problem ergibt sich im Allgemeinen bei jedem Ansatz, bei dem Sensitivitätsmatrizen verwendet werden.

Der Algorithmus von **Pérez** verwendet die binärisierte Sensitivitätsmatrix, macht also auch von der Verwendung eines hydraulischen Modells, mit allen Vor- und Nachteilen, Gebrauch. Zusätzlich geht die Binärisierung mit einem Informationsverlust einher, was unökonomisch ist, da die gesamte Information der Sensitivitätsmatrix zuvor mühevoll erzeugt werden muss, um sie danach wieder mit dem Aufwand der Binärisierung zu verlieren. Aber durch eine geeignete Wahl des Thresholds τ können Messunsicherheiten abgebildet werden, die richtige Wahl von τ stellt aber auch einen Nachteil dar.

Mit dem Ansatz von **Casillas** wird dieser Informationsverlust vermieden, da die vollständige Sensitivitätsmatrix genutzt wird, allerdings wieder einhergehend mit dem Aufwand, der mit der Erstellung eines hydraulischen Modells verbunden ist.

Aufbauend auf dem Ansatz von Casillas führt der **SPuDU** Ansatz zu noch robusteren Sensorplatzierungen, da zusätzlich zur Verwendung des hydraulischen Modells Unsicherheiten eingebaut werden können, welche sowohl aus unsicherem Verbrauch oder grundsätzlichen Unsicherheiten im hydraulischen Modell resultieren können. Dies führt aber zu einem noch höheren Rechenaufwand, da zum Einbinden der Unsicherheiten aufwendige Monte Carlo Simulationen durchgeführt werden müssen. Ein weiterer offener Punkt ist auch noch der Gewichtungsfaktor ω , der zusätzlich vom Benutzer gewählt werden muss.

TABELLE 2: ZUSAMMENFASSUNG DER VOR- UND NACHTEILE DIVERSE OPTIMALER SENSORPLACEMENT-ALGORITHMEN

Algorithmen	Vorteil	Nachteil
Shortest Path 1 & 2	Benötigt kein hydraulisches Modell Kurze Rechenzeiten auch bei großen Systemen Leicht implementierbar	Keine hydraulische Information Nicht fundierter Zusammenhang
Shannon Entropie	Mathematisch fundiert Hydraulische Information verwendet	Kalibriertes hydraulisches Modell wird benötigt Mathematisch komplex Hohe Rechenzeiten bei großen Systemen
Pérez	Hydraulische Information verwendet Unsicherheiten können teilweise eingebaut werden	Kalibriertes hydraulisches Modell wird benötigt

Algorithmen	Vorteil	Nachteil
		Hohe Rechenzeiten bei großen Systemen τ muss definiert werden Informationsverlust durch Binärisierung
Casillas	Hydraulische Information verwendet Kein Informationsverlust	Kalibriertes hydraulisches Modell wird benötigt Hohe Rechenzeiten bei großen Systemen
SPuDU	Hydraulische Information verwendet Verschiedene Unsicherheiten können behandelt werden Kein Informationsverlust	Kalibriertes hydraulisches Modell wird benötigt Sehr hohe Rechenzeiten bei großen Systemen ω muss definiert werden

4.1.3 STOCHASTISCHE MODELLIERUNG VON TRINKWASSERVERTEILNETZEN

In diesem Unterpunkt wird die Möglichkeit der stochastischen Modellierung von Trinkwassernetzen behandelt. Die Notwendigkeit und die Vorteile werden dargelegt. Wie bereits beschrieben, müssen zur Lösung des Leckagedetektions- und Lokalisierungsproblems Messungen hydraulischer Parameter im Wasserverteilnetz durchgeführt werden. Formal lässt sich der Messprozess \mathbf{P} als

$$\tilde{\mathbf{d}} = P(\text{Verbrauch, Leckage, etc.}) + \mathbf{v}$$

anschreiben, wobei der Vektor $\tilde{\mathbf{d}}$ die Messdaten enthält. Der Vektor \mathbf{v} bezeichnet das immanente Messrauschen. Das Messrauschen ist eine Eigenschaft der verwendeten Instrumentierung und sollte durch entsprechende Wahl der Sensoren gering sein. Der Zusammenhang zeigt, dass die Messgrößen vom Wasseraustritt an der Leckage, vom Wasserverbrauch der Kunden sowie zusätzlichen Größen des Verteilnetzes abhängen, welche an dieser Stelle mit etc. angeführt sind. Zu den zusätzlichen Größen zählen z.B. die Rauigkeiten und Durchmesser der Rohrleitungen. In der modellbasierten Leckageerfassung ist die Bestimmung von Leckagen aufgrund der vorliegenden Messwerte von Interesse.

Modelbasierte Ansätze zur Leckageerfassung basieren wie erwähnt auf dem Ansatz

$$|F(\text{Verbrauch}_{SIM}, \text{Leckage}_{SIM}, \text{etc}_{SIM}) - \tilde{\mathbf{d}}|^2 \rightarrow \min_{\text{Leckage}_{SIM}}$$

F bezeichnet hierbei das hydraulische Modell. Wie der Ansatz zeigt, versucht man in der modellbasierten Leckageerfassung, das Modell an die Messdaten anzupassen. Hierzu wird das hydraulische Modell für einen vorgegebenen Verbrauch und unter Vorgabe der sonstigen Parameter verwendet. Als „Stellschraube“ werden im Modell auch Leckagen simuliert. Leckagegröße und -ort werden solange verändert, bis das Modell möglichst gut mit den Messdaten übereinstimmt.

Der gezeigte Ansatz scheint trotz einiger Modifikationen optimal für das gestellte Problem zu sein. Gleichzeitig ist auch die Herausforderung des modellbasierten Ansatzes dadurch erkennbar, dass der Verbrauch und weitere Randbedingungen für die Simulation bekannt sein müssen. Diese Voraussetzung ist in der Trinkwasserversorgung nicht gegeben. Der Verbrauch stellt somit wie bereits erwähnt eine der Unsicherheiten bei der Modellierung dar.

Die stochastische Modellierung von Systemen stellt einen möglichen Zugang zur Einbindung solcher Unsicherheiten dar. In der stochastischen Modellierung geht man dazu über, sämtliche Variablen als Zufallsvariablen zu modellieren. Die Beschreibung aller Größen erfolgt bei der stochastischen Modellierung

nicht mehr durch einen Zahlenwert, sondern über beschreibende Verteilungsdichtefunktionen und falls möglich über zusammenfassende Statistiken. Der Vorteil dieses Ansatzes ist, dass Unsicherheiten in geschlossener Form beschrieben und analysiert werden können.

4.1.3.1 DIFFERENTIELLES HYDRAULISCHES MODELL

Im Folgenden soll der Ansatz der stochastischen Modellierung für unsichere Verbraucher gezeigt werden. Dem Konzept der Behandlung aller Variablen als Zufallsvariablen folgend, wird der Verbrauchsfluss q_D als Zufallsvariable Q_D beschrieben. Die Auswirkung der Unsicherheit wird im statistischen Rahmen als Abweichung des tatsächlichen Verbrauchs zu dessen Erwartungswert untersucht. Das hydraulische Gesamtmodell wird hierzu zu

$$A^T(C(\Delta p) + dC)(A(p + dp) - p_h) = q_D + dq_D + q_E + dq_E$$

erweitert, wobei alle mit d beginnenden Terme differentielle Abweichungen der betreffenden Größen bedeuten. Es ist festzuhalten, dass die differentielle Terme keine Ableitungen darstellen, sondern differentielle Änderungen repräsentieren. Entwickelt man diese erweiterte Modellgleichung, so enthält dieser wiederum das nichtlineare hydraulische Modell für den stationären Zustand. Dieses kann subtrahiert werden, womit sich ein Ausdruck der Form

$$\text{Linke Seite} = dq_D + dq_E$$

ergibt. Der als „Linke Seite“ bezeichnete Ausdruck drückt die Abhängigkeiten zwischen dem nichtlinearen hydraulischen Modell und den differentielle Termen aus.

4.1.3.2 LINEARISIERTES DIFFERENTIELLES HYDRAULISCHES MODELL

Um die Einflüsse untersuchen zu können, wird an dieser Stelle eine Taylorreihenentwicklung für die „Linke Seite“ und die differentielle Flüsse $dq_D + dq_E$ durchgeführt. Diese ergibt:

$$A^T \left[\frac{\partial q(\Delta p)}{\partial \Delta p} \right] A dp = dq_D + \left[\frac{\partial q_D}{\partial p} \right] dp + \left[\frac{\partial q_E}{\partial p} \right] dc_e$$

Die in den eckigen Klammern angeführten Terme sind Jacobimatrizen und enthalten Sensitivitätsinformation. Es ist zu beachten, dass sich für Emitterflüsse zwei Ableitungsterme ergeben, da sowohl Sensitivität gegenüber dem Druck, als auch gegenüber den Emitterkoeffizienten selber gegeben ist. Der Ansatz erlaubt es somit auch Unsicherheiten in den Emitterkoeffizienten selbst zu betrachten.

In weiterer Folge sollen die Ableitungsmatrizen betrachtet werden:

Die Matrix

$$C = \left[\frac{\partial q(\Delta p)}{\partial \Delta p} \right]$$

ist die linearisierte Widerstandsmatrix. Die Elemente dieser Matrix können direkt aus der Ableitung des Widerstandsgesetzes gewonnen werden.

Die Matrix

$$\mathbf{S}_E = \begin{bmatrix} \partial \mathbf{q}_E \\ \partial \mathbf{p} \end{bmatrix}$$

drückt die Druckabhängigkeit von Emitterflüssen aus. Auch diese Matrix kann durch Ableitungsbildung des entsprechenden Emitterflusses gebildet werden.

Die Matrix

$$\mathbf{S}_C = \begin{bmatrix} \partial \mathbf{q}_E \\ \partial \mathbf{c}_E \end{bmatrix}$$

beschreibt die Abhängigkeit des Emitterflusses zufolge von Unsicherheiten im Emitterkoeffizienten. Das linearisierte hydraulische Modell für differentielle Abweichungen hat somit die Form

$$\mathbf{K}d\mathbf{p} = d\mathbf{q}_D + \mathbf{S}_p d\mathbf{p} + \mathbf{S}_e d\mathbf{c}_e$$

Die Beschreibung enthält Leitungen, Verbrauchsflüsse sowie Emitterflüsse. Weitere hydraulische Komponenten können mit dem gezeigten Weg jederzeit eingebunden werden.

4.1.3.3 MOMENTENBERECHNUNG FÜR VERBRAUCHSFÄLLE

Das linearisierte hydraulische Modell für differentielle Abweichungen kann vorteilhaft zur stochastischen Modellierung verwendet werden. Wir sind an einer Beschreibung der ersten und der zweiten Momente der Zufallsvariablen interessiert. Die differentielle Abweichungen werden durch Mittelwerte und Kovarianzmatrizen beschrieben.

Zur weiteren Analyse wird für das Gleichungssystem eine Partitionierung nach den Knoten vorgenommen. Knoten mit reinen Verbrauchsflüssen werden erstgerieht, Knoten mit Emitterflüssen werden zweitgerieht. Dies führt zur Partitionierung

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{12} \\ \mathbf{K}_{21} & \mathbf{K}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\mathbf{p}_1 \\ d\mathbf{p}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d\mathbf{q}_D \\ \mathbf{S}_E d\mathbf{p}_2 + \mathbf{S}_C d\mathbf{c}_e \end{bmatrix}$$

Auf Basis dieser Darstellung können statistische Modelle für alle hydraulischen Fälle entwickelt werden. Die Fallunterscheidung erfolgt nachstehend für einige ausgewählte Fälle.

Für den Fall, dass im hydraulischen Modell nur normale Verbraucher vorliegen, vereinfacht sich das linearisierte hydraulische Modell für differentielle Abweichungen zu

$$\mathbf{K}d\mathbf{p} = d\mathbf{q}_D$$

Der Erwartungswert von Verbraucherschwankungen auf die Leitungsdrücke ergibt sich somit zu

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\mu}_{d\mathbf{p}} &= \mathcal{E}\{\mathbf{K}^{-1}d\mathbf{q}_D\} \\ &= \mathbf{K}^{-1}\mathcal{E}\{d\mathbf{q}_D\} \end{aligned}$$

Da $\mathcal{E}\{dq_D\}$ für gewöhnlich mit Null angesetzt wird, zeigt die stochastische Modellierung, dass Verbrauchsschwankungen keine Auswirkung auf den Mittelwert des Drucks besitzen. Von Interesse ist in weiterer Folge die Variation des Drucks zufolge von Verbrauchsschwankungen.

Dies lässt sich mit

$$\Sigma_{dp} = \mathcal{E}\{dpdp^T\} = \mathbf{K}^{-1}\mathcal{E}\{dq_Ddq_D^T\}\mathbf{K}^{-T} = \mathbf{K}^{-1}\Sigma_{dq_D}\mathbf{K}^{-T}$$

angeben.

Die Unsicherheit in den Leitungsflüssen ergibt sich somit zu

$$\Sigma_{dq} = \mathbf{CAK}^{-1}\Sigma_{dq_D}\mathbf{K}^{-T}\mathbf{A}^T\mathbf{C}^T$$

In gleicher Art und Weise lassen sich die Kovarianzmatrizen für den reinen Emitterflussfall, sowie für den gemischten Fall ableiten. Für den gemischten Fall wird das linearisierte hydraulische Modell für differentielle Abweichungen in die Form

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{12} \\ \mathbf{K}_{21} & \mathbf{K}_{22} - \mathbf{S}_E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dp_1 \\ dp_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dq_D \\ \mathbf{S}_C dc_e \end{bmatrix}$$

übergeführt. Die weiteren Rechenschritte verlaufen analog.

4.1.3.4 ANWENDUNG DES STOCHASTISCHEN MODELS

Die Ergebnisse der stochastischen Modellierung können in der Gesamtmodellierung des hydraulischen Prozesses verwendet werden. Zu Beginn dieses Kapitels wurde der hydraulische Messprozess als

$$\tilde{\mathbf{d}} = P(\text{Verbrauch, Leckage, etc.}) + \mathbf{v}$$

vorgestellt. Die Messdaten $\tilde{\mathbf{d}}$ werden durch das Messrauschen \mathbf{v} gestört. Das Messrauschen ist mittelwertfrei und wird durch die Kovarianzmatrix $\Sigma\mathbf{v}$ beschrieben.

Wie Eingangs des Kapitels dargestellt, stellen die Verbrauchsflüsse eine Zufallsvariable dar. Die Messdaten $\tilde{\mathbf{d}}$ unterliegen somit nicht nur einer zufälligen Variation durch das Messrauschen \mathbf{v} , sondern werden auch durch die Zufälligkeit des Verbrauches stochastisch variiert. Die Instrumentierung sollte grundsätzlich so gewählt werden, dass ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis gewährleistet ist. Das Messrauschen wird somit gering. Zufällige Verbrauchsschwankungen hingegen erzeugen ebenfalls eine stochastische Komponente, die nicht reduziert werden kann.

Die differentielle Modellierung des hydraulischen Modells ergab, dass Variationen durch zufällige Verbraucher als additiver Term

$$\tilde{\mathbf{d}} = P(\text{Verbrauch, Leckage, etc.}) + dP(d\text{Verbrauch, etc.}) + \mathbf{v}$$

modelliert werden können. Der Term dP ($d\text{Verbrauch, etc.}$) stellt die differentielle Änderung der Messdaten zufolge von Verbrauchsschwankungen dar. In der stochastischen Modellierung wird diese Variation als Zufallsvariable beschrieben. Dies führt zur stochastischen Modellgleichung

$$\tilde{\mathbf{d}} = P(\text{Verbrauch, Leckage, etc.}) + \mathbf{v}_P + \mathbf{v}$$

Wobei v_P als Prozessrauschen bezeichnet wird. Das erste und das zweite Moment von v_P können mit Hilfe des linearisierten differentiellen hydraulischen Modells beschrieben werden.

Für mittelwertfreie Verbrauchsschwankungen unter Anwendung der zweiten Momente führt dies zur stochastischen Beschreibung des hydraulischen Prozesses als

$$\tilde{D} \propto N(\tilde{d}, \Sigma_p + \Sigma_v)$$

wobei N die Normalverteilung beschreibt.

4.1.3.5 NUMERISCHE ÜBERPRÜFUNG

Zur Überprüfung der theoretischen Ergebnisse wurden vergleichende Simulationen durchgeführt. Abbildung 26 zeigt das für die Analysen verwendete Netz aus Poulakis et al., 2003. Jeder Knoten stellt darin eine Entnahmestelle mit konstantem Verbrauch dar.

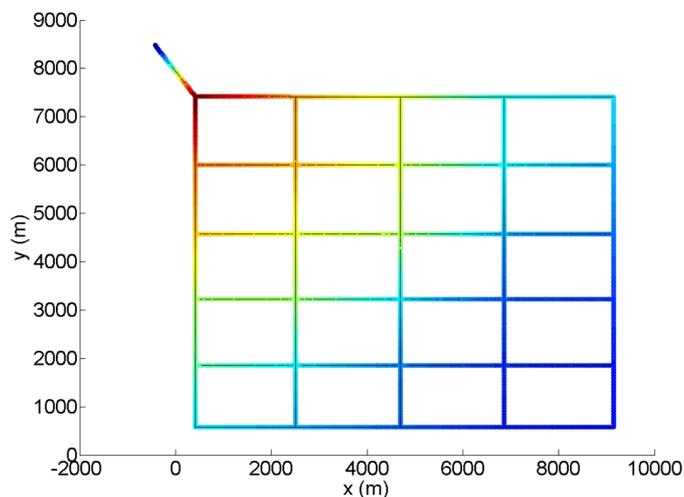


Abbildung 26: Netz zur numerischen Validierung der Ergebnisse. Der Farbverlauf zeigt die lokalen Druckverhältnisse entlang der Leitungen.

Zur Analyse des Einflusses von Verbrauchsschwankungen wurden zunächst Monte-Carlo Simulationen durchgeführt, Abbildung 27 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchung. In der Analyse wurde die Verbrauchsvariation als gleichverteilte Zufallsvariable mit einer Streuung von 10 % des Nominalwertes angesetzt. Die Histogrammanalyse der Druckverläufe zeigt, dass diese gegen eine Gaußverteilung konvergieren. Dieses Verhalten ist auf den zentralen Grenzwertsatz zurückzuführen. Es bestätigt auch den gewählten Ansatz der stochastischen Modellierung, welcher die Verwendung des ersten und des zweiten Moments vorsieht.

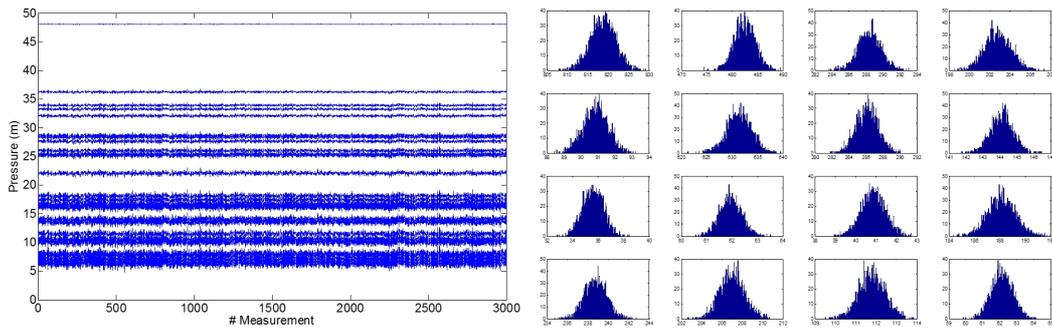


Abbildung 27: Monte Carlo Analyse zur Untersuchung der Druckvariation aufgrund von Verbrauchsvariationen

Abbildung 27 zeigt auf der rechten Seite die Standardabweichung der Durchflüsse in den Strängen des Verteilnetzes, der blau gezeichnete Verlauf zeigt das Ergebnis der Monte Carlo Analyse. Der ebenfalls in blau gezeichnete Verlauf wurde mit dem linearisierten differentiellen hydraulischen Modell berechnet und den Ergebnissen einer EPANET-Simulation gegenübergestellt. Die gute Übereinstimmung zeigt die Korrektheit der theoretischen Ergebnisse.

4.1.3.6 RECHENTECHNISCHE ANWENDUNG

Die stochastische Modellierung kann in weiterer Folge für verschiedene Anwendungen genutzt werden. In den folgenden Kapiteln wird das stochastische Modell für die Anwendungen im

- Sensorplacement und der
- Leckageerfassung

genutzt. Vornehmlich wird die Kovarianzinformation Σ_p in die Ansätze eingebracht. Die Berechnung von Σ_p kann, wie im vorhergehenden Abschnitt gezeigt, mit Hilfe von Monte-Carlo Simulationen erfolgen. Allerdings können die Ergebnisse, wie in Abbildung 28 dargestellt, auch direkt mit Hilfe des linearisierten differentiellen hydraulischen Modells und der Simulationsergebnisse des hydraulischen Modells berechnet werden. Dies soll am Beispiel der Kovarianzmatrix für den Durchfluss gezeigt werden.

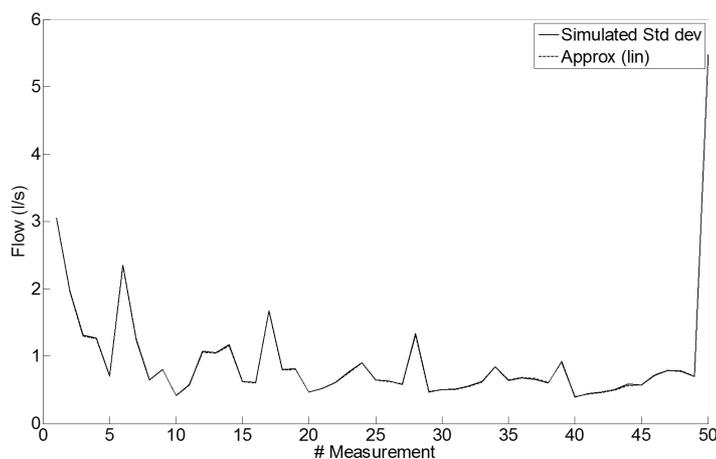


Abbildung 28: Standardabweichung der Strangflüsse als Folge des Prozessrauschens. Die Ergebnisse des statistischen Modells (gestrichelte Linie) stimmen mit den Ergebnissen der Monte Carlo Analyse (durchgezogen) überein

Die Berechnung erfolgt über den Zusammenhang

$$\Sigma_{dq} = \mathbf{CAK}^{-1}\Sigma_{dqD}\mathbf{K}^{-T}\mathbf{A}^T\mathbf{C}^T$$

Die Matrix \mathbf{K} folgt der Zerlegung

$$\mathbf{K} = \mathbf{A}^T\mathbf{CA}$$

Die Inzidenzmatrix \mathbf{A} lässt sich direkt aus dem Input-File des hydraulischen Simulators (z.B. EPANET) erstellen. Die Matrix \mathbf{C} enthält die Ableitungen der Widerstandsmodelle. Diese lassen sich direkt aus den Simulationsmodellen einer hydraulischen Simulation bestimmen.

Nach der Durchführung einer hydraulischen Simulation stehen somit alle notwendigen Matrizen zur Verfügung und die Auswertung von Σ_{dq} kann direkt erfolgen. Der rechentechnische Aufwand reduziert sich von einer konventionellen Monte-Carlo-Analyse zur Lösung eines linearen Gleichungssystems. Weitere rechentechnische Vorteile lassen sich durch Beziehungen der linearen Algebra erreichen.

Ebenso erlaubt das gewonnene Modellwissen die effiziente und hinsichtlich der Numerik verbesserte Berechnung von wichtigen Ableitungsausdrücken.

4.1.4 DATENMANAGEMENT UND AUTOMATISIERUNG

Für die ideale Sensorplatzierung und die modellbasierte Leckageeingrenzung ist es notwendig, Messdaten aus dem Feld mit der hydraulischen Simulationssoftware EPANET zu verknüpfen. Hierzu wurden am Institut für Siedlungswasserwirtschaft Softwarelösungen entwickelt, die diese Aufgaben übernehmen. So stellt das Programm OOPNET eine Programmierschnittstelle zwischen Python und EPANET dar, die die Programmierung der Leckageeingrenzungs- und idealen Sensorplatzierungsalgorithmen wesentlich vereinfacht (Steffelbauer & Fuchs-Hanusch, 2015). Die Messdaten werden in eine Datenbank gespielt, die sehr effektiv für Zeitserien ist. Aus dieser Datenbank können die Messdaten direkt im Web mittels der Software Grafana visualisiert werden. Schnittstellen in Python ermöglichen die Verwendung dieser Daten in den entwickelten Algorithmen. Durch die Software Jenkins können Prozesse automatisiert werden (Datenimport, Validierung, Alarmierung etc.) bzw. können die Algorithmen zur Leckagelokalisierung und idealen Sensorplatzierung auch von Benutzern verwendet werden, die über keine Programmiererfahrung verfügen.

4.1.4.1 OOPNET

OOPNET (**Object-Oriented Python Network Analysis Tool**) ist eine auf Python basierende objektorientierte Schnittstelle zu EPANET (Steffelbauer & Fuchs-Hanusch, 2015), entwickelt am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der Technischen Universität Graz. Python wurde als Programmiersprache gewählt, da sie durch ihre klare und übersichtliche Syntax als sehr einfach zu erlernen gilt. Da der Anwendungsbereich von OOPNET im Bauingenieurwesen liegt, soll die Software auch Bauingenieuren, die im Allgemeinen wenig bis keine Erfahrungen in der Programmierung haben, die Möglichkeit bieten, eigene Programme und Algorithmen zu schreiben.

Die objektorientierte Struktur von OOPNET ermöglicht des Weiteren, einen einfachen Zugriff auf die einzelnen Elemente und Eigenschaften eines TVN. Dadurch können auch sehr komplexe Probleme sehr einfach und übersichtlich gelöst werden.

EPANET Input-Dateien können mittels OOPNET eingelesen, manipuliert und mit der EPANET Kommandozeilenschnittstelle simuliert werden, während die Ergebnisse anschließend grafisch dargestellt

werden können. Zusätzlich ermöglicht OOPNET ein paralleles Ausführen von EPANET Simulationen. Damit wird die Geschwindigkeit der Leckageeingrenzungsalgorithmen oder Monte Carlo Analysen wesentlich auf modernen Mehrkernprozessoren beschleunigt.

4.1.4.2 OPENSDBM, ZEITSERIENDATENBANK UND GRAFANA

OpenSDM (**Open Sensor Data Management Tool**, (Camhy D. et al., 2014)) ist ein ebenfalls am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der Technischen Universität Graz entwickeltes Datenmanagement-Programm. Es ermöglicht das Abspeichern von Sensordaten in einer Zeitseriendatenbank. Zusätzlich zu den Daten können Metadaten abgespeichert werden. Diese Metadaten beinhalten zum Beispiel: den Ort an dem die Daten generiert wurden, den Typ und die Seriennummer des Sensors, die Messgenauigkeit des Sensors, Zeiten an denen der Sensor gewartet wurde, für welchen Bereich die Daten gültig sind, wann den Daten nicht mehr vertraut werden darf oder welche zusätzlichen Sensoren sich in einer Messstation befinden. Dies ermöglicht eine automatisierte Vorvalidierung der Messdaten bzw. eine automatisierte Alarmierung, wenn der Sensor auffälliges Verhalten zeigt (z.B. Messdaten befinden sich außerhalb eines Bereichs, Drifterkennung etc.).

InfluxDB (<https://www.influxdata.com/time-series-platform/influxdb/>) ist eine Open-Source Zeitseriendatenbank, die von OpenSDM verwendet wird. Die Datenbank ist optimiert für schnelles Speichern und Laden von Zeitserien auf hochverfügbaren Speichersystemen. Dies ermöglicht eine schnelle Verarbeitung von Messdaten.

Zusätzlich beinhaltet OpenSDM Python Programme, die die Daten von verschiedenen Quellen in verschiedenen Formaten einlesen und in InfluxDB konvertieren können. Ferner wird ein Backup der Daten im NetCDF4 Format durchgeführt, welches mit jeder gängigen Programmiersprache gelesen werden kann. Für die Zeitseriendatenbank stehen zusätzlich Algorithmen in Python zur Verfügung, die die Daten direkt aus der Datenbank lesen können. OpenSDM bildet somit die Schnittstelle zwischen den Messdaten und den in Python entwickelten Algorithmen zur Leckagelokalisierung und idealen Sensorplatzierung.

Grafana (<http://grafana.org/>) ist ein Open-Source Programmpaket zur Visualisierung von Daten auf Webservern. Es ermöglicht die Einbindung von InfluxDB. Mittels dieses Programmpakets können die Messdaten visuell aufbereitet werden und einfache statistische Operationen und Abfragen können auf die Sensordaten direkt in einem Browser angewendet werden.

4.1.4.3 JENKINS

Jenkins (<https://jenkins.io/>) ist ein Open-Source Automatisierungsserver. Im AZM-Projekt übernimmt Jenkins verschiedene Aufgaben. Eine Aufgabe ist die Automatisierung des Datentransfers, Daten können damit zum Beispiel mit Jenkins in regelmäßigen zeitlichen Abständen von FTP-Servern abgeholt werden und automatisch in die Zeitseriendatenbank in OpenSDM importiert werden.

Darüber hinaus ermöglicht Jenkins auch das Ausführen der im Projekt entwickelten Algorithmen zur Leckageeingrenzung und idealen Sensorplatzierung in einer Web-Oberfläche. Dies ist insofern für BenutzerInnen praktisch, die wenig bis gar keine Erfahrung in der Programmierung haben. Es müssen keine Compiler, Interpreter oder Programmpakete installiert werden, es müssen nur das Programm im Web ausgeführt, sowie diverse Input-Parameter definiert werden. Die Simulationsergebnisse können dann entweder direkt in Jenkins oder in einer anderen Datenbank gespeichert werden. Es besteht auch die Möglichkeit, die Ergebnisse nach der Berechnung automatisch per Email zu versenden.

Projekt sww_azm_leakage_localization
Full project name: azm/sww_azm_leakage_localization

Build-Verlauf Trend ^

Build #	Time	Size
#385	31.10.2016 16:39	266 KB
#384	31.10.2016 16:23	361 KB
#383	31.10.2016 15:20	770 KB
#382	31.10.2016 13:06	354 KB
#381	31.10.2016 11:18	765 KB
#380	31.10.2016 09:01	765 KB
#379	31.10.2016 08:02	903 KB
#378	30.10.2016 18:38	782 KB
#377	29.10.2016 16:45	780 KB
#376	29.10.2016 15:41	793 KB
#375	29.10.2016 14:31	785 KB
#374	29.10.2016 13:09	791 KB
#373	28.10.2016 19:47	829 KB
#372	28.10.2016 17:46	832 KB
#371	28.10.2016 17:36	161 KB

Arbeitsbereich

Artefakte des letzten erfolgreichen Builds

File	Size	Action
hist_ce.png	16,88 KB	view
hist_distances.png	20,24 KB	view
hist_leakage.png	18,20 KB	view
hist_outflow.png	18,77 KB	view
leak_plot.png	7,15 KB	view
output.txt	6,72 KB	view

Letzte Änderungen

Disk Usage

Category	Usage
Job	221 MB
All builds	221 MB
Locked builds	-
All workspaces	10 MB
Slave workspaces	10 MB
Non-slave workspaces	-

Permalinks

- [Letzter Build \(#385\), vor 3 Monate 16 Tage](#)
- [Letzter stabiler Build \(#383\), vor 3 Monate 16 Tage](#)
- [Letzter erfolgreicher Build \(#383\), vor 3 Monate 16 Tage](#)
- [Letzter fehlgeschlagener Build \(#385\), vor 3 Monate 16 Tage](#)
- [Letzter erfolgloser Build \(#385\), vor 3 Monate 16 Tage](#)
- [Last completed build \(#385\), vor 3 Monate 16 Tage](#)

Abbildung 29: Screenshot Jenkins Web-Plattform - Nutzung Parameterkonfiguration und anschließende Ausführung der Leckageeingrenzungsalgorithmen

Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass der Benutzer mit Jenkins immer die aktuellste Version des Programmcodes verfügbar hat, da der Code des Algorithmus direkt aus einem Versionsverwaltungsprogramm (z.B. GIT) ausgecheckt wird, bevor das Programm gestartet wird. Somit können mögliche Programmfehler behoben bzw. Verbesserungen im Code vorgenommen werden, ohne dass das Programm neu installiert werden muss. Zusätzlich ermöglicht Jenkins auch verteiltes Rechnen auf mehreren Prozessoren und Rechnern.

4.2 LABORMODELL

Das am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der TU Graz entwickelte experimentelle Trinkwasserversorgungsnetz (EWDS-TUG) stellt ein einmaliges Instrument zum Testen und Entwickeln mathematischer Modelle von Trinkwasserverteilnetzen dar. Grundsätzlich stellt diese Form von Versuchen eine im Vergleich zu Versuchen und Experimenten in realen Versorgungssystemen kostengünstige Variante dar. Dieser Umstand macht das EWDS-TUG besonders attraktiv, da im skalierten System grundlegende Fragestellungen, wie z. B. der Einfluss der Kalibrierung des hydraulischen Modells auf die Zuverlässigkeit der modellgestützten Leckageeingrenzung, untersucht werden können.



Abbildung 30: Vollausbau des experimentellen Trinkwasserverteilnetzes im Technikum des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der TU Graz

Das Labormodell wurde während der gesamten Projektlaufzeit immer weiterentwickelt. So war es im ersten Ausbaustand des Projektes nur möglich, einzelne Leckagen durch manuelles Öffnen von Ventilen zu simulieren und den Verbrauch im Netz mit einem Schieber am Auslass des Labormodells zu regeln.

Das EWDS-TUG im Vollausbau erlaubt neben der Simulation von skalierten Tagesganglinien, basierend auf realen Einspeisemessungen, auch die Steuerung bzw. ein kontrolliertes Zu- und Wegschalten einzelner Verbraucher. Dieses hochgradig bestimmte System ermöglicht zudem, den Mehrwert von exakten Verbrauchermessungen zu untersuchen. Eine Vielzahl an wissenschaftlichen Fragestellungen kann mit Daten, generiert mit dem EWDS-TUG, bearbeitet werden. Neben dem Testen der mathematischen Ansätze besteht die Möglichkeit, die Anforderungen hinsichtlich der Auflösung der Daten genauer zu betrachten. Beispielsweise spielt die Auflösung für eine konventionelle Wasserbilanz nur eine untergeordnete Rolle, beim Erkennen auftretender Rohrbrüche dagegen ist eine höhere Auflösung der erfassten Daten notwendig, um hydraulische Veränderungen rasch erkennen zu können.

Die durchgeführten Experimente zum Zwecke der Evaluierung der Leck-Eingrenzungsmethodik sind eindeutig beschrieben und können jederzeit im Labor unter denselben Randbedingungen reproduziert werden.

Nachfolgend wird das Labormodell mit seinen einzelnen Komponenten detailliert beschrieben. Neben den verwendeten Materialien und der installierten Messtechnik wird auf die Steuerung des Modells und die Verarbeitung und Visualisierung der Daten eingegangen.

4.2.1 KONSTRUKTION UND AUFBAU

Grundlegende Idee des Labormodellaufbaus war es, das als kalibriertes hydraulisches Modell verfügbare Teilnetz „Linz-Pichling“ soweit zu vereinfachen, dass es maßstabsgetreu im Technikum nachgebaut werden kann.

Beim Teilnetzes Linz-Pichling handelt es sich um ein Trinkwasserverteilnetz mit folgenden bekannten Eckdaten:

- Versorgungsdruck im Einspeisepunkt (Solldruck 4.2 bar)
- Durchflussdaten im Übergabeschacht in das nächste Teilnetz (Ausspeisepunkt)
- Verbrauch an den einzelnen Knoten (synthetische Tagesganglinien auf Basis gemessener Zählerdaten)

Zusätzlich sind aus dem zur Verfügung gestellten hydraulischen Modell Druck und Durchfluss an den einzelnen Knoten und Kanten bekannt (Druck an Knoten, Durchfluss an Kanten). Informationen über Leitungsmaterial, Durchmesser, Einbaujahr und etwaigen Schäden sind ebenfalls bekannt und in einem Geografischen Informationssystem (GIS) erfasst. In Abbildung 31 ist die Topologie des Pilotnetzes ersichtlich. Das physische Trinkwasserverteilnetz weist eine Länge von rund 41 km (Transport- und Versorgungsleitungen) auf. Die im Netz verwendeten Leitungsmaterialien sind vorwiegend Asbestzement, Sphäroguss sowie Polyethylen. Je nach Funktion der Leitungen variieren die Nennweiten zwischen DN 25 und DN 400.

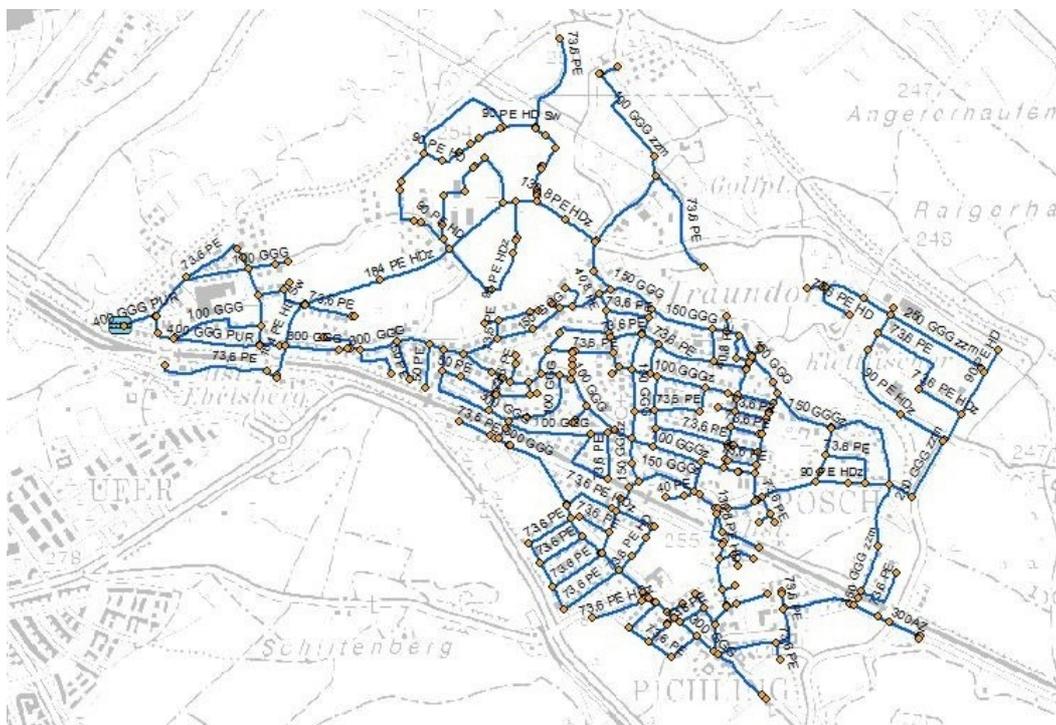


Abbildung 31: Teilnetz Linz-Pichling

Das hydraulische Modell des Pilotnetzes wurde seitens der Linz AG als EPANET *.inp File übermittelt. Mit der Open Source Software für hydraulische Modellierungen von Trinkwasserverteilnetzen der Environmental Protection Agency (EPA) EPANET (Rossman, 2000) ist es möglich, mit den gegebenen Randbedingungen hydraulische Simulationen durchzuführen.

Auf Basis des hydraulischen Modells sollte in weiterer Folge das experimentelle Trinkwasserverteilnetz entwickelt werden.

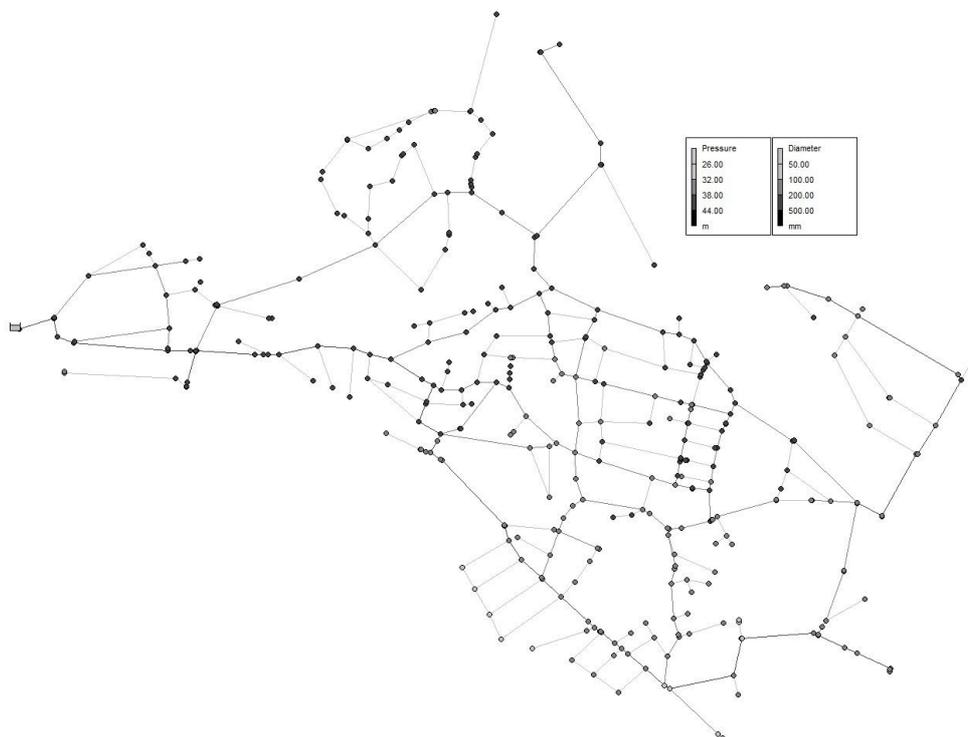


Abbildung 32: Hydraulisches Modell Linz-Pichling

Das in Abbildung 32 dargestellte hydraulische Modell der Pilotregion Linz-Pichling besteht aus 392 Knoten (Nodes) und 452 Kanten (Links) mit einer Länge von rund 37 km. Die Differenz von 4 km im Vergleich zum GIS-Modell resultiert aus Vereinfachungen, die bei der hydraulischen Modellbildung getroffen wurden. Beispielsweise kann der Verbrauch einzelner an Stichleitungen situierter Wasserabnehmer am nächstgelegenen Knoten angesetzt werden. Der Einspeisepunkt wird in diesem Fall als Reservoir modelliert. In der Realität befindet sich an diesem Punkt ein Übergabeschacht mit eingebautem Druckreduzierventil und einem Solldruck von 4.2 bar.

Das Pilotnetz Linz-Pichling ist ein vermaschtes Versorgungssystem, welches zudem einige Stichleitungen aufweist. Auch im Zuge der Planung des Labormodells wurde darauf Rücksicht genommen, sowohl Ringleitungen, als auch Stichleitungen für unterschiedliche hydraulische Fragestellungen vorzusehen. Als Skalierungsfaktor zwischen realem Netz und Labornetz wird die Fließgeschwindigkeit herangezogen. Diese erreicht im Pilotnetz im Maximallastfall bis zu 1.7 m/s. Im Großteil des Systems liegen die Geschwindigkeiten deutlich unter 1 m/s.

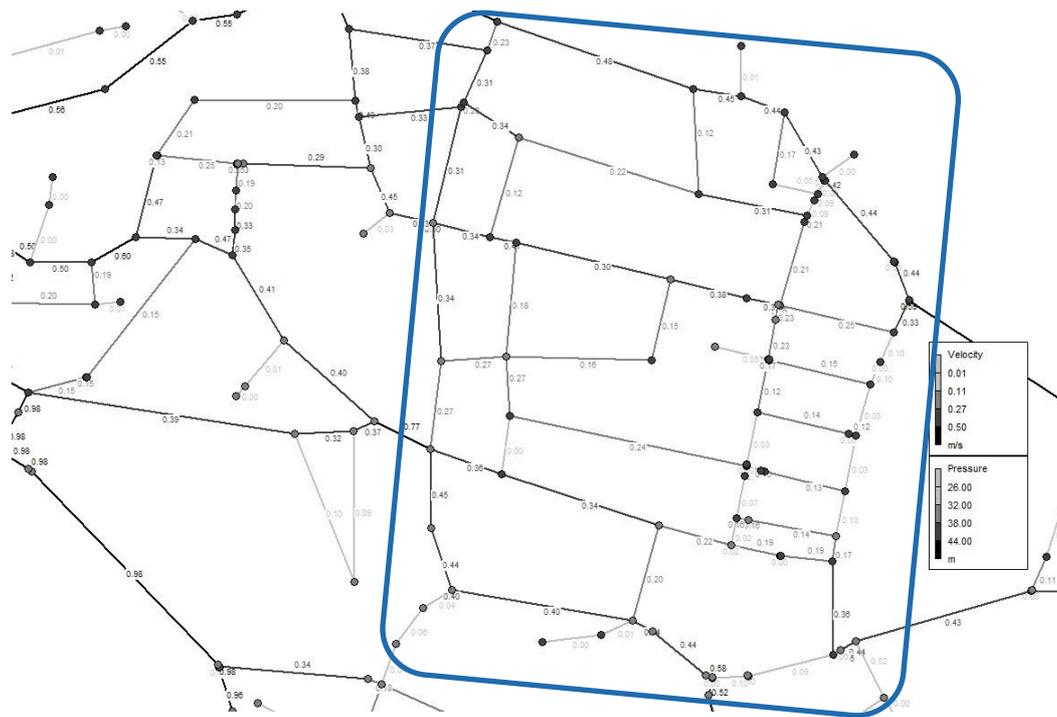


Abbildung 33: Ausschnitt Fließgeschwindigkeiten Linz-Pichling

In Abbildung 33 sind die Fließgeschwindigkeiten im Durchschnittslastfall eines Teilnetzes von Linz-Pichling dargestellt. Der blau umrahmte Teilbereich diente als Vorlage für die Erstellung und Planung des Labormodells. Fließgeschwindigkeiten und Durchflüsse wurden in diesem Teilnetz detailliert ausgewertet.

Dieses Teilsystem enthält drei verschiedene Nennweiten: DN 150, DN 100, DN 80. Einen limitierenden Faktor für die Größe des experimentellen Labornetzes stellte das Platzangebot im Technikum des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der TU Graz dar. Die Anzahl der Knoten und Leitungen des in Abbildung 33 gekennzeichneten Subnetzes sind jedoch für eine Skalierung geeignet.

Der angesprochene Teilbereich wurde in ein (bezogen auf Durchmesser und Abschnittslängen) verkleinertes Rechenmodell überführt und erneut mit EPANET modelliert. Druck und Fließgeschwindigkeit wurden dabei auf das reale Teilnetz abgestimmt. Die Leitungen im Pilotnetz Linz-Pichling wurden mit betrieblichen Rauigkeiten von 0.1 mm bis 0.5 mm modelliert. In der betrieblichen Rauigkeit sind auch Widerstände von Einbauten wie Schieber, Krümmer etc. berücksichtigt. Die betrieblichen Rauigkeiten sind grundsätzlich höher als die technische Rauigkeit verschiedener Materialien. Im Labornetz kamen andere Materialien als im realen Netz zum Einsatz. Er wurde je Leitungsstrang die technische Rauigkeit (PE ~ 0.001 mm) angesetzt. Zusätzlich wurden in den Bereichen von Kreuzungen und Krümmern Einzelverlustbeiwerte angesetzt. Diese wurden über Kalibrierungsmessungen bestimmt und hängen nicht nur von der Bauart der Einbauten, sondern auch von der Durchströmungsrichtung des Bauteiles ab. Für unterschiedliche Versuchsanordnungen ergeben sich dadurch auch unterschiedliche Widerstandsbeiwerte.

Zusammenfassend wurde beim Entwurf und bei der Planung des Labornetzes darauf geachtet, die hydraulischen Rahmenbedingungen des Pilotnetzes weitestgehend nachzubilden. Im Speziellen wurden die Druckverhältnisse den realen Verhältnissen angeglichen. Das experimentelle Trinkwasserversorgungssystem kann für Versuche demnach mit Druckverhältnissen, wie sie in österreichischen Trinkwassernetzen üblich sind (rund 3 bar bis 6 bar), beschickt werden.

Die detaillierte Planung des experimentellen Trinkwasserverteilnetzes erfolgte mit AutoCAD 2013 (Autodesk | 3D Design, Engineering & Entertainment Software,). Für die Montage des Modells wurde eine

Unterkonstruktion aus Holz geplant und angefertigt. Dadurch konnten die Rohrleitungen fixiert und ggf. auftretende Vibrationen abgefangen werden. Auch die Zugänglichkeit bei der Montage aller Einbauten wurde mittels dieser Konstruktion sichergestellt.

Der mit der Unterkonstruktion gewonnene Abstand zum Boden des Technikums dient unter anderem dazu, die Entnahmeleitungen, die nötigen Stromversorgungen der Sensoren sowie deren Datenübertragung mit mehrpoligen Kabeln so zu installieren, dass ein einwandfreier Laborversuchsablauf gegeben ist und Beschädigungen an Leitungen etc. schon im Vorhinein minimiert werden. Ein weiterer Vorteil dieser Unterkonstruktion ist, dass sich durch Anheben bzw. Schrägstellen der Konstruktion unterschiedliche geodätische Höhen realisieren lassen.

Die Befestigung der Rohrleitungen erfolgt mit Rohrschellen, die mit Hilfe von Stockschrauben M 10 x 180 mm einen vertikalen Abstand von ca. 20 cm zur Unterkonstruktion herstellen. Die Installation in dieser Form bietet auch eine angenehme Arbeitshöhe für die Durchführung von flexiblen Messungen und schafft Raum, um alle Leitungsabschnitte problemlos zugänglich zu machen.

Das Labormodell wie es im Ausbauzustand zu Projektende vorlag wurde schrittweise weiterentwickelt. Die einzelnen Ausbauzustände und Versuchsanordnungen werden in den nachstehenden Unterkapiteln beschrieben.

4.2.1.1 RANDBEDINGUNGEN IM TECHNIKUM SWW

Im Technikum des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau sind bereits in der Vergangenheit hydraulische Versuche durchgeführt worden. Somit war die Infrastruktur für die Anspeisung des Labormodells gegeben.



Abbildung 34: Gegebenheiten im Technikum, a) Tiefbehälter inklusive Pumpensteuerungsmodul b) Brunnenpumpe nach Installation

Wie in obiger Abbildung 34 zu erkennen, verfügt das Technikum über einen etwa 5 m³ fassenden Tiefbehälter, aus dem mit einer Pumpe Wasser entnommen werden kann. Die verfügbare Pumpensteuerung bietet drei verschiedene Arten diese Pumpe anzusteuern. Entweder über einen vorgegebenen Durchflusswert, einen vordefinierten Druck oder durch die manuelle Einstellung der Frequenz am Frequenzumformer der drehzahlgeregelten Unterwasserpumpe. Geregelt werden die Einstellungen über die Messsignale, welche der im Einspeisepunkt installierte magnetisch induktive Durchflussmesser (MID) sowie ein Drucktransmitter 0 - 16 bar liefert. Für den Betrieb des experimentellen Labormodells werden für den Großteil der Experimente manuell gewählte Frequenzen am Frequenzumformer der Pumpe eingestellt, um das Verhalten im Trinkwassernetz bei Einspeisung über einen Hochbehälter so realitätsnah wie möglich zu simulieren.

4.2.1.2 AUSWAHL DER MATERIALIEN

Die Auswahl der Rohrmaterialien wurde vor allem im Hinblick auf die Herstellbarkeit getroffen. Das gewählte Material Polyethylen (PE) in Kombination mit der Verbindungstechnik Klemmfitting verleiht dem Labormodell eine große Flexibilität in Bezug auf den Einbau von Sensoren und ermöglicht unter anderem auch eine Änderung der Netztopologie. Das gesamte Labornetz wurde in PE 80 (SDR11, c = 1.6) mit Nenndruck PN 10 und verschiedenen Nennweiten (DN 50, DN 40 und DN 25 mit zugehörigen Innendurchmessern von 40.8 mm, 32.6 mm und 20.4 mm) ausgeführt. Als Rohrverbinder wurden Klemmfittinge herangezogen. Diese ermöglichen die Verbindung gleicher sowie unterschiedlicher Nennweiten. Ein weiterer Vorteil ist die Wiederverwendbarkeit dieser Verbindungstechnik. Es können ohne großen Aufwand Rohrabschnitte gänzlich ausgetauscht oder innerhalb des Labormodells mit einem an

anderer Position befindlichen Abschnitt getauscht werden. In Abbildung 35 sind die zur Anwendung kommenden Rohrverbindungen dargestellt. Nur an Kreuzungsstücken mit vier erforderlichen Anschlussmöglichkeiten kommen alternative Verbindungen zum Einsatz, da Klemmfittings dafür nicht verfügbar sind.

a)



b)



c)



Abbildung 35: a) System Klemmfitting ,b) Anbohrschelle vor Einbau und c) inkl. eingebautem Drucksensor (Quelle: www.plasson.de)

Diese speziellen Knotenpunkte sowie die Installation des Leitungsnetzes an sich, wurden von einem Installationsunternehmen ausgeführt. Die Unterkonstruktion wurde dankenswerterweise mit Unterstützung des Laborteams des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau montiert.

Um die Sensorplatzierung (im speziellen Drucktransmitter) an jedem Leitungsstrang zu ermöglichen, wurden Anbohrschellen verwendet. Diese Anbohrschellen gewährleisten einen unkomplizierten Einbau der Drucktransmitter. Die Abgänge sind verstärkt und besitzen ein Innengewinde (je nach Transmitter ½ Zoll oder 1 Zoll) in das der Drucktransmitter eingeschraubt werden kann. Sollte an ausgewählten Stellen temporär keine Druckmessungen durchgeführt werden, können diese Innengewinde mit Pfropfen abgedichtet werden.

An den Positionen der Anbohrschellen werden, sofern keine Drucktransmitter angeschlossen sind, auch Verbraucher angebracht.

Abweichend von der in der Entwurfsphase angedachten Realisierung von Absperrorganen mittels Kugelschieber, wurden handelsübliche Hausanschlusschieber der Firma HAWLE mit den entsprechenden Durchmessern eingebaut. Diese Lösung spiegelt einerseits die Gegebenheiten im Feld besser wieder, andererseits besteht damit die Möglichkeit auch teilweise geschlossene Schieber zu simulieren und die Erkenntnisse in der Algorithmenentwicklung einfließen zu lassen. Auch in realen Versorgungssystemen können Schieberstellungen unbekannt sein, da z.B. nach Arbeiten am Netz einzelne Streckenschieber nicht wieder geöffnet wurden oder eine vollständige Abdichtung des Leitungsstranges aufgrund eines

beschädigten Dichtelementes des Schiebers nicht mehr gewährleistet ist. Mit den zu entwickelnden Algorithmen soll es auch ermöglicht werden, solche hydraulischen Randbedingungen zu erkennen und diese nicht fälschlicherweise als Leckage zu interpretieren.

Die Konstruktion des Labormodells und die Anordnung der Schieber ermöglicht es zudem, unzählige hydraulische Situationen (Außerbetriebnahme von kleinen Netzteilen) und Netzzustände zu simulieren.

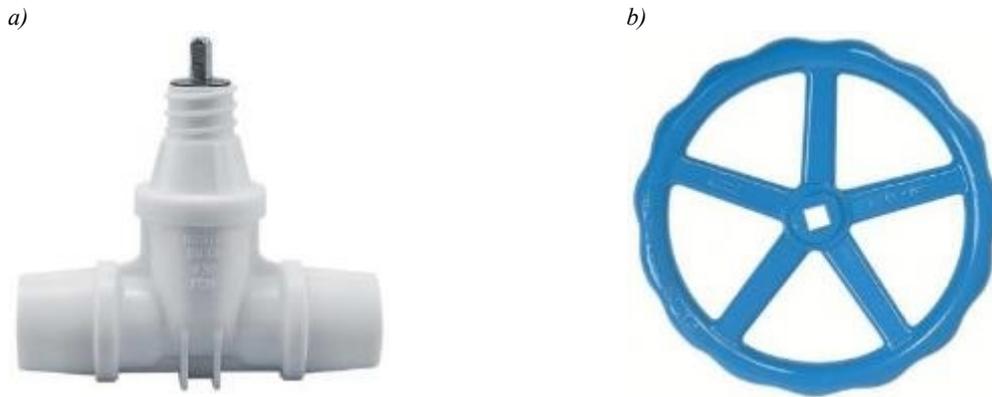


Abbildung 36: Schiebergarnitur, a) Hausanschlussschieber b) Handrad zur Betätigung (Quelle: www.hawle.de)

In Abbildung 36 ist ein Hausanschluss-Schieber DN 40 sowie das Handrad zur Betätigung abgebildet. Die Installation erfolgt im Labormodell mit einer einfachen Steckverbindung. Schieber wurden im experimentellen Netz so angeordnet, dass große Netzteile von der Versorgung getrennt werden können. Mit diesen Absperrorganen können im Labor unter anderem Reparaturszenarien und deren Auswirkung auf Versorgungssicherheit und Hydraulik simuliert werden.

4.2.1.3 ABMESSUNGEN UND KONSTRUKTIVE ELEMENTE - VOLLAUSBAU

Der Vollausbau des Labormodells beinhaltet Steuerung, Verbrauch-/Leckage-Apparat sowie zusätzliche Datenlogger. Nachstehend werden die Komponenten im Endausbau beschrieben. Die Komponenten des Labormodells können in physisches Netz, Sensortechnik, Datenlogger, Schnittstellen, Steuerungstechnik und Datenverarbeitung gegliedert werden.

Das Labormodell weist im Vollausbau folgende Eckdaten auf:

- Gesamtlänge von ca. 49 m
- 51 Rohrabschnitte
 - DN50 PE-80 Rohre (SDR11, $c = 1.6$, Innendurchmesser 40.8 mm) Länge ca. 22 m
 - DN40 PE-80 Rohre (SDR11, $c = 1.6$, Innendurchmesser 32.6 mm) Länge ca. 12 m
 - DN25 PE-80 Rohre (SDR11, $c = 1.6$, Innendurchmesser 20.4 mm) Länge ca. 15 m
- 34 konstruktive Knoten
- Anbohrschellen ca. 40 Stück für den Einbau von
- Drucktransmitter

- Entnahmeeinrichtung / Verbraucher (Dosierelektronik)
- 7 Stück Schieber (DN25, DN40, DN50)
- 2 Datenlogger (Meilhaus RedLab 1608G, Meilhaus RedLab 2416)
- 2 x Conrad Relaiskarten zur Steuerung der Magnetventile
- Grundwasserpumpe GRUNDFOS SP-8A-15, Membranbehälter GRUNDFOS

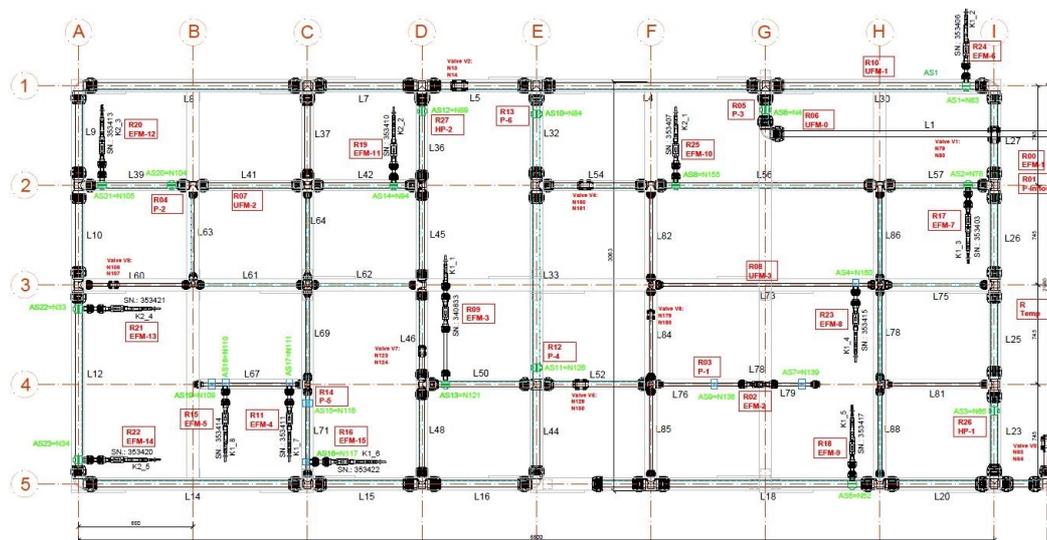


Abbildung 37: CAD-Plan des experimentellen Trinkwasserverteilnetzes

In Abbildung 37 ist das Layout des experimentellen Labornetzes inklusive aller Einbauten sowie die Positionen und Kanalzuordnung der Sensoren ersichtlich. Eine maßstabsgetreue Darstellung ist dem Anhang als Plan beigelegt. Die Abmessungen dieser Versuchsanordnung betragen 7 m x 3 m (Unterkonstruktion berücksichtigt).

4.2.1.4 HYDRAULISCHES MODELL – VOLLAUSBAU

Nach dem Aufbau des physischen experimentellen Trinkwasserverteilnetzes erfolgte die Überführung in ein hydraulisches Modell. Dieser Schritt erforderte im Vorfeld eine Vielzahl an Überlegungen. Vor allem der Punkt Detaillierungsgrad spielte eine wesentliche Rolle, da wegen der niedrigen Fließgeschwindigkeiten im Labormodell und der geringen Sandraugigkeit des Werkstoffes Polyethylen (PE) keine signifikanten Druckhöhenverluste aufgrund des Fließvorganges infolge der Rohrraugigkeiten zu erwarten waren, wie es beispielweise in realen Netzen durchaus der Fall sein kann. Aus diesem Grund wurde versucht auch Einbauten, d.h. die Verbindungselemente wie T-Stücke, Übergangsstücke sowie Kreuzungen, im hydraulischen Modell möglichst exakt nachzubilden. Die sehr detaillierte Abbildung der einzelnen Komponenten erlaubt es, lokale Widerstände an Kreuzungen und anderen konstruktiven Elementen zusätzlich zur Rohrraugigkeit im hydraulischen Modell anzusetzen. Die Abbildung der Einzelwiderstände realer Systeme in hydraulischen Modellen erfolgt in den meisten Fällen in der Form, dass lokale Widerstände durch Einbauten wie Schieber, Hausanschlüsse, Krümmer, Etagen etc. in der Variable „betriebliche Rauigkeit“ Berücksichtigung finden.

Der Aufbau des hydraulischen Modells erfolgte in Anlehnung an die CAD-Planung. Eine eindeutige Zuordnung der Bezeichnungen im hydraulischen Modell zu jenen Bezeichnungen im CAD-Plan ist für die

Durchführung der Experimente und deren Dokumentation unumgänglich. Aus diesem Grund wurde eine Zusammenfassung aller Messgeräte im Labormodell sowie deren Position im hydraulischen Modell erstellt.

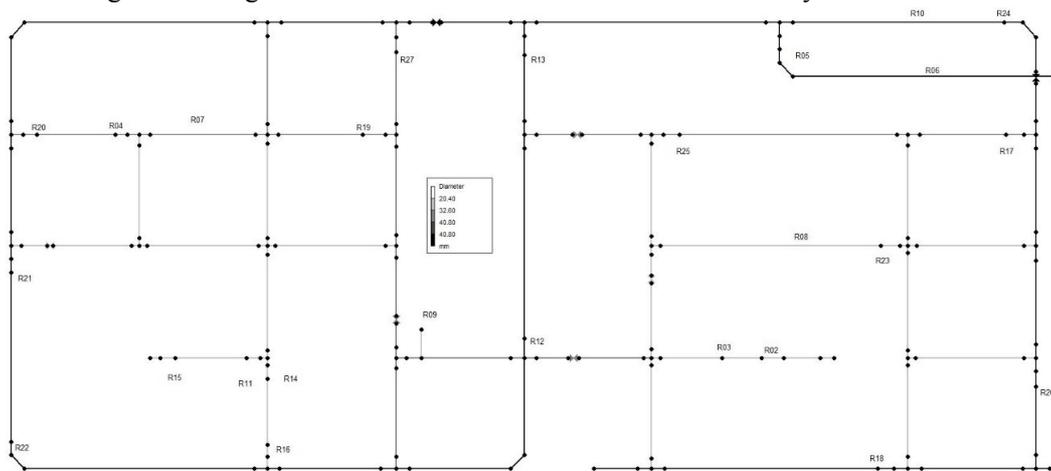


Abbildung 38: Hydraulisches Modell des experimentellen Trinkwasserverteilnetzes EWDS-TUG

Wie in Abbildung 38 ersichtlich, wurden die zur Herstellung der Knoten verwendeten Klemmfittinge je nach Bauart als kurze Leitungsabschnitte modelliert. Schieber wurden in EPANET als Throttle Control Valves (TCV) abgebildet. Dieser Art von Schiebern können je nach Öffnungsgrad des Schiebers Widerstandsbeiwerte zugewiesen werden. Seitens des Schieberherstellers sind diese Widerstandsbeiwerte durch Versuche ermittelt worden. Hintergrund der hochaufgelösten Modellierung der Verbindungen ist, dass an Leitungsabschnitten sowohl die Rauigkeit des Materials als auch der sogenannte Loss Coefficient (Widerstandsbeiwert) definiert werden können.

Für die Kalibrierung des hydraulischen Modells wurde die Option beibehalten, nicht nur auf betriebliche Rauigkeiten zu kalibrieren, sondern den Aspekt der Kalibrierung durch das Ansetzen der Widerstandsbeiwerte an Kreuzungen und bei Einbauten berücksichtigen zu können.

Nachstehende Abbildung 39 zeigt die modellhafte Abbildung ausgewählter Bauteile, wie z.B. ein T-Verbinder mit reduziertem Abgang (linkes Bild) sowie einer Leitungskreuzung mit benachbartem Schieber und einer Anbohrschelle zur Anbringung von Drucksensoren bzw. Verbrauchern (rechtes Bild Abbildung 39).

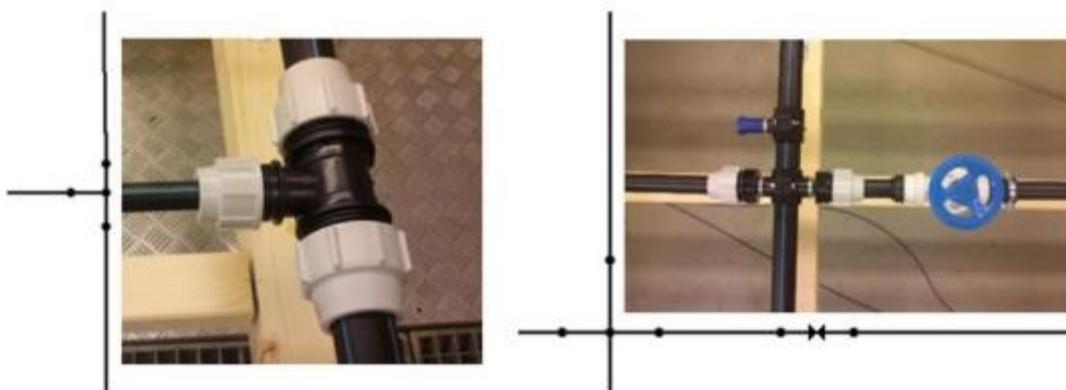


Abbildung 39: Hydraulische Modellierung ausgewählter Bauteile

Nach der erfolgreichen Überführung des physischen Modells in ein hydraulisches Modell in EPANET wurden allen Bauteilen, soweit bekannt, die vom Hersteller bekannten Parameter zugewiesen. Die Rauigkeit

der PE- Druckrohrleitungen wurde mit 0.001 mm definiert. Widerstandsbeiwerte für vollständig geöffnete Schieber waren ebenfalls bekannt und konnten definiert werden.

Bei der Eingabe von Widerstandsbeiwerten an T-Verbindern sowie Kreuzungen mit vier Leitungen ist zu beachten, dass die Widerstandsbeiwerte in den Abzweigungen auch von der Fließrichtung abhängen. Die Kalibrierung des Modells ist daher immer nur für definierte Fließverhältnisse gültig. Um diesbezüglich eine erste Abschätzung tätigen zu können, wurde eine Versuchsanordnung gewählt, die für den Großteil der durchgeführten Experimente repräsentativ ist. Hierbei wurde speziell auf die Fließgeschwindigkeiten und Fließrichtungen geachtet, um die Widerstandsbeiwerte der einzelnen Einbauten und Kreuzungspunkte für die Kalibrierung des hydraulischen Modells abzuleiten.

4.2.2 SONDEREINBAUTEN UND WASSERVERSORGUNG IM LABORMODELL

Wie in der Realität ist es auch für den einwandfreien Laborbetrieb notwendig, das System luftfrei zu betreiben bzw. eine Entlüftungsmöglichkeit vorzusehen. Die Entlüftung des Systems muss nach jeder Umbaumaßnahme bzw. nach dem Einbau von Sensoren sowie nach Wartungsarbeiten (Membranbehälter, Reservoir, etc.) durchgeführt werden. Dazu wurde eine vordefinierte Handlungsanweisung in Form einer „Standard Operating Procedure“ (SOP) erstellt. Zusätzlich sorgt das Entlüftungsventil dafür, dass allfällige Lufteinschlüsse auch während der laufenden Versuche kontrolliert entweichen können.

Vor der Einspeisung des mittels Brunnenpumpe geförderten Wassers aus dem Tiefbehälter in das System, ist ein Schmutzfänger angeordnet, welcher eine Verschmutzung der Einbauten und verwendeten Materialien weitestgehend ausschließen soll. Die Wartung der Labornetzkomponenten ist in regelmäßigen Abständen bzw. je nach Erfordernis durchzuführen. In nachstehender Abbildung 40 ist die Einbaulage des Schmutzfängers und des Entlüftungsventils dargestellt.

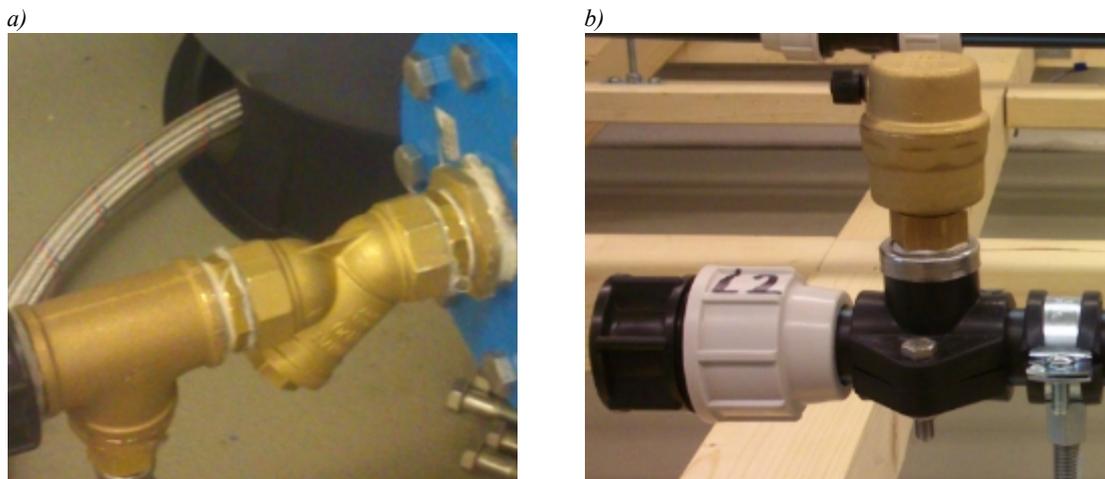


Abbildung 40: Sondereinbauten a) Schmutzfänger am Einspeisepunkt b) Entlüftungsventil

4.2.2.1 UNTERWASSER/BRUNNENPUMPE GRUNDFOS SP-8A-15

Die im Labormodell geforderten Versorgungsdrücke, welche auch dem Druck in den Pilotnetzen entsprechen, werden mit einer drehzahlgeregelten 15-stufigen Kreiselpumpe erzeugt. Die Unterwasserpumpe kann daher entweder mit vordefiniertem Druck oder Durchfluss betrieben werden, wobei die Drehzahl und damit die gewünschten Drücke bzw. Durchflüsse angepasst an die momentane Verbrauchssituation sichergestellt werden.

Die vorhandene Infrastruktur im Technikum ermöglicht, wie bereits im Vorfeld erwähnt, einen Betrieb der Unterwasserpumpe mit einer manuell vordefinierten Frequenz am Frequenzumformer, welche die für die

Versuche hauptsächlich genutzte Betriebsform darstellt. Auf diese Weise wird die Nachregelung der Pumpe auf einen bestimmten Einspeisedruck aufgrund von Verbrauchsänderungen bzw. Leckagen im System vermieden. Diese Nachregelung der Pumpe würde die Interpretation der Druckveränderung im System infolge des Auftretens von Leckagen unmöglich machen.

Die gewählte Pumpe ist in der Lage Durchflüsse von ca. 1 m³/h bei einem Versorgungsdruck von 9 bar bis zu einer Menge von ca. 11 m³/h bei einem Druck von ca. 4 bar bereitzustellen. In Abbildung 41 ist die Unterwasserpumpe mit zugehöriger Pumpenkennlinie abgebildet. Um Verunreinigungen vorzubeugen, wurde an der Ansaugvorrichtung ein Sieb angeordnet. Vom Hersteller wird empfohlen, die Kreiselpumpe mit mindestens 0.2 l/s zu betreiben, um einer Überhitzung entgegenzuwirken und die Schmierung der Pumpenkomponenten zu gewährleisten. Alle durchgeführten Experimente wurden unter Berücksichtigung dieser Randbedingung durchgeführt.

Die in Abbildung 41 blau gekennzeichnete Pumpenkennlinie (15) beschreibt die im Labor eingebaute Unterwasserpumpe bei einer maximalen Netzfrequenz von 50 Hz.

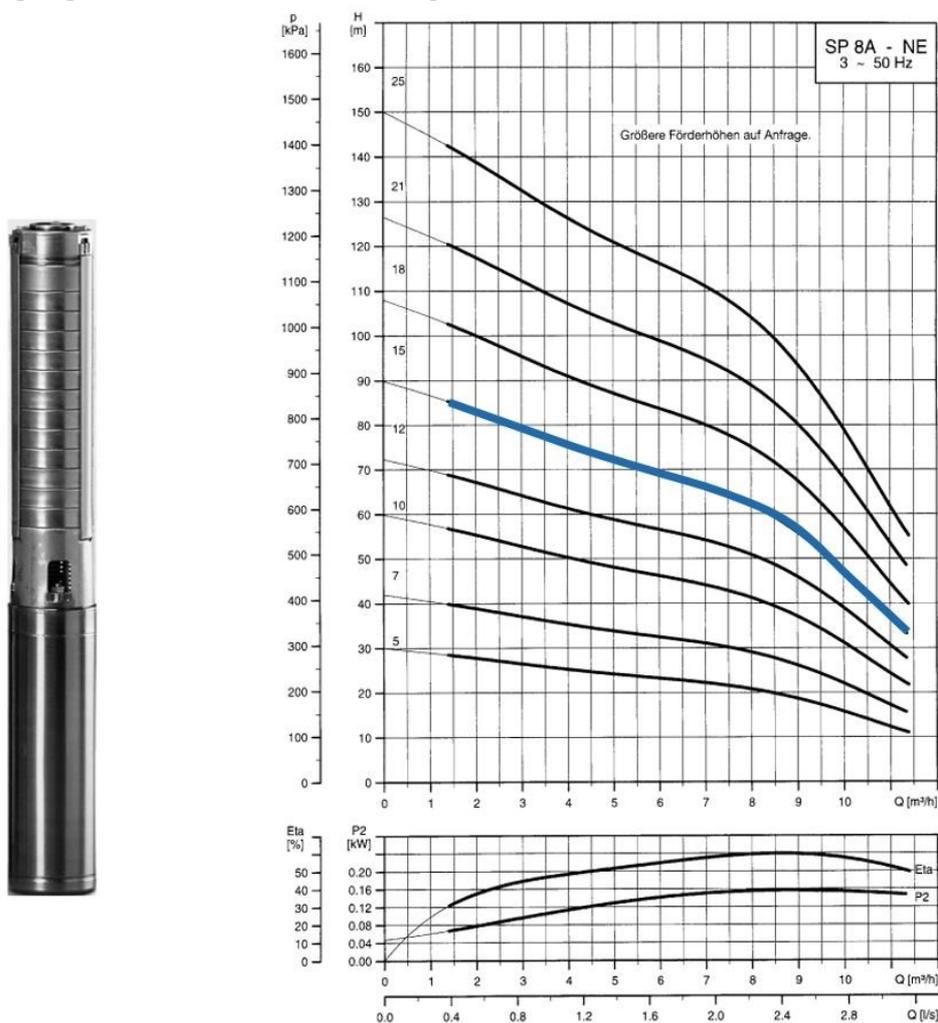


Abbildung 41: Grundwasserpumpe Grundfos SP 8A-15 mit zugehöriger Pumpenkennlinie

4.2.3 SENSORTECHNIK

Die Methode der modellgestützten Leckageeingrenzung beruht auf der Analyse von Messungen der hydraulischen Kenngrößen Druck und Durchfluss. Die gemessenen hydraulischen Kenngrößen werden den

berechneten Größen gegenübergestellt und durch die Minimierung der Differenzen zwischen diesen wird auf den wahrscheinlichsten Ort der Leckage geschlossen.

Die Voraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung dieser Methode bilden geeignete Sensoren, die an optimalen Positionen im Netz platziert sind. Im gegenständlichen Forschungsprojekt AZM werden dafür Druck- und Durchflusssensoren herangezogen. Bereits bei der Planung des Labormodells wurde besonders darauf geachtet, Sensoren zu verwenden, die auch in realen Systemen Anwendung finden und für diese Anwendung zugelassen sind. Die Auswahl der Sensoren, sowohl im Labornetz als auch im realen System, muss in jedem Fall speziell auf die Randbedingungen hinsichtlich des Messbereiches abgestimmt werden, um unnötige Unsicherheiten, die aus einem schlecht ausgenützten Messbereich resultieren können, zu vermeiden.

Seitens der Messtechnik kommen im EWDS-TUG zwei unterschiedliche Prinzipien zum Einsatz. Die Durchflussmessungen erfolgen bei den „Verbrauchern“ sowie an der Einspeisung nach dem magnetisch-induktiven Durchflussmessprinzip (MID). Des Weiteren kommen Ultraschall-Durchflusssensoren (UDM) zum Einsatz. Die Ultraschall- Aufschnallmessung (Clamp-On Sensoren) bietet mehrere Vorteile. Zum einen kann im Labormodell mit diesem Prinzip an jeder beliebigen Stelle bzw. an jedem Leitungsabschnitt der Durchfluss sowie die Geschwindigkeit gemessen werden. Diese Flexibilität ermöglicht es, beispielsweise zum Zwecke der Kalibrierung des hydraulischen Modells, die hydraulischen Größen Durchfluss und Fließgeschwindigkeit an jedem einzelnen Strang des Labormodells zu ermitteln. Ein weiterer Nutzen entsteht dadurch, dass diese Messprinzipien (MID und UDM) hinsichtlich Genauigkeit und Ansprechzeit der Sensoren verglichen werden können.

Die Verwendung von Aufschnallmessgeräten bietet nicht nur im Labormodell Flexibilität. Diese Art von Durchflusssensoren ist auch als mobiles Gerät mit Akkubetrieb verfügbar und stellt daher für Wasserversorger ein geeignetes Instrument dar, um temporär etwaige Zonen hinsichtlich des Verbrauchsverhaltens zu analysieren. Ein weiterer Vorteil besteht darin, nicht in das Medium Wasser bzw. in die Leitung eingreifen zu müssen. Das Messgerät wird an der Außenseite des Rohres, in den meisten Fällen mit einem einfachen Klemmmechanismus, befestigt und ist nach Eingabe der Rohrparameter (Material, Durchmesser, Wandstärke) sofort einsatzbereit.

Neben Durchflussmessgeräten werden im EWDS-TUG Drucksensoren, welche dem piezoresistiven Messprinzip zuzuordnen sind, verwendet. Die ausgewählten Drucksensoren variieren im Messbereich, der Messgenauigkeit sowie in der Art der Prozessschnittstelle.

4.2.3.1 DURCHFLUSS

Wie bereits einleitend in diesem Kapitel erwähnt, finden Durchflussmessgeräte mit zwei unterschiedlichen Messprinzipien Anwendung. Hintergrund für die Auswahl verschiedener Messprinzipien ist auch in diesem Fall die Quantifizierung der Unterschiede hinsichtlich Messungenauigkeiten und damit einhergehender möglicher Herausforderungen für die in diesem Forschungsprojekt angestrebten Ziele.

Magnetisch induktive Durchflussmesser (MID) werden neben anderen Technologien, wie beispielsweise Woltmannzählern, in der Praxis vorwiegend an Hochbehältern oder in abgegrenzten Messzonen (District Metered Areas DMAs) zur Messung der Einspeisemengen installiert. Im Gegensatz zu permanent installierten Durchflussmessern werden im Feld vermehrt Ultraschall-Durchflussmesser (UDM) zur temporären Durchflussmessung eingesetzt. Je nach Anwendungsfall ist ein geeignetes Messgerät auszuwählen. Ultraschall-Durchflussmessgeräte bestehen vor allem durch die einfache und flexible Einbaumöglichkeit. Sie benötigen je nach Bauform nicht zwingend eine externe Stromversorgung, sondern können mittels Akkubetrieb in einem vordefinierten Zeitfenster an der Messstelle verbleiben. Die

aufgezeichneten Daten können entweder in regelmäßigen Abständen manuell ausgelesen werden oder man bedient sich der Fernübertragung der Daten kabelgebunden oder über das Mobilfunknetz.

Im gegenständlichen Labormodell (EWDS-TUG) kommen MIDs unterschiedlicher Messbereiche zum Einsatz. Am Einspeisepunkt wird der bereits im Aufbau des Technikums installierte MID mit einem Messbereich von 0 – 27 l/s verwendet, welcher ursprünglich für andere Versuche mit deutlich höherem Durchfluss vorgesehen war. Demnach ist der Messbereich für die im Forschungsprojekt AZM gedachten Durchflüsse nicht optimal und weist deutliche Schwankungen je Zeitschritt auf. Alle weiteren Durchflusssensoren wurden auf die im Labor herrschenden Rahmenbedingungen abgestimmt. Die verwendeten Ultraschall-Durchflussmessgeräte (Abbildung 42 a) und b)) wurden auf einen Nenndurchfluss von 0 – 50 m³/h kalibriert, was einem Nenndurchfluss von maximal 13.8 l/s entspricht. Die Messunsicherheiten werden vom Hersteller mit 0.1 % vom aktuell gemessenen Wert beziffert, was einer deutlich höheren Genauigkeit im Gegensatz zum MID mit 5 % vom Messbereichsendwert entspricht. Die Verwendung beider Messprinzipien ergibt zusätzlich die Option, die Sensoren anhand Messbereich und Messgenauigkeit (-unsicherheit) einander gegenüberzustellen. Nachstehende Abbildung 42 illustriert die im Labormodell verbauten Durchflussmessgeräte.



Abbildung 42: Ultraschall-Durchflussmessgeräte unterschiedlicher Hersteller a) Flexim b) Endress und Hauser c) MID am Einspeisepunkt des Labormodells (Danfoss) d) MID zur Messung von Verbrauchern/Leckagen (Kobold)

4.2.3.2 DRUCK

Die Messung der Druckverhältnisse im Labornetz erfolgt mit Drucktransmittern verschiedener Hersteller, Messbereichen und Genauigkeiten. Bei den verwendeten Transmittern handelt es sich um Sensoren, welche nach dem Piezoresistiven Druckmessprinzip arbeiten. Diese Bauweise ist sehr resistent gegen Vibrationseinflüsse, da der Druckanschluss und die Messzelle miteinander verschweißt sind.

Die ausgewählten Sensoren weisen Nenndrücke von 0 bis 6 bar, 0 bis 10 bar und 0 bis 16 bar auf. Um auch Ungenauigkeiten aufgrund von Messbereichen und Messgenauigkeiten quantifizieren zu können, wurden unterschiedliche Sensoren hinsichtlich Genauigkeit und Messbereich gewählt. Abbildung 43 zeigt die im Labormodell installierten Drucktransmitter. Die eingebauten Druckmessumformer werden mit zwei unterschiedlichen Schnittstellen zur Datenübertragung betrieben. Das weitverbreitete Ausgangssignal 4 – 20 mA wird für den Großteil der installierten Drucksensoren verwendet. Zusätzlich wurden zwei Drucksensoren angeschafft, welche die Möglichkeit bieten, die Messsignale über eine HART-Schnittstelle (Highway Adressable Remote Transducer Protocol) zu übertragen. Bei dieser Form der Datenübertragung wird dem 4 – 20 mA Signal ein digitales Signal überlagert. HART ist ein weltweit eingesetztes Feldkommunikationsprotokoll zur Kommunikation, beispielsweise zwischen Drucksensoren und dem sogenannten Master (PC), an dem die Signale zentral verwaltet werden.



Abbildung 43: Drucksensoren unterschiedlicher Hersteller, Messbereichen und Genauigkeiten a) HART-fähiger Drucksensor 0-10 bar, 0.1% FS Genauigkeit, b) Drucksensor 0-6 bar, 4-20 mA Schnittstelle, 0.25% FS Genauigkeit. c) Drucksensor 0-6 bar, 0.5% FS Genauigkeit

4.2.4 APPARAT ZUR SIMULATION VON VERBRAUCHERN UND LECKAGEN

In der derzeitigen Versuchsanordnung werden auftretende Leckagen und Verbraucher im System in derselben Art und Weise simuliert. Wie in Abbildung 44 ersichtlich, werden kurze Rohrabschnitte mit einer Entnahme am Ende der Leitung und einem vorgeschalteten MID an den dafür vorgesehenen Anbohrschellen angebracht. Das Öffnen und Schließen des „Verbrauchers“ erfolgt durch ein Magnetventil, das unmittelbar vor dem Auslaufventil angeordnet ist. Die Rückführung der entnommenen Wassermengen in das Reservoir

erfolgt mit Hilfe von PVC-Schläuchen um zu verhindern, das eingebaute Messtechnik durch Spritzwasser beeinträchtigt oder gar beschädigt wird. Im Ausbauzustand des Labormodells zu Projektende sind 13 potenzielle Verbraucher bzw. Leckagen installiert.

Da in der Realität Verbraucher in der Regel auch als druckabhängig angesehen werden können, wurde diese Versuchsanordnung gewählt. Die Verbrauchersimulation in dieser Form ermöglicht zudem den Mehrwert an Information des Verbrauchsverhaltens (quasi-online Messung) in der Leckagedetektion zu quantifizieren.



Abbildung 44: Vorrichtung zur Simulation von Verbraucher oder Leckage

Während Kunden in der Regel keinen konstanten Wasserbrauch aufweisen, werden Leckagen mit einem ständig geöffneten Magnetventil simuliert. Je nach Versorgungsdruck ändert sich auch die Menge des ausfließenden Wassers. Im hydraulischen Modell wird die Leckage mit dem am jeweiligen Knoten definierten Emitter-Koeffizienten abgebildet, welcher die Druckabhängigkeit von Leckagen berücksichtigt. Die Verbräuche in EPANET werden an den Knoten durch Eingabe des Grundverbrauchs (Base Demand) definiert. Diesbezüglich sei angemerkt, dass Verbräuche im hydraulischen Modell als konstant bzw. druckunabhängig abgebildet werden.

Zusätzlich zur laufenden Durchflussüberwachung mittels MIDs wurde ein MID mit integrierter Dosierelektronik angekauft, mit dessen Hilfe vordefinierte Mengen über einen Zeitraum kontrolliert entnommen werden können. Diese Einrichtung dient beispielsweise dazu, Großabnehmer im Verteilnetz oder Übergabestellen in benachbarte Netze zu simulieren. In der ersten Erprobungsphase der Algorithmen wurden Leckagen durch manuelles Öffnen von kleinen Ventilen am Ende einer Leitung simuliert. Mit fortschreitender Projektlaufzeit erlangte das Verhalten der Endverbraucher immer mehr an Bedeutung. Die Unsicherheiten im Verbrauch haben einen signifikanten Einfluss auf das Erkennen und Lokalisieren von auftretenden Leckagen.

Aus dem genannten Grund wurde eine Steuerung des Labormodells erarbeitet, die es erlaubt, Tagesganglinien wie sie auch in der Realität auftreten, in einem skalierten Maßstab zu simulieren. Die genaue Funktionsweise der Steuerung des Labormodells wird in Kapitel 4.2.6.3 , Seite 84 im Detail erläutert.

Nach wie vor bietet das gegenständliche Labormodell die Möglichkeit, künstlich hergestellte Leckagen zu untersuchen. Das Installieren eines solchen Rohrabschnittes kann aufgrund der flexiblen Verbindungstechnik ohne großen Aufwand realisiert werden. In nachstehender Tabelle 3 sind die im Endausbau installierten Messgeräte respektive Sensoren angeführt.

TABELLE 3: ZUSAMMENFASSUNG INSTALLIERTER SENSOREN

Kanal	Schnittstelle	Typ	Messprinzip	Messbereich	Genauigkeit	Relais Nr.
R00	0-10V	Durchfluss	MID	0 – 27 (l/s)	+/- 5.0 FS (%)	
R01	0-10V	Druck	Piezoresistiv	0 - 16 (bar)	+/- 0.5 FS (%)	

METHODIK

Kanal	Schnittstelle	Typ	Messprinzip	Messbereich	Genauigkeit	Relais Nr.
R02	0-10V	Durchfluss	MID	0.8 - 16 (l/min)	± 2% of FS	
R03	0-10V	Druck	Piezoresistiv	0 - 6 (bar)	+/- 0.5 FS (%)	
R04	0-10V	Druck	Piezoresistiv	0 - 6 (bar)	+/- 0.5 FS (%)	
R05	0-10V	Druck	Piezoresistiv	0 - 6 (bar)	+/- 0.5 FS (%)	
R06	0-10V	Durchfluss	UDM	0.5 – 7.0 (m/s)	+/- 0.5 of reading (%)	
R07	0-10V	Durchfluss	UDM	0 – 50 (m³/h)	+/- 0.1 of reading (%)	
R08	0-10V	Durchfluss	UDM	0 – 50 (m³/h)	+/- 0.1 of reading (%)	
R09	0-10V	Durchfluss	MID	2,5 - 50 (l/min)	± 2% of FS	K1_1
R10	0-10V	Durchfluss	UDM	0 – 50 (m³/h)	+/- 0.1 of reading (%)	
R11	0-10V	Durchfluss	MID	0.8 - 16 (l/min)	± 2% of FS	K1_7
R12	0-10V	Druck	Piezoresistiv	0 - 6 (bar)	≤ ± 0.25% FSO	
R13	0-10V	Druck	Piezoresistiv	0 - 6 (bar)	≤ ± 0.50% FSO	
R14	0-10V	Druck	Piezoresistiv	0 - 6 (bar)	≤ ± 0.35% FSO	
R15	0-10V	Durchfluss	MID	0.8 - 16 (l/min)	± 2% of FS	K1_8
R16	0-10V	Durchfluss	MID	0.8 - 16 (l/min)	± 2% of FS	K1_6
R17	0-10V	Durchfluss	MID	0.8 - 16 (l/min)	± 2% of FS	K1_3
R18	0-10V	Durchfluss	MID	0.8 - 16 (l/min)	± 2% of FS	K1_5
R19	0-10V	Durchfluss	MID	0.8 - 16 (l/min)	± 2% of FS	K2_5
R20	0-10V	Durchfluss	MID	0.8 - 16 (l/min)	± 2% of FS	K1_4
R21	0-10V	Durchfluss	MID	0.8 - 16 (l/min)	± 2% of FS	K1_2
R22	0-10V	Durchfluss	MID	0.8 - 16 (l/min)	± 2% of FS	K2_1
R23	0-10V	Durchfluss	MID	0.8 - 16 (l/min)	± 2% of FS	
R24	0-10V	Durchfluss	MID	0.8 - 16 (l/min)	± 2% of FS	
R25	0-10V	Durchfluss	MID	0.8 - 16 (l/min)	± 2% of FS	K2_6
R26	0-10V	Druck	Piezoresistiv	0 - 10 (bar)	0.1 % FSO	
R27	0-10V	Druck	Piezoresistiv	0 - 10 (bar)	≤ ± 0.10% FSO	-
R28	0-10V	Durchfluss	MID	0.8 - 16 (l/min)	± 2% of FS	-
R29	0-10V	Druck	Piezoresistiv	0-10 (bar)	± 1% of FS	
R30	-	-	-	-	-	

Kanal	Schnittstelle	Typ	Messprinzip	Messbereich	Genauigkeit	Relais Nr.
R31	-	-	-	-	-	

Obige Tabelle 3 fasst die installierten Sensoren zusammen. Neben der Kanalnummer, der Art des Sensors, dem Messprinzip, Messbereich und Genauigkeit beinhaltet die letzte Spalte die Bezeichnung des Relais, an welchem der entsprechende Verbraucher angebunden ist.

4.2.5 PROZESSSCHNITTSTELLEN

In diesem Unterpunkt sollen die Eigenschaften der in industriellen Umgebungen gängigen Prozessschnittstellen dargelegt werden.

4.2.5.1 0 – 10 V SPANNUNGSSCHNITTSTELLE

Bei der 0 – 10 V Schnittstelle handelt es sich um eine analoge Spannungsschnittstelle, welche den Messbereich von 0 bis zur Full-Scale (FS) Range des Sensors auf einen Spannungswert zwischen 0 V und 10 V abbildet.

Aus gerätetechnischer Sicht ist diese Schnittstelle leicht zu realisieren. Es ergeben sich aber einige Nachteile, die sich in der erreichbaren Genauigkeit nach der Datenübertragung über die Schnittstelle manifestieren:

- Der im Sensor mit hoher Genauigkeit existierende Messwert muss in einen Spannungswert umgewandelt werden. Dieser Vorgang ist mit einem ersten Informationsverlust behaftet.
- Entlang der Übertragungsleitung zum Empfänger entsteht ein Spannungsabfall. Die 0 – 10 V Schnittstelle ist daher bzgl. der Übertragungreichweite limitiert.
- Die Spannung muss an der Empfangsstelle wieder in einen digitalen Zahlenwert gewandelt werden. Auch dieser Vorgang ist mit einem Informationsverlust behaftet.

Zudem ist die Schnittstelle empfindlich gegenüber externen Störungen (eine Kopplung von Störern). Neben einer Zweidrahtleitung zur Übertragung des Spannungssignals benötigen Sensoren mit dieser Schnittstelle noch zusätzliche Leitungen zur Versorgung. Aufgrund dieser Eigenschaften sollten Spannungsschnittstellen generell nur für kurze Übertragungstrecken verwendet werden, in Anlagen ist dies der Abstand zwischen dem Sensor und der Datenerfassung. Im Labor werden mehrere Sensoren mit Spannungsschnittstellen verwendet, aufgrund der Leitungslängen ist dies hier aber unbedenklich und stellt eine adäquate Schnittstelle für die Übertragung der Sensor-Messwerte.

4.2.5.2 4 – 20 MA STROMSCHNITTSTELLE

Die 4 – 20 mA Schnittstelle stellt einen de facto Standard in der Prozessinstrumentierung dar. Ähnlich der 0 – 10 V Schnittstelle wird die Messgröße in einen Strom zwischen 4 mA und 20 mA abgebildet. Abbildung 45 zeigt das Konzept und die elektrische Umsetzung. Bezüglich der Generierung des Stromsignals als auch der Umwandlung des Stromes in einen digitalen Zahlenwert zur Weiterverarbeitung an der Empfangsstelle bestehen dieselben Probleme wie bei der Spannungsschnittstelle.

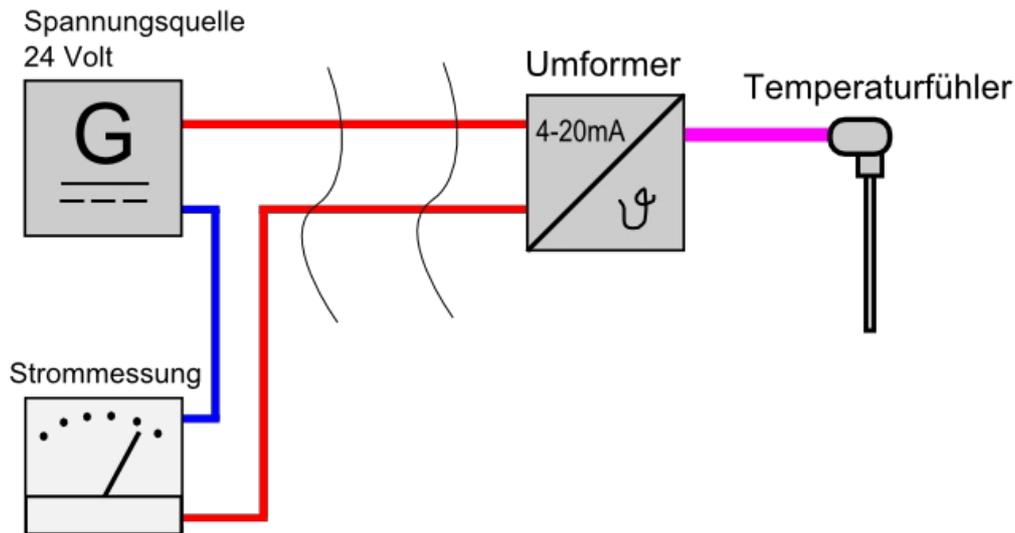


Abbildung 45: Funktionsprinzip 4 – 20 mA Stromschnittstelle (Stromschnittstelle, 2016)

Die 4 – 20 mA Schnittstelle besitzt aber durch die Verwendung des elektrischen Stromes eine größere Übertragungsbereichweite und ist unempfindlicher gegen externe Störungen. Zudem besitzt die Schnittstelle eine Überwachungsfunktion. Im Falle eines Leitungsbruches wird der Strom Null und der Leitungsbruch kann erkannt werden. Zudem lässt sich der Strom von 0 bis 4 mA zeitgleich zur Versorgung eines Sensors verwenden. Dies ist vorteilhaft, da der Sensor in diesem Fall nur mehr eine Zweidrahtleitung benötigt. Die Versorgung und die Übermittlung der Daten geschieht über dieselbe Leitung.

4.2.5.3 4 – 20 MA HART

HART ist die Abkürzung für Highway Addressable Remote Transducer und stellt eine Erweiterung der analogen 4 – 20 mA Stromschnittstelle um eine digitale Übertragungsmöglichkeit zur Verfügung. HART lässt sich in bestehender 4 – 20 mA Installation verwenden. Dem normalen 4 – 20 mA Stromsignal wird ein frequenzmoduliertes Signal (Frequency Shift Keying FSK) überlagert. Durch die Mittelwertfreiheit des FSK-Signals wird das Analogsignal nicht beeinflusst. Somit ist es möglich, neben dem analogen Stromsignal den Messwert auch digital über dasselbe Leitungspaar zu übertragen. Dadurch kann eine Übertragung ohne Informationsverlust erfolgen.

HART zeichnet sich durch relativ niedrige Kosten aus. Ein weiterer Vorteil ist die Busfähigkeit von HART: Wie in Abbildung 46 dargestellt, können mehrere HART-Geräte an einer einzelnen Zweidrahtleitung (Bus) angeschlossen werden, die Buskommunikation wird dabei von einem Master kontrolliert. HART-Multidrop verwendet nicht mehr die 4 – 20 mA Übertragung. In seiner aktuellen Spezifikation unterstützt HART-Multidrop den gleichzeitigen Betrieb von bis zu 16 Busteilnehmern entlang einer Zweidrahtleitung.

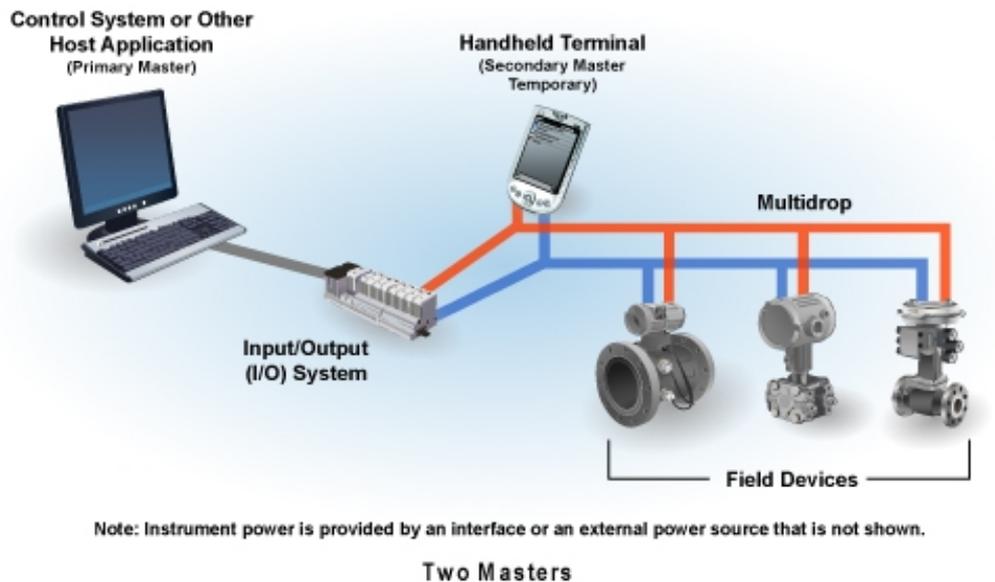


Abbildung 46: Funktionsweise HART-Multidrop (Wie funktioniert HART,)

4.2.5.4 PROFIBUS DP/PA

Profibus DP/PA stellt einen High-End Field Bus für große Anlagen (Fabriken, große Erzeugungsanlagen) zur Verfügung. Profibus existiert in mehreren Ausführungen. Zu den bekanntesten zählen die Versionen

- DP (dezentrale Peripherie)
- PA (process automation)

Beide Versionen unterscheiden sich nur in der elektrischen Ausführung der Schnittstelle. PA ist für einen Betrieb in EX-Umgebungen ausgelegt, was sich neben den elektrischen Eigenschaften auch z.B. in speziellen Steckern manifestiert. Abbildung 47 zeigt ein Schema von Profibus und die Ausführungsform der Stecker. Profibus DP wird für die Kommunikation mit der Prozessleitstelle verwendet. Zwischen beiden Versionen ist ein Busumsetzer erforderlich.

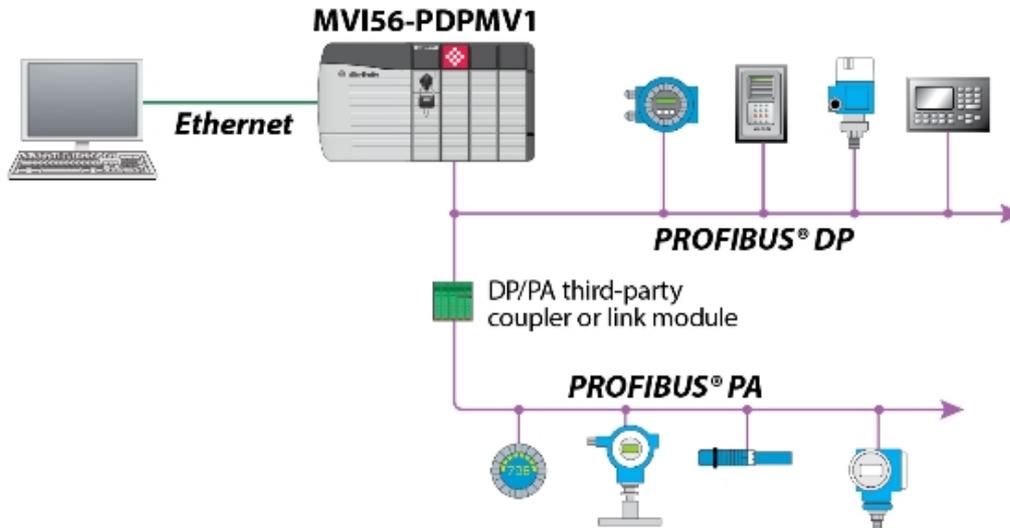


Abbildung 47: Prinzipskizze Profibus PA/DP (PROFIBUS DP-V1 Master Network Interface Module, 2016)

Profibus zeichnet sich durch hohe Flexibilität und Geschwindigkeiten aus. Die Inbetriebnahme einer Profibus-Instrumentierung ist allerdings mit höherem Aufwand verbunden. Zudem sind die Preise einer Profibus Anlage im Vergleich zu allen anderen Feldbussen auch am höchsten.

4.2.5.5 ZUSAMMENFASSUNG FELDBUSSE

Zusammenfassend kann bezüglich der Datenkommunikation für das AZM Labormodell festgehalten werden, dass folgende Schnittstellen für die Verwendung am Prüfstand in Frage kommen:

- 4 – 20 mA Stromschnittstelle: am Institut für SWW existiert Messequipment (Datenlogger/ Schnittstellenkarten), welches diese Schnittstelle unterstützen. Diese Schnittstelle wird auch von praktisch allen Sensoren unterstützt. Die Verwendung der 4 – 20 mA Installation kommt auch der betrieblichen Praxis entgegen, da diese Schnittstelle auch bei den meisten Wasserversorgern verwendet wird.
- Erweiterung des SWW Equipments um 4 – 20 mA HART. Da auch eine Anzahl von HART-fähigen Sensoren für das Labornetz angekauft wurde, bietet sich der Aufbau eines HART-Busses (Multidrop) mit einem einfachen HART-Modem an. Somit können bis zu 16 Geräte mit höchster Genauigkeit im Netz verwendet werden, die auch zu Kontrolle der 4 – 20 mA Installation verwendet werden können.
- Die 0 – 10 Volt Spannungsschnittstelle stellt für die Zwecke des Labormodells eine kostengünstige Alternative dar, auch wenn diese Schnittstelle aufgrund der möglichen Informationsverluste, nicht ausdrücklich für die Verwendung im Wasserversorgungssystem empfohlen wird.

4.2.5.6 ENERGIEVERSORGUNG

Die Anzahl von 29 Sensoren für Druck- und Durchflussmessung, sowie die Simulation von Verbrauchern und Leckagen erfordert eine zentrale, speziell für die Bauteile angepasste Stromversorgung. Diese wird mit Netzteilen, welche die geforderten Spannungen und Stromstärken bereitstellen, sichergestellt.

Druck- und Durchflusssensoren werden je nach Art der Schnittstelle (4 – 20 mA bzw. 0 – 10 V) eingebunden.

Die von den Sensoren ermittelten Messsignale werden mit einem eindeutigen Zeitstempel (jede Sekunde werden die Messsignale aller Sensoren ausgelesen) gespeichert und für die weitere Messsignalverarbeitung an das Datenmanagementsystem „Open Sensor Data Management Tool“ (Camhy D. et al., 2014), entwickelt am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der TU Graz, übergeben.

4.2.5.7 DATENÜBERTRAGUNG

Die Übertragung der Daten von den Sensoren zum Laborcomputer erfolgt über einen Datenlogger (Meilhaus RedLab 2416) mit einer 0 – 10 V Schnittstelle. Die Sensoren übertragen ihr 4 – 20 mA Signal an den Datenlogger, an dem mittels Vorwiderstand auf die Spannung von 0 – 10 V umgewandelt wird. Die Spannungssignale werden in weiterer Folge als Spannungssignal in einem Textdokument mit definierter Struktur gespeichert.

Die gespeicherten Daten werden mit Hilfe eines eigens angefertigten Skripts unter Verwendung einer Konfigurationsdatei, welche die notwendigen Parameter für die Umrechnung der einzelnen Kanäle beinhaltet, in die wahren Messgrößen umgerechnet. Die Struktur der Konfigurationsdatei ist nachstehender Tabelle 4 zu entnehmen.

In einer Vorstufe der Labormodelldatenverarbeitung kamen unterschiedliche Datenlogger zum Einsatz. Aufgrund der begrenzten Möglichkeiten hinsichtlich Abstraten mit den bestehenden Loggern wurde ein neuer Datenlogger angeschafft. Die Anbindung der Sensoren im Endausbau erfolgt ausschließlich über den Datenlogger RedLab 2416.

Nach Umrechnung der Spannungssignale in die im Labormodell und in der Realität verwendeten Einheiten Liter pro Sekunde (l/s) sowie Druck (bar) werden die erhaltenen Daten zentral abgelegt und können in weiterer Folge in wenigen Schritten visualisiert werden sowie für etwaige Simulationen weiterverwendet werden.

TABELLE 4: STRUKTUR KONFIGURATIONSDATEI ZUR UMRECHNUNG DER SPANNUNGSSIGNALE

Kanal	Offset	Gain	Vorwiderstand	min	max	Einheit
R00	2.002	1.0664	500 Ω	0	7.5	l/s
R01	1.946	0.50175	500 Ω	0	16	bar
R02	2.005	31.5592	500 Ω	0,8	16	l/min
R03	1.999	1.3335	500 Ω	0	6	bar
R04	2.003	1.3328	500 Ω	0	6	bar
R05	1.998	1.3337	500 Ω	0	6	bar
R06	0.0015	1.5382	500 Ω	0.5	7	l/s
R07	2.004	1.6004	500 Ω	0	5	l/s
R08	2.002	1.5996	500 Ω	0	5	l/s
R09	2.006	10.0977	500 Ω	2.5	50	l/min
R10	2.006	1.5988	500 Ω	0	5	l/s
R11	2.006	31.5553	500 Ω	0.8	16	l/min
R12	0.0058	1.6657	500 Ω	0	6	bar
R13	0.0049	1.6658	500 Ω	0	6	bar

Kanal	Offset	Gain	Vorwiderstand	min	max	Einheit
R14	0.005	1.6658	500 Ω	0	6	bar
R15	2.014	31.5236	500 Ω	0.8	16	l/min
R16	2.018	31.5078	500 Ω	0.8	16	l/min
R17	2.008	31.5474	500 Ω	0.8	16	l/min
R18	2.013	31.5276	500 Ω	0.8	16	l/min
R19	2.006	31.5552	500 Ω	0.8	16	l/min
R20	2.009	31.5434	500 Ω	0.8	16	l/min
R21	2.015	31.5197	500 Ω	0.8	16	l/min
R22	2.014	31.5237	500 Ω	0.8	16	l/min
R23	2.004	31.5632	500 Ω	0.8	16	l/min
R24	2.009	31.5434	500 Ω	0.8	16	l/min
R25	2.01	31.5394	500 Ω	0.8	16	l/min
R26	2.001	0.7999	500 Ω	0	10	bar
R27	2.006	0.7994	500 Ω	0	10	bar
R28	2.011	31.5355	500 Ω	0.8	16	l/min
R29	1.9669	48.198	500 Ω	0	10	bar
R30	-	-	-	-	-	-
R31	-	-	-	-	-	-

4.2.6 MESSGENAUIGKEIT UND UNSICHERHEITEN

Dieses Kapitel beschreibt die Kriterien für die Auswahl von Sensoren unter dem Aspekt der Messgenauigkeit. Bei der Auswahl von Sensoren für eine Messanwendung wird zunächst nach

- Messbereich (Full Scale Range FS) und
- Genauigkeit G

selektiert. Die Kombination von G und FS entscheidet anschließend über die Qualität des Messergebnisses.

Ein vollständiges Messergebnis besteht nach DIN 1319 (DIN 1319, 1995) aus dem Messergebnis einzelner Messwert bzw. Rechengröße aus mehreren Messwerten) und einer Unsicherheitsangabe. Die Unsicherheitsangabe ist für die Qualität des Messergebnisses entscheidend. Aus den Geräteangaben FS und G lassen sich Garantiefehlergrenzen bestimmen. Die Angabe des vollständigen Messergebnisses besitzt für solche die Gestalt:

$$\text{Vollständiges Messergebnis} = \text{Messergebnis} \pm \text{Vertrauensbereich}$$

Der aus den Geräteangaben gewonnene Vertrauensbereich gibt ein Konfidenzintervall um das Messergebnis an, in dem der tatsächliche Wert mit 100 % Wahrscheinlichkeit liegt. Für digitale Messgeräte berechnet sich der Vertrauensbereich durch

$$\text{Vertrauensbereiche} = \text{Messbereichsendwert} \times \text{Genauigkeitsklasse} = FS \times G$$

4.2.6.1 ZAHLENBEISPIEL:

Zur Veranschaulichung soll folgendes Zahlenbeispiel dienen:

Von einem Drucksensor mit FS = 10 bar und einer Genauigkeit von G = 0.5 % wird ein Druckwert von 3 bar abgelesen. Der wahre Druck liegt somit im Intervall

$$p = 3 \text{ bar} \pm 0.5 \% \cdot 10 \text{ bar} = 3 \text{ bar} \pm 0.05 \text{ bar}$$

Der relative Fehler ergibt sich damit zu

$$Fr = 0.05 \text{ bar} / 3 \text{ bar} = 1.7 \%$$

Dieses Zahlenbeispiel soll für einen abgelesenen Druckwert von 8 bar wiederholt werden. Da die Garantiefehlergrenzen gleichbleiben, ergibt sich das vollständige Messergebnis zu

$$p = 8 \text{ bar} \pm 0.5 \% \cdot 10 \text{ bar} = 8 \text{ bar} \pm 0.05 \text{ bar}$$

Der relative Fehler ergibt für diesen Druck zu

$$Fr = 0.05 \text{ bar} / 8 \text{ bar} = 0.6 \%$$

Aus den Zahlenbeispielen ergeben sich zwei Konsequenzen für die Auswahl von Sensoren

- Der Messbereichsendwert (FS) des Messgerätes soll an den Wertebereich der Messgröße angepasst sein.
- Die Genauigkeitsklasse des Gerätes soll hoch sein (G wird dadurch klein).

Für die im Labormodell auftretenden Drücke von etwa 5 bar sind daher Geräte mit geeigneten Messbereichsendwerten zu wählen. Gängige Druckbereiche sind z.B.: 4 bar, 6 bar oder 10 bar. Dieselben Überlegungen gelten für die Auswahl von Durchflussmessgeräten.

Die Genauigkeitsklasse ist eine Gerätekenngroße, welche vom Hersteller garantiert wird. Eine Marktrecherche bei gängigen Herstellern von Drucksensoren zeigt, dass Geräte mit einer Genauigkeit G zwischen 0.5 % und 0.05 % erhältlich sind. Geräte dieser gängigen Ausführung erreichen eine Genauigkeit von G = 0.05 %.

Der Grund für die starken Streuungen (Faktor 10) der Genauigkeiten liegt jedoch weniger beim Sensor selbst, als vielmehr in der verwendeten Prozessschnittstelle des Sensors. Hierunter versteht man die elektrische Datenschnittstelle, die zur Übertragung des Messwertes verwendet wird. Tatsächlich besitzen die meisten Drucksensoren geräteintern eine höhere Genauigkeitsklasse. Durch die Verwendung einer analogen Schnittstelle ergibt sich mit dem damit verbundenen Datenverlust eine Verringerung der Genauigkeit. Nur Geräte mit einer digitalen Schnittstelle erlauben die höchsten Genauigkeiten, da bei der digitalen Informationsübertragung die Information ohne Informationsverlust transportiert werden kann.

4.2.6.2 AUTOMATISIERTE ERSTELLUNG DER STEUERUNGSMATRIX

Um Verbraucher möglichst realitätsnah im Labormodell simulieren zu können, war es notwendig, eine Methode zu entwickeln, die installierten Verbraucher in einer Art zu steuern, dass das System hinsichtlich des Tagesganges das qualitativ selbe Verhalten aufweist, wie ein reales Versorgungssystem. Die Verbraucher lediglich zufällig anzusteuern, wurde als nicht zufriedenstellend beurteilt. Aus diesem Grund wurden stattdessen reale Systemeinspeisemengen als Vorlage für die Steuerung der Verbraucher herangezogen.



Abbildung 48: Einspeisemessung Pilotregion MA31 Blau IV (4. bis 11. August 2015)

Um ein konkretes reales Beispiel zu verwenden, wurden hierzu Zeitreihen der Zuflussmengen der Pilotregion Blau IV der Magistratsabteilung 31, Wiener Wasser, (MA31) verwendet. Abbildung 48 zeigt die Zuflussmengen in die Pilotzone über einen Zeitraum von sieben Tagen. Die Einspeisemengen dieser Zone variieren in einem Bereich zwischen ca. 25 l/s in den Nachtstunden sowie rund 100 l/s zu Zeiten des Spitzenverbrauchs. Diese Gegebenheiten sollten im nächsten Schritt im Labor abgebildet werden. Hierzu war es notwendig eine Methode zu entwickeln, die eine Skalierung der realen Durchflussmengen auf Laborbedingungen erlaubt.

Basis für die automatisierte Generierung der Schaltmatrix bildet neben den Zuflussmessungen aus dem Pilotgebiet die Messung der 13 Verbraucher bei einem durchschnittlichen Versorgungsdruck von 4 bar. Die Verbraucher werden nacheinander geöffnet und der Durchfluss des Verbrauchers bei 4 bar wird als Ausgangsgröße für die Erstellung der Schaltmatrix herangezogen. Eine wichtige Rahmenbedingung, die es zu beachten gilt, ist ein Mindestdurchfluss von 0.2 l/s, welcher sicherstellt, dass die Unterwasserpumpe ausreichend Kühlung erfährt und somit Schäden an der Pumpe vorgebeugt. Basierend auf den Einzelmessungen werden nun vom Algorithmus mögliche Schaltkombinationen untersucht, welche dem skalierten Zufluss des realen Netzes entsprechen. Aus den möglichen Kombinationen wird vom Algorithmus eine zufällig gewählt und in die Schaltmatrix übertragen. Beim Erstellen der Matrix kann zusätzlich eine maximale Abweichung vom Durchfluss-Zielwert mitangegeben werden, um die Unsicherheiten des Verbrauches eines Wasserabnehmers mit abzubilden.

Das experimentelle Labormodell kann beliebige Schrittweiten hinsichtlich zeitlicher Intervalle abbilden. Das heißt, dass basierend auf der Auflösung der Echtzeitdaten beispielsweise Stunden-Mittelwerte als Zeitschritt definiert werden können. Um eine Schaltmatrix dafür zu erstellen, müssen zuerst die Felddaten in Stundenmittelwerten aufbereitet werden. Der maximale und der minimale Stundenmittelwert bilden die Schranken für die Skalierung auf Labormodellmaßstab. Stundenmittelwerte werden an dieser Stelle nur als Beispiel genannt, das Intervall kann grundsätzlich beliebig gewählt werden.

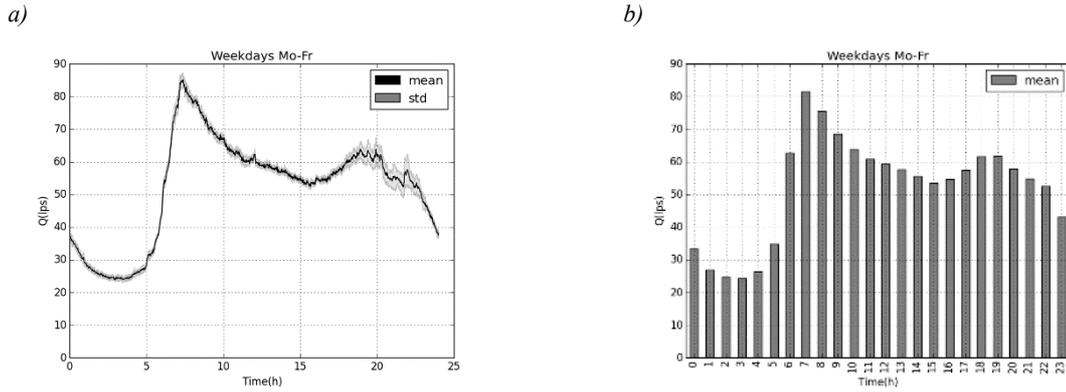


Abbildung 49: Überführung Realdaten a) in Stundenmittelwerte b)

Abbildung 49 zeigt exemplarisch die Überführung realer Einspeisedaten (Abbildung 49 a) als Mittelwert über eine Woche in Stundenmittelwerte (Abbildung 49 b) zur Weiterverwendung bei der Schaltmatrixerstellung. Für die Skalierung der einzelnen Zeitschritte in den Labormaßstab wird die Summe der maximal im Labor erreichbaren Durchflüsse auf den maximalen Stundenmittelwert der realen Messung normiert. Jeder Zeitschritt, z.B.: jede Stunde, kann in beliebig viele Teilschritte unterteilt werden. Eine schematische Darstellung zur Generierung eines Zeitschrittes im Labormaßstab ist in nachfolgender Abbildung 50 ersichtlich.

Wie in Abbildung 50 schematisch dargestellt, kann ein Zeitschritt der realen Messung in mehrere Sub-Zeitschritte im Labormodell unterteilt werden. Der Mittelwert, gebildet über die Anzahl der Sub-Zeitschritte, liefert den Zieldurchfluss. Diese Vorgehensweise wird für jeden Zeitschritt in Abhängigkeit der gewünschten Auflösung durchgeführt. Die sich daraus ergebende Schaltmatrix bildet die realen Einspeisemengen im Labormaßstab ab.

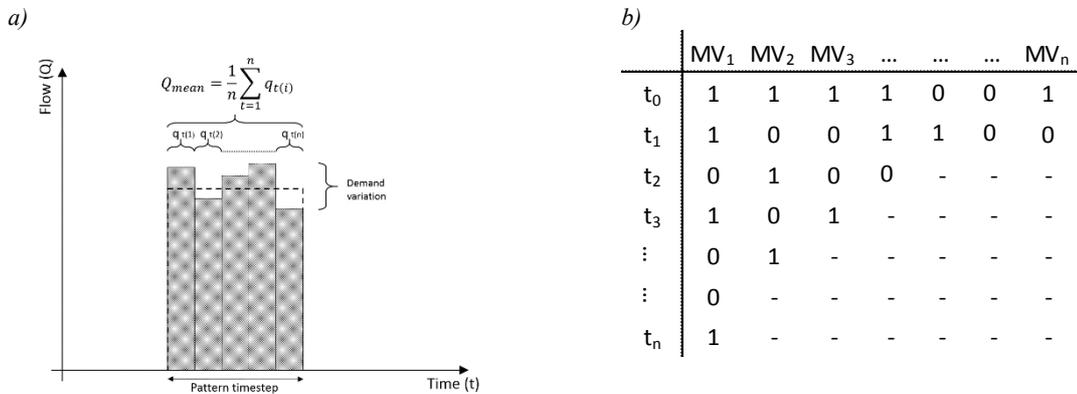


Abbildung 50: Prinzip für die Erstellung eines Zeitschrittes im Labormaßstab a), exemplarischer Aufbau einer Schaltmatrix (Günther et al., 2015) b)

Abbildung 50 b) zeigt den Aufbau der Schaltmatrix, auf Basis welcher die Verbraucher im Labormodell geöffnet bzw. geschlossen werden. Hierbei werden die einzelnen Zeitschritte als t₀ bis t_n bezeichnet. Die Bezeichnungen MV₁ bis MV_n stehen für die im Labor zu steuernden Magnetventile.

Dieser Vorgang wird so lange erneut ausgeführt bis die gewünschte Zeitreihe als Schaltmatrix (Abbildung 50 b) zu Gänze definiert ist. Nachfolgend sind die einzelnen Schritte zur Erstellung der Matrix chronologisch aufgelistet.

Ablauf zur automatischen Erstellung einer Schaltmatrix:

1. Gewünschten Versorgungsdruck am Pumpensteuerungspanel einstellen
2. Einzelmessung der Verbraucherabschnitte bei vordefinierten Druck
3. Gemessene Werte werden als Eingabegröße für die Erstellung der Schaltmatrix im Programm zur automatischen Matrixerstellung eingetragen. Gegebenenfalls kann eine maximale Abweichung vom Zielwert zusätzlich angegeben werden.
4. Programm zur Berechnung möglicher Kombinationen starten
5. Aus den möglichen Schaltkombinationen der Verbraucher, die den Zielwert erfüllen, wird eine Konfiguration zufällig gewählt und in die Matrix geschrieben
6. Der Vorgang aus Punkt 5 wird solange wiederholt, bis die gewünschte Zeitserie als Schaltmatrix vollständig erstellt ist.

Die resultierende Schaltmatrix enthält die Anzahl der Zeitschritte, wobei jeder Zeitschritt eine einzigartige Schaltkombination der Verbraucher widerspiegelt. Alle weiteren Spalten der Matrix beinhalten die Schaltzustände je Zeitschritt jedes einzelnen Verbrauchers. Basierend auf dieser Schaltmatrix erfolgt sowohl die Steuerung der Verbraucher, als auch die Steuerung auftretender Leckagen. In der Schaltmatrix unterscheiden sich Verbraucher von Leckagen wie folgt: Verbraucher wechseln je nach Schaltzustand und Zeitschritt zwischen geöffnet und geschlossen, wohingegen Leckagen ab dem Zeitpunkt des Auftretens geöffnet bleiben. Das folgende Kapitel erläutert die Steuerung des Labormodells im Detail.

4.2.6.3 STEUERUNG DES LABORMODELLS

Wasserversorgungssysteme unterliegen täglichen, wöchentlichen, monatlichen und jährlichen Schwankungen im Verbrauch. Dieses Verbrauchsverhalten kann neu entwickelte Methoden zur Leckageeingrenzung an die Grenzen der Anwendbarkeit führen, wenn diese Randbedingungen in den Methoden nicht berücksichtigt werden. Dies war unter anderem einer der Beweggründe das Labormodell auch hinsichtlich des Verbraucherverhaltens so realitätsnah als möglich zu konstruieren. Das Einbeziehen dieser Verbraucherschwankungen bzw. von Unsicherheiten im Verbrauch ermöglicht die Unterscheidung zwischen gewöhnlichen Änderungen im Verbrauch und auftretenden Undichtigkeiten im Rohrnetz.

Die Grundlage der Steuerung bildet neben dem Kontrollpanel für die Unterwasserpumpe die bereits eingeführte Schaltmatrix. Am Kontrollpanel wird die Betriebsart der Pumpe gewählt. Für die Durchführung von Experimenten zur Simulation von Leckagen wird am Panel die gewünschte Frequenz am Frequenzumformer, welche proportional zu den Umdrehungen pro Minute (rpm) der Pumpe ist, eingestellt. Damit liefert die Pumpe, unabhängig vom Verbrauch, immer dieselbe Leistung und erlaubt demnach die Simulation eines Hochbehälters mit variierendem Wasserstand.



Abbildung 51: Kontrollpanel Unterwasserpumpe

In Abbildung 51 ist ein Ausschnitt des Kontrollschrankes ersichtlich. Das Kontrollpanel (rechts) zeigt eine vordefinierte Frequenz am Frequenzumformer von 40 Hz. Die linke Seite der Abbildung zeigt die zugehörigen Messwerte für Druck (bar) und Durchfluss (l/s) am Einspeisepunkt. Mit Ausnahme der Frequenz sind alle Sensoren, welche für die Steuerung der Pumpe benötigt werden, über den einen Datenlogger an den Technikum-Computer angebunden.

Als zentrales Steuerungselement dient der Technikum-Computer, mit welchem alle Experimente ausgeführt und verwaltet werden. Das Programm zur Steuerung des experimentellen Trinkwasserversorgungsnetzes wurde in der Programmiersprache Python verfasst und beinhaltet sowohl die Steuerung der Relaiskarten und somit der einzelnen Verbraucher, als auch die Speicherung und Verarbeitung der gewonnenen Daten. Basierend auf der im Vorhinein generierten Schaltmatrix für ein durchzuführendes Experiment werden die den jeweiligen Verbrauchern zugeordneten Magnetventile per Relais geöffnet bzw. geschlossen.

Abbildung 52 zeigt den Schaltschrank, in welchem alle wesentlichen Hardware-Komponenten verbaut sind. Dieser beinhaltet die Stromversorgung der verbauten Sensoren sowie die zentrale Zusammenführung der Sensorsignale am Datenlogger und die Relaiskarten, welche wiederum die Magnetventile steuern. Vom Schaltschrank werden die Signale mit einem USB-Kabel an den Technikum-Computer weitergeleitet. Die Relaiskarten sind ebenfalls über USB an den Computer angebunden und werden über dieselbe Leitung angesteuert.

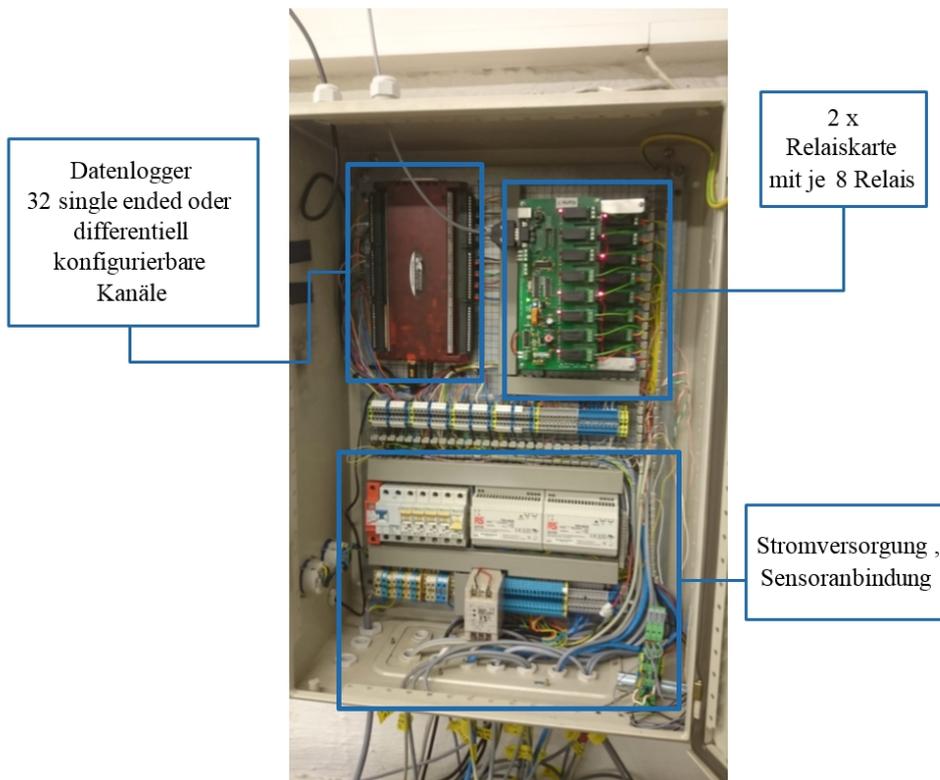


Abbildung 52: Zentraler Schaltschrank für Stromversorgung, Steuerung und Datenübertragung

Für eine ordnungsgemäße Durchführung der Experimente gilt es sicherzustellen, dass nach den Schaltvorgängen die Einschwingzeit respektive das transiente Verhalten des Labormodells berücksichtigt wird, um stationäre Verhältnisse, wie es auch in der hydraulischen Simulationssoftware EPANET implementiert ist, sicherzustellen. Magnetventile öffnen und schließen wesentlich schneller ($\ll 1$ Sekunde) als Regelventile in realen Systemen, was Druckstöße und dynamisches Verhalten im Labormodell nach sich zieht. Diesem Punkt wird mit einer Pause zwischen den einzelnen Schaltvorgängen entgegengewirkt. Aus vorgelagerten Experimenten, die dieses Verhalten genauer untersuchten, konnte eine Dauer von ca. 15 Sekunden zwischen den Schaltintervallen als ideal abgeleitet werden. Nach 15 Sekunden herrschen im Labormodell wieder stationäre Verhältnisse.

Die einfache Skalierung des realen Zuflusses in ein System auf die Gegebenheiten im Labormodell beinhaltet aufgrund der Tatsache, dass Verbraucher wie auch Leckagen im Labormodell druckabhängig sind, einen wesentlichen Punkt den es zu beachten gilt.

Nachdem alle erforderlichen Eingaben für das durchzuführende Experiment getätigt wurden, wird das Experiment durch das Ausführen des Python-Programmes gestartet. Nach dem Start werden die in der Schaltmatrix enthaltenen Zeitschritte mit den zugehörigen Schaltzuständen der Relais bzw. Magnetventile chronologisch abgearbeitet. Je nach gewähltem Aufzeichnungsintervall der Messwerte erfolgt die Speicherung der Daten in einem Text-File. Mit der beschriebenen Methodik können Zeitreihen bzw. Tagesganglinien realer Netze in vergleichsweise kurzer Zeit simuliert werden. Die Simulation von 14 Tagen erfolgt im Labor je nach gewähltem Zeitintervall in ca. 1.5 bis 3 Stunden. Wie bereits eingeführt, basieren die Experimente auf davor berechneten Schaltkombinationen. Dabei werden die Verbraucher als nicht druckabhängig angenommen, also mit konstantem Verbrauch über die Dauer des entsprechenden Zeitschrittes. Abbildung 53 zeigt die Tagesgänge von 7 Tagen. Im oberen Bereich der Abbildung sind die Stundenmittelwerte der Pilotregion dargestellt, der untere Bereich zeigt die theoretische skalierte Tagesganglinie wie sie im Labor nachgebildet wird.

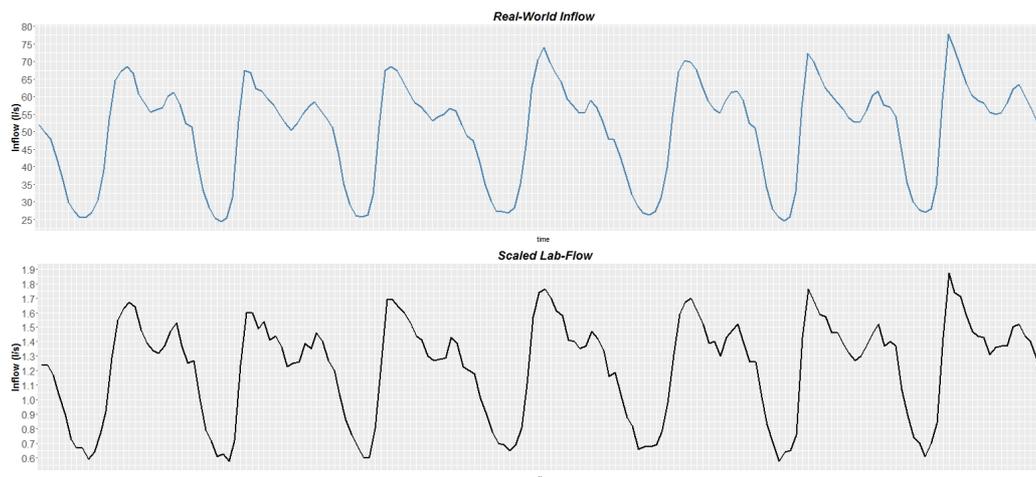


Abbildung 53: Vergleich Stundenmittelwerte Systemeinspeisung reales Versorgungssystem (oben) sowie berechneter Durchfluss im Labormodell basierend auf Schaltmatrixerstellung (unterer Teil der Abbildung)

Die in Abbildung 53 dargestellten Durchflüsse sind einander qualitativ sehr ähnlich. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass es sich hierbei noch um kein Ergebnis eines Experimentes handelt, sondern um die auf der Schaltmatrix basierenden computersimulierten theoretischen Durchflüsse. Aufgrund der Tatsache, dass der Wasseraustritt an den Verbraucherventilen im Laborexperiment druckabhängig ist, kann erwartet werden, dass die markanten Ausprägungen der Verbrauchsspitzen im Experiment nicht in diesem Ausmaß zu finden sein werden.

Um die Druckabhängigkeit der Verbraucher bzw. Leckagen zu berücksichtigen, wurden an jedem Verbraucher bzw. an jeder Leckage Durchflussmessgeräte installiert. In den Grundfunktionen von EPANET wird der Verbrauch als konstant über den betrachteten Zeitschritt betrachtet und die Druckabhängigkeit nicht in der Berechnung berücksichtigt. Druckunabhängigkeit kann im Labormodell bei der Simulation von Verbrauchern nicht gewährleistet werden, jedoch werden diese Schwankungen durch die kontinuierliche Messung der Verbraucher mitberücksichtigt und können somit bis ins Detail auch im hydraulischen Modell miteinfließen.

In folgender Abbildung 54 werden Daten eines Experiments mit einer simulierten Leckage illustriert. Es ist sehr deutlich erkennbar, dass die Verbrauchsspitzen nicht jene Ausprägungen aufweisen, wie sie theoretisch im Zuge der Erstellung der Schaltmatrix berechnet wurden. Trotzdem stellt dieser Umstand kein Hindernis dar, da im Endeffekt nur eine Verbrauchsganglinie nachempfunden wurde und das Ziel nicht darin bestand, das reale Netz mit all seinen Einzelheiten detailgetreu nachzubilden.

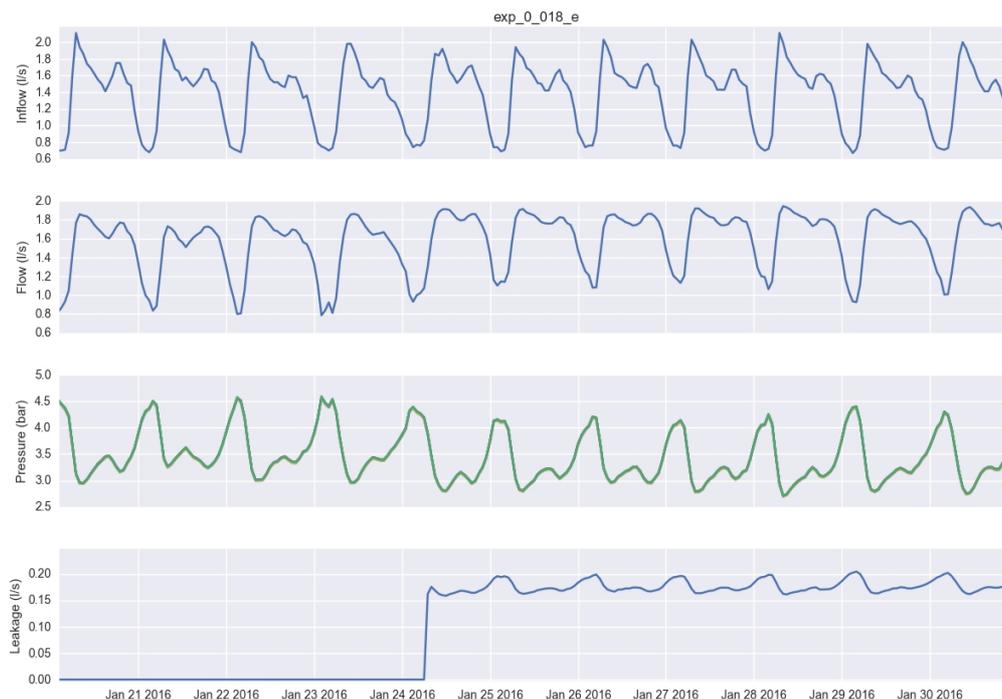


Abbildung 54: Vergleich berechneter Labordurchfluss, im Labor simulierter Durchfluss, Drucksignale sowie auftretende Leckage (von oben nach unten) (Günther et al., 2016)

In Abbildung 54 ist der Unterschied zwischen berechnetem und simuliertem Durchfluss hinsichtlich der Verbraucherspitzen deutlich zu erkennen. Die Verbraucherspitzen, welche im obersten Teil der Abbildung über den Wert von 2 l/s reichen, werden im Experiment um rund 0.1 l/s unterschritten. Dieser Umstand rührt aus den bereits erwähnten Druckabhängigkeiten der Verbraucher, der auch im untersten Graphen von Abbildung 54 gut zu erkennen ist. Die in diesem Experiment simulierte Leckage schwankt je nach Versorgungsdruck nach dem Auftreten in einem Bereich von ca. 0.15 l/s und 0.2 l/s. Die zugehörige Druckmessung (dritter Graph von oben, in grün gehalten) zeigt die Schwankungen in Anhängigkeit der Verbrauchersituation deutlich.

Diese Schwankungen im Druck treten auch in realen Systemen auf und bestätigen die Effektivität vom sogenanntem Druckmanagement, bei dem zu verbrauchsarmen Tageszeiten (meistens in den Nachstunden zwischen 1 Uhr und 4 Uhr) der Versorgungsdruck gezielt auf das geringstmögliche Maß reduziert wird, um den Wasserverlust durch bestehende Leckagen zu verringern. Je nach Versorgungsstruktur und Rahmenbedingungen der Wasserversorgungsunternehmen kann ein implementiertes Druckmanagement die Wasserverlustmengen signifikant reduzieren. Trotzdem darf ein wesentlicher Aspekt nicht außer Acht gelassen werden, nämlich, dass durch das Geringhalten der Versorgungsdrücke potentielle Leckagen kaum oder nur mit entsprechend hohem Aufwand gefunden werden und so ggf. sehr lange Leckagelaufzeiten auftreten können.

Die Resultate der durchgeführten Experimente werden zum einen als Rohdaten in Form der übertragenen Spannungssignale gespeichert und zum anderen als umgerechnete Messgrößen am Server des Instituts abgelegt.

4.2.7 DATENMANAGEMENT

Die gespeicherten Daten werden am Server gesichert und parallel dazu in OpenSDM (Camhy D. et al., 2014), einem am Institut für Siedlungswasserwirtschaft entwickelten Datenverarbeitungs- und

Verwaltungssystem, weiterverarbeitet. OpenSDM bietet dann unter anderem die Möglichkeit alle experimentellen Daten zu visualisieren und Zusatzinformationen, wie beispielsweise sensorspezifische Daten, Wartungsintervalle und Zuständigkeiten, zentral zu verwalten.

Des Weiteren werden die Experimente lückenlos dokumentiert und können jederzeit zur Gänze nachvollzogen werden. Zu jedem Experiment existiert ein hydraulisches Modell, in welchem alle Randbedingungen desselben enthalten sind. Das gegenständliche experimentelle Trinkwasserverteilnetz bietet die Möglichkeit auf Basis der generierten wissenschaftlichen Datensätze, verschiedene Methoden einander gegenüberzustellen z.B. modellgestützte Leckageeingrenzung oder Methoden der hydraulischen Kalibrierung (Günther et al., 2016).

4.3 FELDVERSUCH

In diesem Kapitel werden die beiden Pilotregionen und in weiterer Folge die Tätigkeiten in den Pilotnetzen beschrieben. Ziel des Feldversuches bzw. der Feldversuche war es, die erarbeitete Methodik der modellgestützten Leckageeingrenzung in realen Versorgungsstrukturen zu testen.

4.3.1 PILOT WIEN – ZONE BLAU IV

Die Pilotregion liegt im westlichen Bereich der Stadt Wien, größtenteils im 13. Gemeindebezirk Hietzing, allerdings liegt ein kleiner Teil des Pilotnetzes auch im 14. Gemeindebezirk Penzing. Die Versorgung der Zone mit Trinkwasser erfolgt vom Behälter Rosenhügel ausschließlich gravitativ.

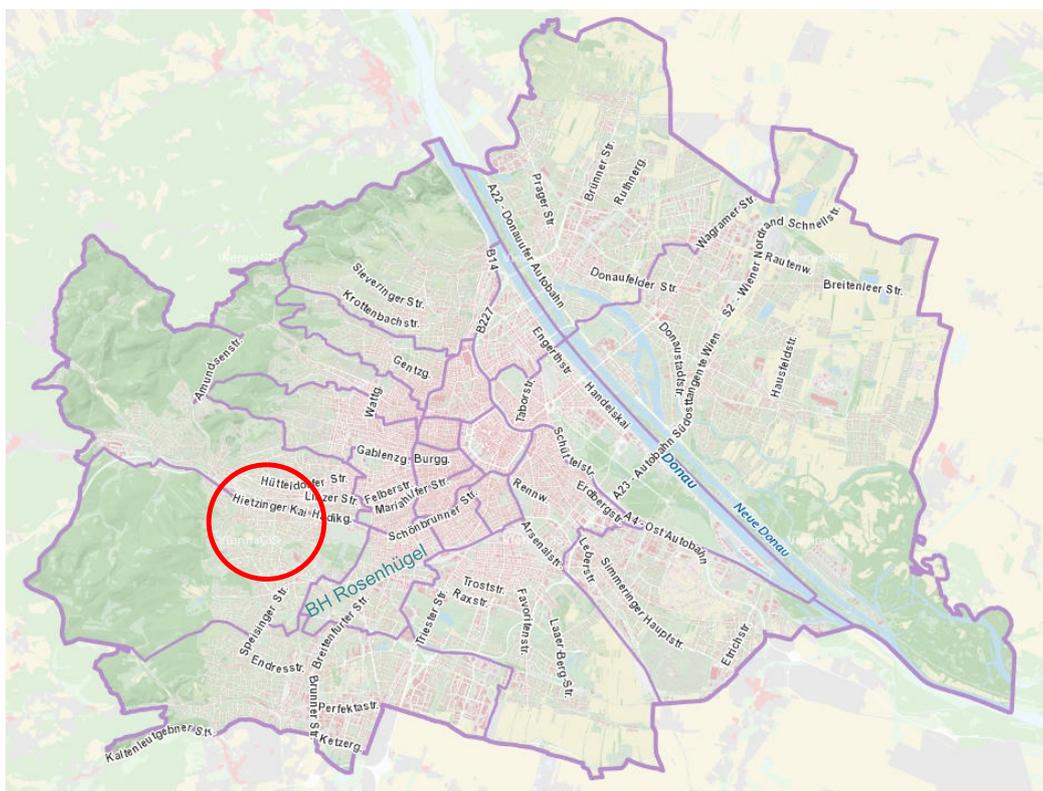


Abbildung 55: Lage Pilotregion Wien, Zone Blau IV

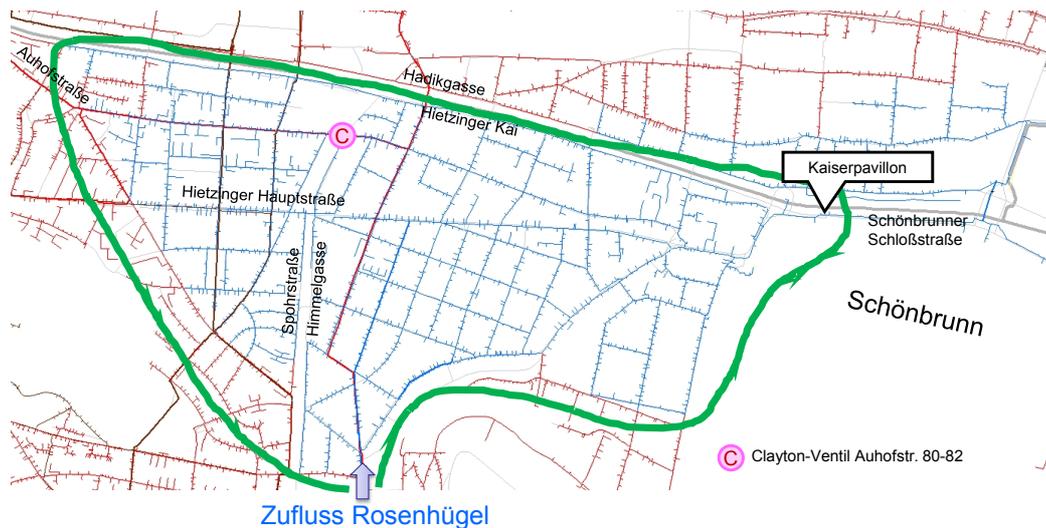


Abbildung 56: Detailausschnitt Pilotregion Zone Blau IV

Abbildung 56 zeigt einen Detailausschnitt der Pilotregion nahe des Schlosses Schönbrunn. Die Messstationen sind mit Durchfluss- und Druckmessungen ausgestattet. Zur Messung des Durchflusses am Zulauf des Behälters Rosenhügel sowie am Kaiserpavillon kommen Ultraschall-Durchflussmessgeräte zum Einsatz. Die Spezifikation des temporär als auch stationär installierbaren Durchflussmessgerätes kann Tabelle 5 entnommen werden. Die Kosten umfassen sowohl die Anschaffung des Messgerätes als auch die Installation und Datenverarbeitung.

TABELLE 5: SPEZIFIKATION DES DURCHFLUSSMESSGERÄTES IN DER MESSSTATION GALLGASSE (BEHÄLTER ROSENHÜGEL)

FLEXIM	FLUXUS F401
Messprinzip	Ultraschall-Laufzeitdifferenz-Korrelationsverfahren
Strömungsgeschwindigkeit	0.01...25 m/s
Reproduzierbarkeit	0.25 % v. MW ±0.01 m/s
Fluid	Wasser und akustisch ähnliche Flüssigkeiten mit Gas- und Feststoffanteil < 6 % des Volumens
Messwertabweichung - Volumenstrom	±2 % v. MW ±0.01 m/s
Kosten	Euro 7.000,-- bis 8.000,--

An der Position Gallgasse handelt es sich um eine fest installierte Durchflussmessung. Ein kontinuierlicher Betrieb dieser Messstation wurde mit November 2014 sichergestellt. Am Kaiserpavillon handelt es sich um eine temporär installierte Messung, welche demnach auch Personalaufwand zur Sicherstellung der Stromversorgung (Batteriewechsel) nach sich zieht. Außerdem kann es aufgrund leerlaufender Akkus zu kurzfristigen Ausfällen der Datenübertragung bzw. Aufzeichnung kommen.

Neben den permanenten Durchflussmessungen an den genannten Positionen wurden im Pilotgebiet fünf weitere Druckmessgeräte installiert. Die Einbaupositionen sind in Abbildung 57 ersichtlich.

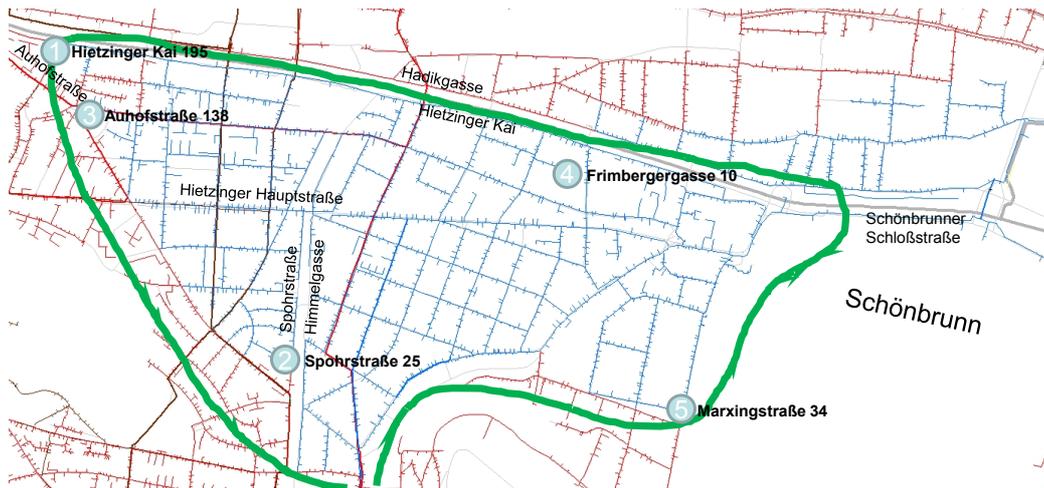


Abbildung 57: Positionen Drucksensoren Zone Blau IV (Quelle: DI Schuster, MA31)

Die Spezifikationen der eingebauten Drucksensoren sind Tabelle 6 zu entnehmen. Grundsätzlich gilt es bei den Druckmessungen zweierlei Installationsformen zu unterscheiden. Dies sind Messungen an Hydranten und Messungen im Hausanschlussbereich. Die Messung der Drücke an ausgewählten Hydranten im Verteilsystem erfordert regelmäßige Tätigkeiten wie Batteriewechsel und Kontrolle auf Beschädigungen, außerdem muss an das Einfrieren der Sensoren gedacht werden. Daher sind Messungen an Hydranten mit den dafür vorgesehenen Messköffern nur zu ausgewählten Jahreszeiten möglich.

Eine sehr innovative Form der Druckmessung stellt die Installationsform im Hausanschlussbereich dar. Beispielsweise bietet die Installation direkt vor dem Hauswasserzähler eines Mehrparteien- oder Zinshauses mehrere Vorteile: Zum einen kann davon ausgegangen werden, dass die Energieversorgung in den meisten Fällen direkt angebunden werden kann und zum anderen ist dieser Installationsort witterungsunabhängig.

Trotz der Vorteile der permanenten Stromversorgung und Witterungsunabhängigkeit bringt der Einbau einen entsprechenden Aufwand mit sich. Neben der Herstellung der Anschlüsse muss auch an die Zugänglichkeit gedacht werden und ggf. sind diverse Vereinbarungen mit den Kunden notwendig (z.B. Betreten des Grundstückes im Zuge der Installation bzw. bei Wartungen). Man ist zum Teil auf das Entgegenkommen der Kunden angewiesen.

TABELLE 6: SPEZIFIKATION DER EINGEBAUTEN DRUCKSENSOREN

BD SENSORS	DMP 331
Edelstahlsensor	Druckmessumformer
Messbereich	0 – 16 bar abs.
Genauigkeit	Nach IEC 60770
Standard	Nenndruck < 0.4 bar: $\leq \pm 0.5\%$ FSO Nenndruck ≥ 0.4 bar: $\leq \pm 0.35\%$ FSO
Langzeitstabilität	$\leq \pm 0.1\%$ FSO / Jahr
Einstellzeit	≤ 10 ms
Kosten	ca. Euro 2.000,- pro Stück

4.3.2 PILOT WASSERVERBAND GRAZERFELD SÜDOST (HART BEI GRAZ)

Der Feldversuch in einem Teilnetz des Wasserverbandes Grazer Feld Südost (GFSO) ergab sich aus einem EU-Projekt namens AQUADEMIA, welches im Jahr 2015 am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und

Landschaftswasserbau in Zusammenarbeit mit anderen Universitäten durchgeführt wurde. Inhalt des Projektes war es, Studenten aus anderen Universitäten in Unternehmen im Themenbereich Wasser zu beschäftigen, um Ihnen einen Einblick in die Praxis zu ermöglichen. Lisa Landuyt von der Universität Gent führte im Zuge dieses Projektes ein Praktikum in einer Grazer Firma durch. Der Wasserverband GFSO stellte hierzu ein Teilnetz zur hydraulischen Kalibrierung zur Verfügung. Ziel war es, das Teilnetz in Hart bei Graz zu kalibrieren. Die Betreuung der Studentin erfolgte neben den Mitarbeitern Grazer Firma auch durch das Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau.

Im Zuge des Projektes Aquademia wurde bereits im August 2015 eine Messkampagne im Teilnetz Hart bei Graz durchgeführt. Erstes Ziel der Messkampagne war es Messdaten zu generieren, um eine Kalibrierung des hydraulischen Modells vornehmen zu können. Die Kalibrierung des hydraulischen Modells sollte sicherstellen, dass die Methode der modellgestützten Leckageeingrenzung bestmögliche Ergebnisse liefert. Die erste Messkampagne war eine Vorstufe zu den eigentlichen Feldversuchen mit dem Ziel, potentielle Unsicherheiten und Fehlinformationen, wie beispielsweise Lageungenauigkeiten oder fehlenden Leitungen im hydraulischen System, bereits im Vorfeld erkennen und so gering wie möglich halten zu können. Die folgenden Abbildungen zeigen die geographische Lage des Projektgebietes sowie die Eckdaten der Pilotregion.

4.3.2.1 LAGE UND ECKDATEN PILOT GFSO

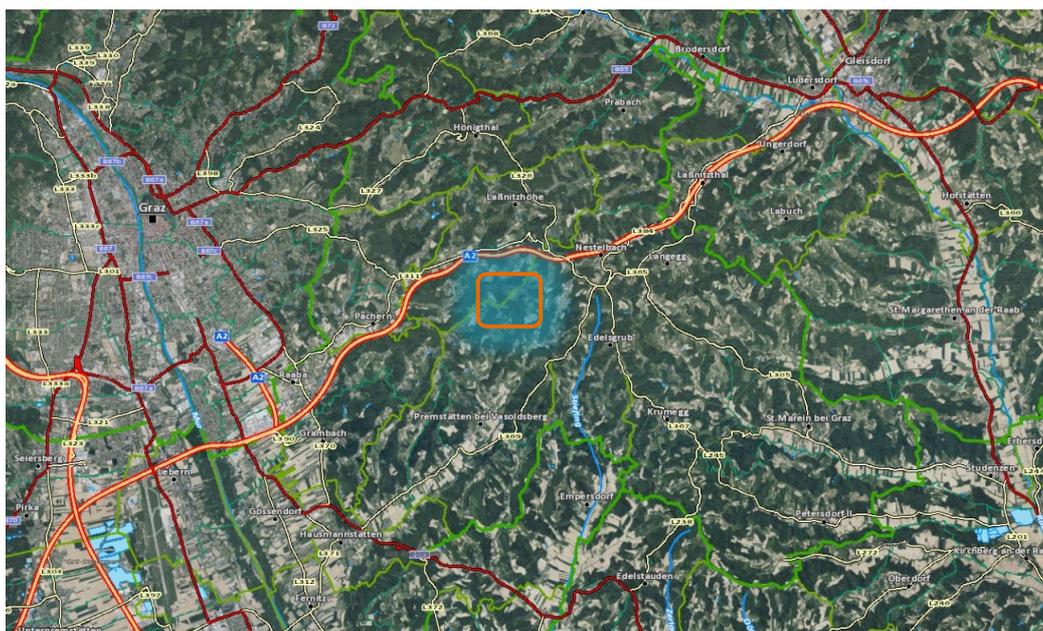


Abbildung 58: Geographische Lage Pilot Wasserverband Grazer Feld Südost – Hart bei Graz (Quelle: GIS-Steiermark)



Abbildung 59: Ausschnitt Luftbild der Pilotregion in Hart bei Graz (Quelle: GIS-Steiermark)

In Abbildung 58 ist die geographische Lage des Projektgebietes zur Stadt Graz ersichtlich. Das Projektgebiet liegt im Osten der Stadt Graz und ist mit einer orangen Umrahmung mit blauem Hintergrund gekennzeichnet. Das Pilotnetz liegt in der Gemeinde Hart bei Graz. Ein Detailausschnitt als Luftbild ist in Abbildung 59 dargestellt. Auf Basis der Daten im geografischen Informationssystem konnten folgende Rahmenbedingungen bzw. Eckdaten abgeleitet werden:

- 350 Hausanschlüsse
- 1 Behälter – Koppenhof (300 m³)
- Leitungslänge 16 km
- Hauptleitungen DN 80 bis DN 125 mm
- Hausanschlüsse DN 25.4 bis DN 50.8 mm bzw. 1-Zoll und 2-Zoll Leitungen
- Materialmix: hauptsächlich PVC (aber auch PE-HD, ST, GGG)

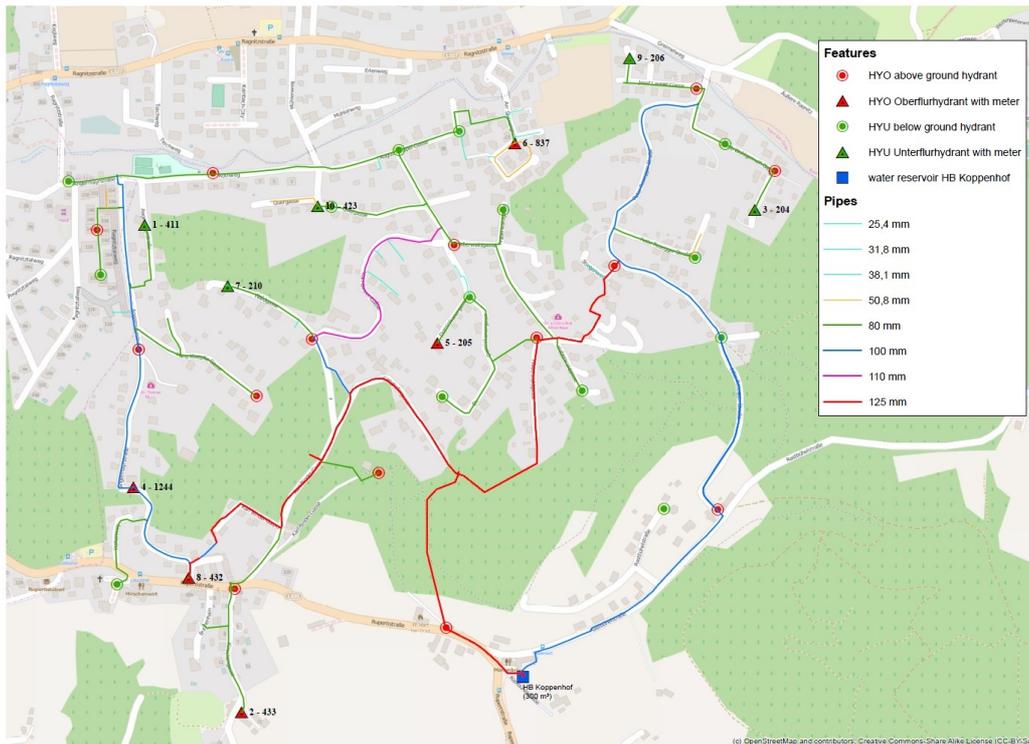


Abbildung 60: Übersicht der Pilotregion in Hart bei Graz inklusive vorhandener Leitungsdurchmesser sowie Ober- als auch Unterflurhydranten

Basierend auf den zur Verfügung gestellten Daten des Wasserverbandes GFSO wurde ein hydraulisches Modell im Modellierungsprogramm Mike Urban erstellt. Nach der Überführung der GIS-Daten in ein hydraulisches Modell konnte im nächsten Schritt das hydraulische Modell von der kommerziellen Software Mike Urban exportiert werden, um die Open Source Software EPANET nutzen zu können. Zusätzlich zum hydraulischen Modell wurden Abrechnungsdaten der Kunden in der Pilotregion für den Zeitraum 2010 bis 2014 zur Verfügung gestellt.

4.3.2.2 ZEITLICHER ABLAUF PILOTVERSUCHE HART BEI GRAZ

Im Wesentlichen wurden in diesem Pilotgebiet zwei ausgedehnte Messprogramme durchgeführt. Die erste Messkampagne fand im August 2015 statt. Wie bereits erwähnt, bestand das Ziel der Messkampagne im August 2015 darin, Messwerte für die Kalibrierung des hydraulischen Modells zu generieren.

Zu diesem Zwecke wurden im Vorfeld potentielle Hydranten bzw. optimale Positionen für die Messungen definiert. Die Kalibrierungsmessungen haben die Intention, das hydraulische System kurzfristig unter Stress zu versetzen. Dabei werden hohe Druckhöhenverluste infolge großer Wasserentnahmen an Hydranten in den Trinkwasserleitungen erzeugt, um die Kalibrierung der betrieblichen Rauigkeiten von Rohrabschnitten im System zu ermöglichen.

4.3.2.2.1 ABLAUF NACHTMESSUNGEN AUGUST 2015

Mit den drei zu Verfügung gestellten Hydranten-Prüfgeräten konnten in einer Nacht in zwei Messdurchgängen insgesamt sechs Positionen in unterschiedlichen Öffnungskonfigurationen durchgeführt werden. Das abwechselnde Öffnen der Hydranten an unterschiedlichen Positionen sollte sicherstellen, dass eine möglichst große Anzahl an unterschiedlichen hydraulischen Zuständen für das Pilotgebiet generiert wird. Auf Basis dieser Messdaten sollte im nächsten Schritt die Kalibrierung des hydraulischen Modells durchgeführt werden.

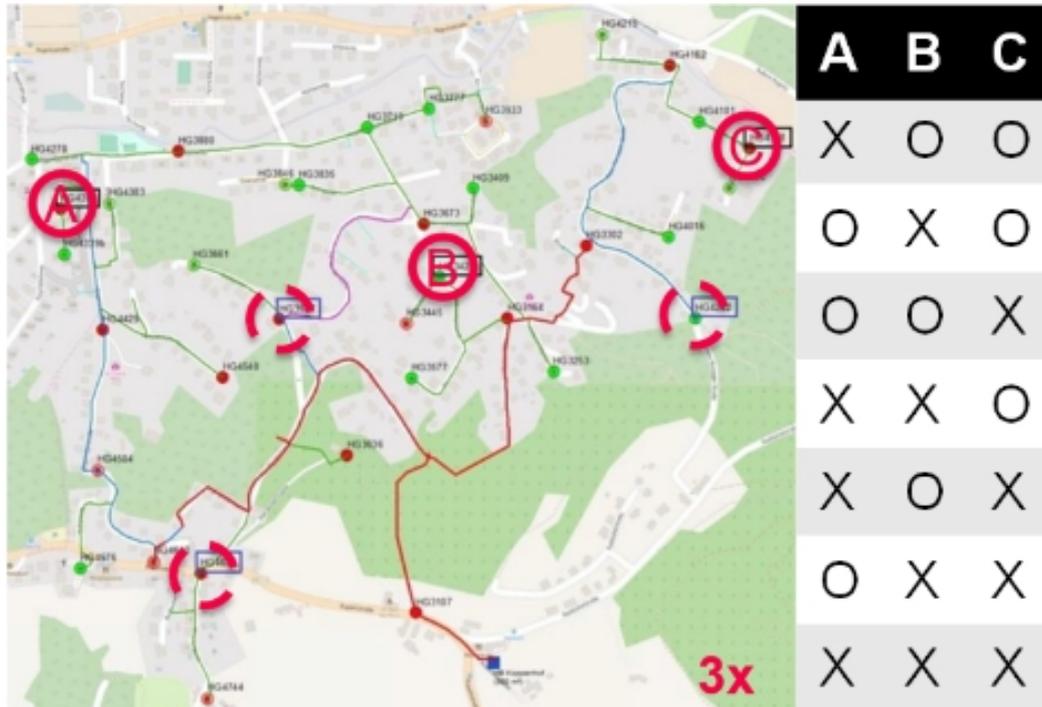


Abbildung 61: Positionen der geöffneten Hydranten sowie Ablauf der Öffnungsvorgänge

Die in Abbildung 61 ersichtlichen Kreise mit den Buchstaben A, B und C illustrieren die ersten Positionen der Hydrantenmessungen. Nach der Abarbeitung der Matrix, welche auf der rechten Seite in Abbildung 61 ersichtlich ist, wurden die Hydranten-Messgeräte an den drei anderen Positionen in Stellung gebracht und nach selber Methode geöffnet. Während der Nachtmessungen wurden die Daten in Sekunden-Zeitschritten aufgezeichnet, um die hydraulischen Kenngrößen Druck und Durchfluss während der Belastungszustände so genau wie möglich abzubilden.

Die gesammelten Daten dieser ersten Messkampagne wurden in weiterer Folge dafür verwendet, das hydraulische Modell zu kalibrieren. Im Zuge der Bearbeitung des hydraulischen Modells im Projekt Aquademia konnte eine nicht dokumentierte Leitung sowie ein defekter Scheiber im gegenständlichen Pilotgebiet identifiziert werden. Allein dieser Umstand zeigt den großen Nutzen eines hydraulischen Modells. Auch wenn das Modell noch nicht kalibriert ist, kann aufgrund signifikanter Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten hydraulischen Kenngrößen auf Unstimmigkeiten bzw. Abweichungen zwischen Modell und realem Netz geschlossen werden.

Nachdem durch die Messkampagne einige neue Erkenntnisse erlangt werden konnten, wurde im April 2016 eine neue Messkampagne ausgearbeitet.

Die Rahmenbedingungen hatten sich entsprechend verbessert, neben einer höheren Anzahl an Sensoren für die Druckmessungen im Pilotnetz, war ein bereits vorkalibriertes hydraulisches Modell vorhanden. Zudem wurden in der Zwischenzeit Algorithmen für eine automatisierte Kalibrierung des hydraulischen Modells erarbeitet.

4.3.2.2.2 MESSKAMPAGNE FRÜHJAHR 2016

Im April 2016 wurde mit der zweiten Messkampagne begonnen, diese hatte zum Ziel die Kalibrierung zu optimieren und Leckagen zu simulieren.

METHODIK

Im Zeitraum von April 2016 bis August 2016 wurden sowohl Langzeitbeobachtungen des Druckes im ungestörten hydraulischen System, als auch Nachtmessungen zu Kalibrierungszwecken durchgeführt. Außerdem erfolgte eine Simulation von Leckagen durch das Öffnen von Hydranten an unterschiedlichen Punkten im System, um die entwickelten Methoden im Feld testen zu können.

In einem ersten nächtlichen Messeinsatz Mitte April wurden daher wieder Messungen bzw. Hydrantenöffnungen zu Kalibrierungszwecken durchgeführt. Danach wurden an verschiedenen Positionen im Netz Leckagen unterschiedlicher Größe, ebenfalls durch Öffnen von Hydranten simuliert. Im Anschluss daran und teilweise auch zwischen den Phasen der Leckagesimulation wurde das ungestörte System beobachtet.



Abbildung 62: Kalibrierungsmessung mit Hydranten-Prüfgerät

Dazu wurden 12 Drucksensoren an berechneten idealen Positionen im Netz verteilt (siehe S. 137 Sensorplatzierung Ergebnisse). Die Einspeisemenge in die Pilotregion wurde wie auch schon in der ersten Messkampagne mit einem Ultraschall-Durchflussmessgerät erfasst.

Die Leckagen unterschiedlicher Größe wurden mit einer speziellen Apparatur, welche in Abbildung 63 ersichtlich ist, realisiert.



Abbildung 63: Rohrabschnitt zur Simulation von Leckagen unterschiedlicher Größe im Feld

Der Rohrabschnitt wurde mit einem lebensmittelechten C-Druckschlauch an den Hydranten, welcher als Rohrbruchort gewählt wurde, angeschlossen. Um die austretende Wassermenge am Rohrabschnitt zu erfassen, wurde am PE-Rohr ebenfalls ein Ultraschall-Durchflussmessgerät angebracht. Mit dem Ventil am Ende des Rohrabschnittes konnte mittels Handrad die Menge des entweichenden Wassers auf den gewünschten Bereich eingestellt werden. Die Länge des Rohres wurde so gewählt, dass eine reibungslose Messung mit ausreichender Beruhigungsstrecke vor und nach dem Sensor gewährleistet werden konnte.

Die Leckagen wurden jeweils für einen Zeitraum von drei aufeinanderfolgenden Tagen auf den gewünschten Leckausfluß eingestellt. Während dieser drei Tage wurden alle hydraulischen Kenngrößen wie Druck und Durchfluss in Minutenintervallen aufgezeichnet.

Die im Pilotnetz simulierten Leckagen variierten zwischen ca. 0.25 l/s und ca. 1 l/s. Am Ende des Rohrabschnittes wurde ein PVC-Schlauch angebracht, um das Geräusch des austretenden Wassers zu dämpfen und das Wasser kontrolliert der Kanalisation durch Einleiten in den nächstgelegenen Gully zuzuführen.



Abbildung 64: Simulierter Rohrbruch an einem Hydranten und Absicherung gegenüber öffentlichem Verkehr

Die Stromversorgung der Sensoren erfolgte über in den Druckloggern integrierte Akkus. Die Durchflussmessungen wurden über Autobatterien (bei den Hydranten) bzw. über das Stromnetz (im Hochbehälter) mit Strom versorgt.

Abbildung 65 und Abbildung 66 zeigen die installierten Durchfluss- und Drucksensoren. Wie in Abbildung 66 zu erkennen ist, können die Drucklogger sowohl an Oberflur- als auch an Unterflurhydranten angebracht werden. Nach der Ausbringung der Sensoren bzw. deren Installation wurde mittels der zugehörigen Bedienungssoftware das gewünschte Zeitintervall für die Aufzeichnung der Messdaten festgelegt.

Die Datenaufzeichnung erfolgte automatisch im gewünschten Intervall. Basierend auf dem Aufzeichnungsintervall variierten jedoch die Laufzeit bzw. der Zeitraum bis zum Überlauf des internen Gerätespeichers. Dieser Umstand muss im Vorhinein beachtet werden, um das Auslesen der einzelnen Datenlogger in entsprechenden Zeitintervallen zu organisieren.

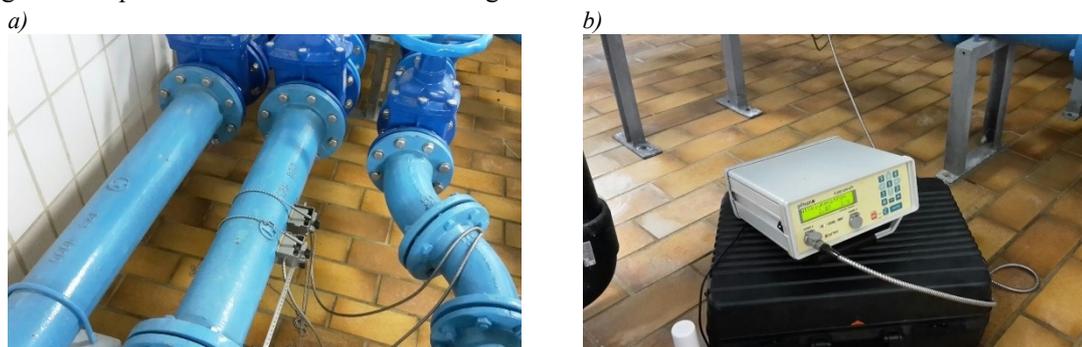


Abbildung 65: Installiertes Ultraschall-Durchflussmessgerät am Behälter Koppenhof, a) angebrachter Sensor auf der Zubringerleitung, b) Datenlogger zum Aufzeichnen der Daten

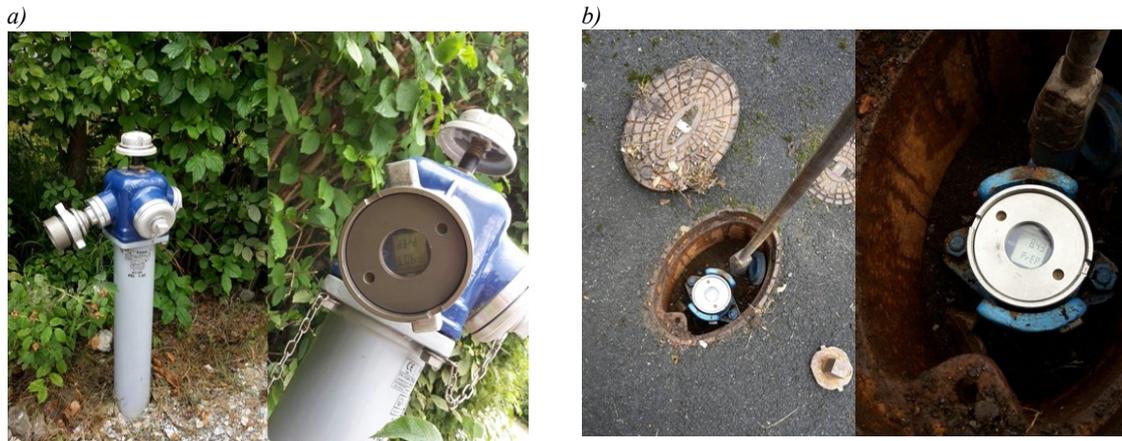


Abbildung 66: Installierte Druckmessgeräte a) Oberflurhydrant, b) Unterflurhydrant

4.3.2.3 DATENMANAGEMENT, AUSLESEN DER DRUCKLOGGER

Das Abholen der Daten musste vor Ort am Sensor erfolgen, eine Fernübertragung der Daten war in diesem Fall nicht verfügbar und auch nicht zweckmäßig, da hierfür eine gesonderte Stromversorgung erforderlich gewesen wäre. Die zur Verfügung gestellten Drucklogger haben vorwiegend den Zweck, temporär für hydraulische Messungen in einem Netz ausgebracht zu werden, um im Nachhinein datentechnisch analysiert zu werden. Ein dauerhafter Verbleib im Verteilsystem ist für diese Art von Sensoren nicht vorgesehen.

Aufgrund der Speicherkapazität der einzelnen Sensoren musste ein Intervall für das Auslesen der Daten festgelegt werden. Dies erfolgte auf Basis der Sensoren mit den geringsten Speicherkapazitäten, um alle Sensoren möglichst zeitgleich auslesen zu können und mehrmaliges Anfahren der Sensoren zu vermeiden.

Die auf den Laptop übertragenen Daten wurden in weiterer Folge in OpenSDM zentral verwaltet. Die erfassten Daten können dadurch jederzeit zur Weiterverarbeitung herangezogen werden.

Die Messkampagne startete mit dem Einbau der Drucksensoren am 5. April 2016 und wurde bis Ende August unter verschiedensten Belastungszuständen sowie künstlich erzeugten Leckagen verschiedener Ausprägungen durchgeführt. Diese ermöglichten zum einen ein besseres Verständnis des hydraulischen Systems und zum anderen die Methode der modellgestützten Leckageeingrenzung und des Sensorplacements mit den gewonnenen Daten zu evaluieren.

Diese Evaluierung erfolgte auf Basis unterschiedlicher Sensorplatzierungsalgorithmen und wird im Kapitel Ergebnisse (Kapitel 5.3.2, Seite 109) genauer erläutert.



Abbildung 67: Auslesen der Sensoren im Behälter und am Hydranten

5 ERGEBNISSE

DIESES KAPITEL BEINHALTET die erzielten Projektergebnisse. Im speziellen wird auf die Resultate aus Simulationen, aus dem experimentellen Trinkwasserverteilnetz (EWDS-TUG) und nicht zuletzt auf die Anwendung der Methode im Feldversuch eingegangen.

Die vorgestellte Methodik zur modellgestützten Leckageeingrenzung zeigte in allen angesprochenen Teilbereichen zufriedenstellende Ergebnisse und die Leckage(n) konnte(n) auf einen kleinen Teilbereich des Versorgungsnetzes eingegrenzt werden.

Speziell während der Feldversuche konnten eine Zahl von wichtigen Parametern, die es für eine erfolgreiche Implementierung der Methode zu beachten gilt, identifiziert werden. Dazu gehören vor allem Kenntnisse über die hydraulischen Gegebenheiten (wie z.B. geodätische Höhen neuralgischer Einbauten wie Hydranten, Behälter und auch Schieber oder fehlende Leitungen im Modell) und mögliche Betriebszustände (e.g. geschlossene oder defekte Schieber). Nicht zuletzt spielt die Art und Genauigkeit der Sensoren sowie der sorgfältige Umgang mit den Sensoren und die Prüfung der gewonnenen Daten eine entscheidende Rolle.

In der Pilotregion in Hart bei Graz, einem rund 16 km langen und hydraulisch eindeutig begrenzten Teilnetz, konnten Leckagen zwischen 0.5 l/s und 1 l/s auf einen Teilbereich von weniger als 500 m eingegrenzt werden. Für die in diesem Teilnetz vorherrschenden Rahmenbedingungen eignet sich demnach die Methode um auftretende Leckagen auf einen kleinen Teilbereich einzugrenzen.

5.1 MODELLBASIERTE LECKAGEEINGRENZUNG – ERGEBNISSE COMPUTERSIMULATION

5.1.1 EINFLUSS VON UNSICHERHEITEN AUF DIE IDEALE SENSORPLATZIERUNG

In diesem Unterkapitel wird am Beispiel eines realen TVN gezeigt, welchen Einfluss Unsicherheiten auf die idealen Sensorpositionen sowie die ideale Anzahl von Sensoren in einem TVN haben. Zusätzlich wird durch die Einführung einer Kosten-Nutzen-Funktion für die Berechnung einer idealen Sensorplatzierung eine effizientere Herangehensweise vorgestellt, um nicht alle möglichen Varianten einer Sensorplatzierung für jede Anzahl an Sensoren berechnen zu müssen. Dies erlaubt schon nach wenigen Berechnungsdurchläufen eine Abschätzung bezüglich der Anzahl an notwendigen Sensoren um Leckagen erfolgreich eingrenzen zu können. Zudem kann damit abgeleitet werden, welche Auswirkungen Unsicherheiten auf die Anzahl der notwendigen Sensoren haben. Details der Methode sind in (Steffelbauer & Fuchs-Hanusch, 2016a) ersichtlich.

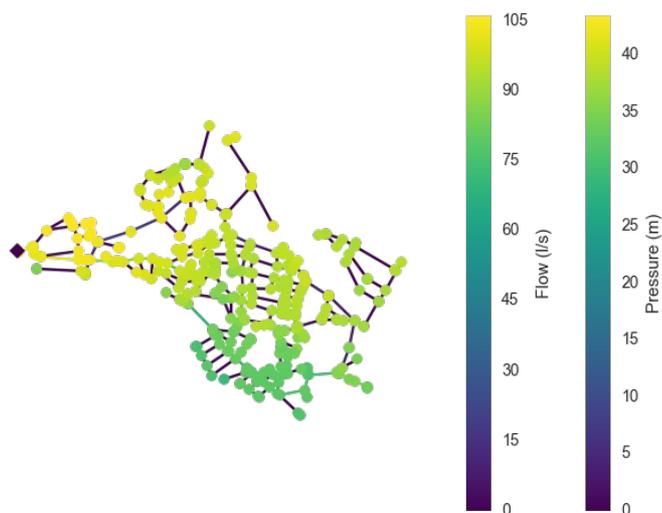


Abbildung 68: Hydraulisches Modell des Teilnetzes Linz-Pichling

Als Modellnetz dient das hydraulische Modell des Teilnetzes Linz-Pichling. Das betrachtete Versorgungsgebiet ist eine Wohngegend mit einigen kleinen gewerblichen Betrieben. Das Teilnetz wird über einen Einspeisepunkt versorgt, im hydraulischen Modell wird die gravitative Versorgung des Gebietes durch einen Behälter am Einspeisepunkt simuliert (Viereck ganz links in Abbildung 68) An einem Ablaufpunkt des Netzes erfolgt eine Wasserübergabe an eine angrenzende Gemeinde. Diese wird im Modell als einzelner Großverbraucher angesetzt (Punkt rechts unten in Abbildung 68). Das hydraulische Modell besteht aus 392 Knoten, die über 452 Leitungen mit Durchmessern zwischen 70 mm bis 400 mm verbunden sind. Die Gesamtlänge aller Leitungen beträgt rund 37 km. Die Drücke während des Nachtminimums variieren zwischen 29.31 m und 43.46 m Wassersäule. Es wurde angenommen, dass Druck und Durchfluss am Zulauf und am Ablauf des Netzes permanent gemessen werden. Diese bereits platzierten Sensoren wurden als Randbedingung im optimalen Sensorplacement angenommen. Das hydraulische Modell wurde vor einigen Jahren im Zuge einer Messkampagne durch Anpassung von Rohrrauigkeiten kalibriert. Die Wasserverbrauchsinformation wurde aus den Daten der jährlichen Zählerablesung gewonnen.

Abbildung 69 illustriert im linken Teil der Abbildung, wie sensitiv alle möglichen Knoten im System auf Druckänderungen infolge Leckagen reagieren. Die rechte Seite von Abbildung 69 zeigt, auf welche Knoten Unsicherheiten in den Verbräuchen eine Auswirkung haben. Je größer die Werte an den Knoten desto sensitiver sind sie auf Leckagen bzw. desto größer sind die Auswirkungen von Verbrauchern an diesen Knoten. Es ist ersichtlich, dass im oberen Bereich des Netzes Knoten existieren, die sowohl empfindlich auf Leckagen reagieren, als auch bei unsicheren Verbräuchen die größte Auswirkung haben. Diese Positionen sind demnach als weniger ideal anzusehen, um Sensoren zu installieren. Dies impliziert die Notwendigkeit, dass Verbrauchsunsicherheiten in einem Algorithmus zur idealen Sensorplatzierung berücksichtigt werden.

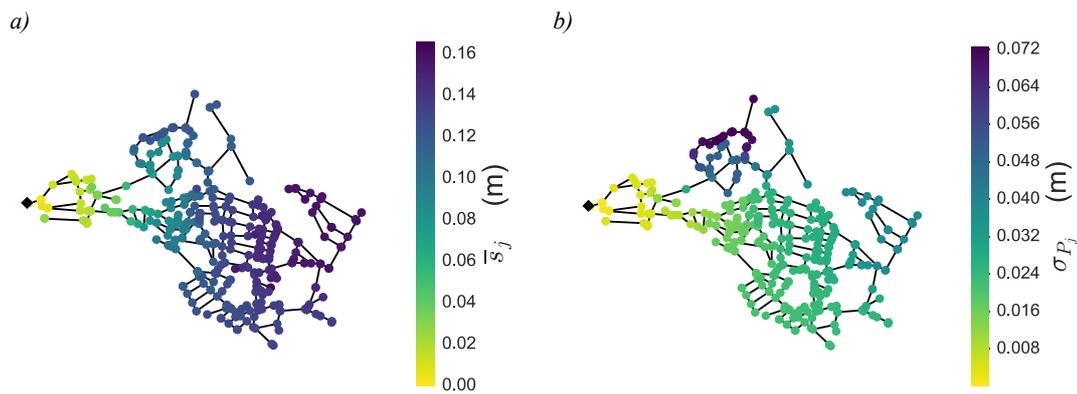


Abbildung 69: Leckage-Sensitivität (links) und Verbraucherunsicherheiten (rechts)

Mit Hilfe des Sensorplatzierungsalgorithmus SPuDU (siehe Kapitel 4.1.2.7, Seite 46) wurden in diesem Netz die idealen Positionen für die Anzahl von 2 bis 10 Sensoren zunächst ohne Einbeziehung von Unsicherheiten ($\omega = 0$) berechnet. Für jede Sensoranzahl N wurde das Optimierungsproblem zehn Mal gelöst. Der Mittelwert des Qualitätsparameters ε über alle Simulationen ist in Abbildung 70 dargestellt. Mit Hilfe von Goodness-of-Fit Statistiken konnte abgeleitet werden, dass die Qualität des Sensorplacements in Abhängigkeit von der Anzahl der Sensoren, was als Kosten-Nutzen-Funktion interpretiert werden kann, einem Potenzgesetz folgt

$$\varepsilon = a \cdot N^b$$

Dies hat praktische Konsequenzen für die Anzahl der Sensoren, die ein Unternehmen in einem Netz zu platzieren plant. Entscheidet sich beispielsweise ein Unternehmen für drei anstatt zwei zusätzliche Sensoren, führt das zu einer Verbesserung der Qualität der optimalen Sensorplatzierung um rund 6 %. Leider führt ein weiterer, zusätzlicher Sensor, d.h. vier statt drei Sensoren, nicht zum selben Erfolg. Ein vierter Sensor verbessert die Qualität nur noch um 3.8 %. Das Unternehmen müsste zwei zusätzliche Sensoren von drei Sensoren ausgehend platzieren, um wieder eine Verbesserung um rund 6 % zu erreichen. Es müsste also insgesamt fünf Sensoren platzieren. Will das Unternehmen erneut eine Verbesserung von 6 %, so müsste die Anzahl der zusätzlichen Sensoren in Anlehnung an Abbildung 70 verdoppelt werden, was für das WVU vier zusätzliche Sensoren zu den bereits installierten fünf Sensoren bedeuten würde.

Dieses Beispiel unterstreicht die Auswirkungen auf die Kosten bzw. den Nutzen unter der Voraussetzung, dass die Funktion einem Potenzgesetz folgt. Eine lineare Verbesserung in der Qualität des Sensorplacements geht mit einer Verdopplung der Sensoren einher. Dieser Umstand stellt eine universale Eigenschaft des Potenzgesetzes dar. Daraus resultiert, dass es seitens des Unternehmens abzuwägen gilt ab, wann der Einbau zusätzlicher Sensoren, und die damit einhergehende Verbesserung der Eingrenzbarkeit von Leckagen, noch ökonomisch vertretbar ist.

ERGEBNISSE

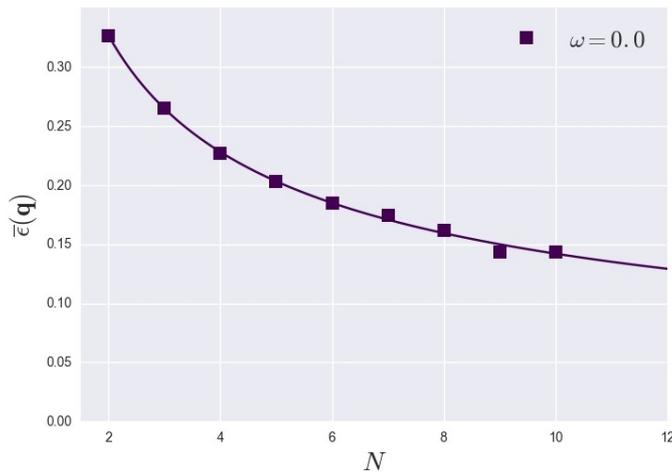


Abbildung 70: Qualitätsfunktion des idealen Sensorplacements in Abhängigkeit der Anzahl der Sensoren

Werden Unsicherheiten im Verbrauch berücksichtigt, verschlechtert sich die Qualität des Sensorplacements in Abhängigkeit der Anzahl der Sensoren (siehe Abbildung 71). Die Form der Kosten-Nutzen-Funktion bleibt jedoch gleich, d.h. sie folgt immer einem Potenzgesetz. Die Berücksichtigung von Unsicherheiten führt dazu, dass eine realistischere Annahme bezüglich der Anzahl der Sensoren getroffen werden kann, die benötigt werden, um Leckagen einzugrenzen. Je mehr Unsicherheiten miteinbezogen werden, desto mehr Sensoren werden für dieselbe gewünschte Ergebnisqualität benötigt.

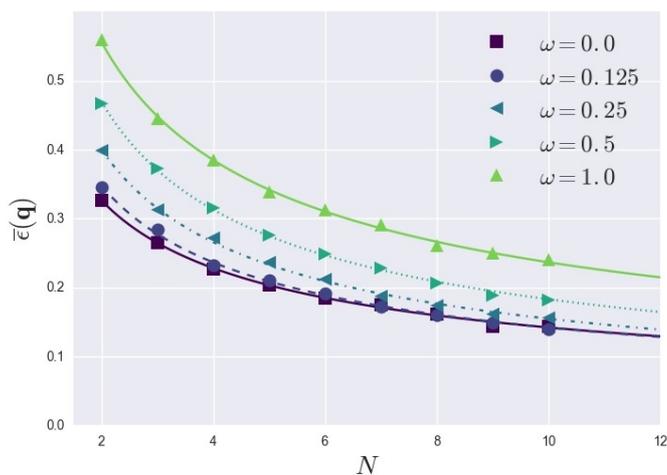


Abbildung 71: Qualitätsfunktion des idealen Sensorplacements als Funktion der Anzahl der Sensoren unter Berücksichtigung der Verbraucherunsicherheiten für verschiedene Gewichtungsfaktoren ω der Einbeziehung der Unsicherheiten

Der Parameter ω , welcher die Stärke der Einbeziehung der Unsicherheiten beschreibt, wurde zunächst mit $\omega = 1.0$ festgelegt, d.h. die Unsicherheiten wurden in dem Maße miteinbezogen, aus dem sie sich aus der Monte-Carlo-Simulation ergeben. Dies führte dazu, dass sich die Sensoren nicht mehr über das ganze Modellnetz verteilten, sondern sich in einem kleinen Teilgebiet im System konzentrierten (siehe Abbildung 74 e). Aufgrund der Tatsache, dass Drucksensoren auf Leckagen in unmittelbarer Nähe empfindlicher reagieren, hat das eine nachteilige Auswirkung auf die Leckageeingrenzung. Deswegen wurde der Parameter ω so lange halbiert, bis sich die Sensoren wieder auf das ganze Netz verteilten ($\omega = 1.0 \rightarrow 0.5 \rightarrow 0.25 \rightarrow 0.125$). In Abbildung 72 bis Abbildung 74 sind die idealen Sensorplatzierungen für verschiedene N und ω Kombinationen dargestellt. Es eindeutig ist zu erkennen, dass bei Einbeziehung von Unsicherheiten Gebiete für die Platzierung von Sensoren gemieden werden, an denen die Unsicherheiten die größten Auswirkungen haben (siehe Abbildung 69 b). Dies zeigt, dass der Algorithmus unter Einbeziehung von Unsicherheiten den

gewünschten Effekt erzielt, nämlich Positionen zu bestrafen, an denen Unsicherheiten den größten Effekt haben.

Zusätzlich ist ersichtlich, dass ein Placement für $N+1$ Sensoren nicht das ideale Placement für N Sensoren beinhaltet, sondern zu grundverschiedenen Positionen bzw. Lösungen führt. Dies hat zur Konsequenz, dass der optimale Sensorplatzierungsalgorithmus für jede Anzahl N von Sensoren gesondert aufgerufen werden muss. Um Rechenzeit zu sparen, kann zum Beispiel das Problem für die Anzahl von 2, 3 und 4 Sensoren mit Hilfe der Kosten-Nutzen-Funktion gelöst werden, was aufgrund der geringen Anzahl der Sensoren noch schnell umsetzbar ist. Anschließend kann abgeschätzt werden, wie viele Sensoren im System platziert werden sollten, um dann gezielt für die sich ergebende Anzahl von Sensoren das Problem zu lösen.

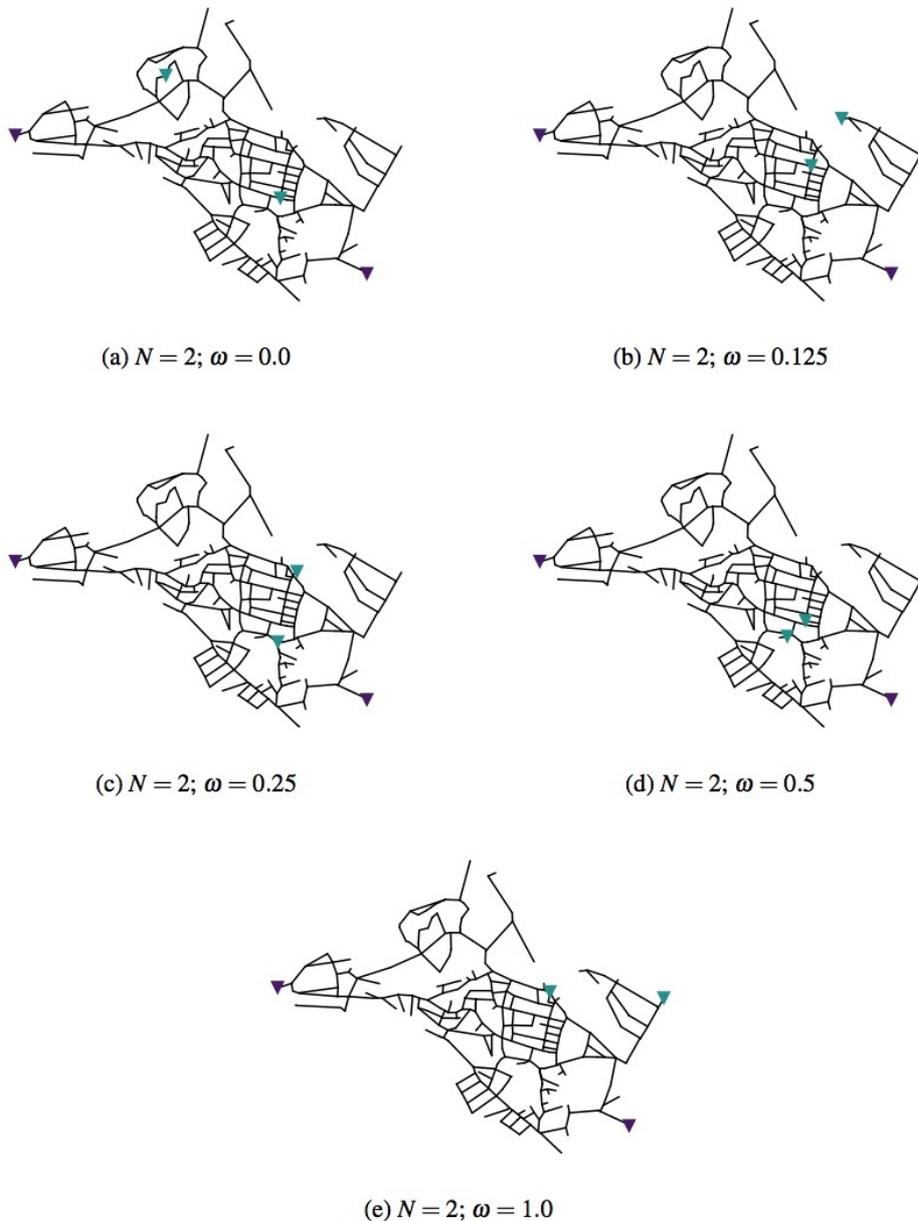
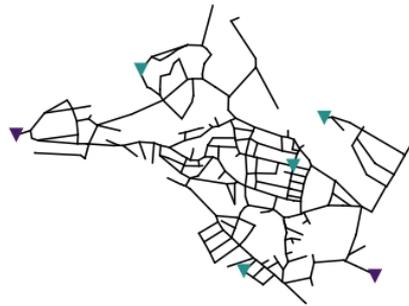
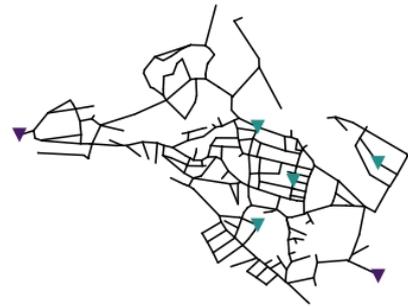


Abbildung 72: Sensorplacement für Linz-Pichling für zwei Sensoren mit verschiedenen Gewichtungsfaktoren



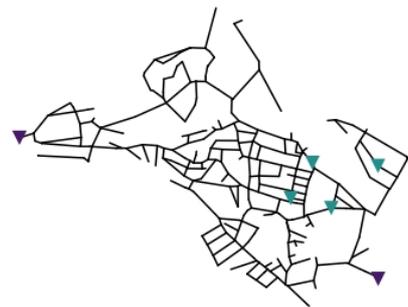
(a) $N = 4$; $\omega = 0.0$



(b) $N = 4$; $\omega = 0.125$



(c) $N = 4$; $\omega = 0.25$



(d) $N = 4$; $\omega = 0.5$



(e) $N = 4$; $\omega = 1.0$

Abbildung 73: Sensorplacement für Linz-Pichling für vier Sensoren mit verschiedenen Gewichtungsfaktoren



Abbildung 74: Sensorplacement für Linz-Pichling für acht Sensoren mit verschiedenen Gewichtungsfaktoren Pilotnetz

5.1.2 LECKAGEEINGRENZUNG – COMPUTERSIMULATION TEILNETZ HART BEI GRAZ

Zum Testen der Funktionsweise der modellbasierten Leckageeingrenzungs-Algorithmen wurden zahlreiche Simulationen anhand verschiedener hydraulischer Modellnetze durchgeführt. In diesem Unterkapitel werden exemplarisch Simulationen vorgestellt, die am Modellnetz Hart bei Graz durchgeführt wurden. Hierzu wurde ein Leckageszenario simuliert, das in einem späteren Stadium des Projektes nicht nur am Computer simuliert, sondern auch in der Realität durchgeführt wurde. Für die Simulationen am Computer wurde angenommen, dass Druck und Durchfluss im Einspeisepunkt gemessen werden. Zusätzlich wurde angenommen, dass an fünf Hydranten Druckmessungen vorhanden sind. Die idealen Sensorpositionen für diese fünf Druckmesspunkte wurden mit dem Algorithmus von Casillas (siehe Kapitel 4.1.2.6, Seite 36) berechnet. Diese Messpositionen stimmen in weitere Folge mit den Positionen der Drucksensoren, welche im Feldversuch Hart bei Graz später tatsächlich installiert wurden, überein.

Das Leckageszenario besteht aus der Simulation einer Leckage von 1 l/s zum Zeitpunkt des Nachtminimums am Hydranten HG3164 im System. Die entsprechenden Werte für den Algorithmus zur Leckagelokalisierung (siehe Kapitel 4.1.1, Seite 35) wurden aus den Druckwerten, welche sich aus der Leckagesimulation an den Sensorpositionen ergeben, und den simulierten Werten am Einspeisepunkt der Messzone abgeleitet und für die weiterführende Berechnung verwendet. Die modellbasierte Leckageeingrenzung wurde mit einem heuristischen Verfahren, dem Differential Evolution Algorithmus, gelöst (siehe Kapitel 4.1.2.3, Seite 40). Durch die stochastische Komponente in heuristischen Verfahren ist es möglich, globale Optima in einer Funktion mit vielen lokalen Optima zu finden. Dadurch können aber einzelne Simulationen zu verschiedenen Resultaten führen. Deshalb wurde der Algorithmus 200 Mal auf das Problem mit denselben Eingabeparametern angewandt. Die Eingabeparameter sind in nachstehender Tabelle 7 zu finden.

TABELLE 7: EINGABEPARAMETER FÜR DIE SIMULATION DER LECKAGEEINGRENZUNG IM MODELLNETZ HART BEI GRAZ FÜR 200 SIMULATIONS DURCHLÄUFE

Eingabeparameter	Wert
Emitterkoeffizient (ce)	0.12
Leckageposition (LP)	HG3164
Emitter Exponent (ee)	0.5
Populationsgröße	30
Generationen	100
Mutationsfaktor (F)	0.5
Crossover Ratio (cr)	0.7

Eine statistische Auswertung der 200 Simulationsdurchläufe ist in Tabelle 8 zu finden.

TABELLE 8: ERGEBNISSE DER MODELLBASIERTE LECKAGEEINGRENZUNG IM MODELLNETZ HART BEI GRAZ NACH 200 SIMULATIONS DURCHLÄUFEN. DIE ANGABEN STELLEN DIE ENTFERNUNG DER VOM ALGORITHMUS GEFUNDENEN LECKAGE ZUR TATSÄCHLICHEN LECKAGEPOSITION IN METERN BERECHNET ÜBER DIE TOPOLOGISCHE DISTANZ DAR.

Bezeichnung	Wert
Mittelwert	124.08
Standardabweichung	247.78
Minimum	0.00
1. Quartil (25%)	3.82
2. Quartil (50 %)	6.98
3. Quartil (75 %)	130.12
Maximum	1447.98

Als Evaluationskriterium wurde die topologische Distanz von der tatsächlichen Leckage zur vom Algorithmus gefundenen Leckageposition verwendet. Diese Distanz wird mit dem graphentheoretischen Shortest Path Algorithmus berechnet und stellt die kürzeste Entfernung zwischen der gefundenen und der tatsächlichen Leckage entlang der Leitung dar. Die einzelnen Ergebnisse sind zusätzlich noch in Abbildung 75 grafisch dargestellt. Die topologische Distanz schwankt in einem weiten Bereich. Das Minimum beträgt 0.0 Meter, d.h. der Algorithmus hat die Leckage am Hydranten exakt lokalisiert. Das Maximum beträgt rund 1.5 Kilometer und ist daher zu weit entfernt, um mit herkömmlichen Methoden eine Punktortung der Leckage durchzuführen. Ein solches Ergebnis ist also ohne jeglichen Nutzen für ein Trinkwasserversorgungsunternehmen. Bei näherer Betrachtung der Ergebnisse, wird ersichtlich, dass der Algorithmus Leckagen in einer mittleren Entfernung von rund 125 Metern findet. Die Standardabweichung der Ergebnisse ist zwar mit rund 250 Metern beträchtlich, die Quartile zeichnen jedoch ein optimistischeres

Bild. So wurde in 50 Prozent der Fälle die Leckage innerhalb von sieben Metern neben der tatsächlichen Leckage gefunden. Die relativ große Standardabweichung resultiert aus großen Entfernungen im vierten Quartil der gefundenen Leckagen. Dies zeigt, dass der Algorithmus mit perfekten Eingabewerten, da Simulation mit Simulation verglichen wird, sehr gut funktioniert. Es ist davon auszugehen, dass eine Anwendung des Algorithmus mit realen Messwerten aus dem Feldversuch aufgrund von Unsicherheiten zwischen Modell und Realität (Rohrrauigkeiten, Verbraucher, etc.) in einem weniger optimalen Ergebnis resultiert.

Abbildung 75 zeigt die visuelle Aufbereitung der Ergebnisse im Modellnetz. Darin sind die Messpunkte am Einspeisepunkt (gekennzeichnet durch einen blauen Kreis) und die fünf Druckmessgeräte (dargestellt als grüne Vierecke) an den Hydranten ersichtlich. Die Leckage ist mit einem blauen Kreuz markiert. Die Ergebnisse der einzelnen Simulationsdurchläufe sind durch hellgrüne, durchsichtige Kreise dargestellt. Dort, wo der Algorithmus die Leckage vermehrt errechnet hat, werden die Kreise aufgrund der Überlagerung undurchsichtiger und dadurch stärker erkennbar. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die meisten grünen Kreise in unmittelbarer Nähe der echten Leckage befinden und nur in vereinzelten Fällen weiter entfernte Leckagen berechnet wurden. Eine solche Darstellung kann einem Wasserversorgungsunternehmen helfen, die Leckage rasch zu finden. Aufgrund solcher visuellen Ergebnisdarstellungen kann ein Leckortungsteam zeitnah an die entsprechenden Stellen im System geschickt werden, um die Punktortung der Leckage durchzuführen. Somit muss das Leckortungsteam nicht mehr das ganze System abschreiten, sondern muss lediglich die wenigen hundert Meter des Netzes untersuchen, an denen der Algorithmus die Leckage gefunden hat.

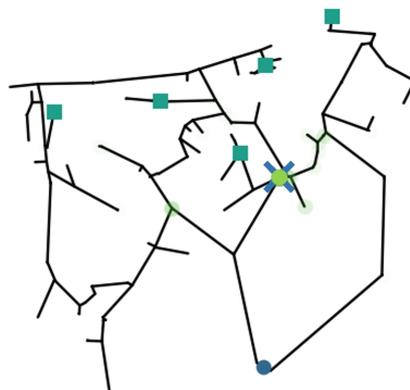


Abbildung 75: Ergebnisse der simulierten Leckageeingrenzung im Modellnetz Hart Bei Graz.

5.1.3 EINFLUSSES DER SENSORANZAHL AUF DAS OPTIMIERUNGSPROBLEM DER MODELLBASIERTE LECKAGEEINGRENZUNG

In diesem Unterkapitel wird der Einfluss der Sensoren auf das Optimierungsproblem behandelt. Hierzu werden Fitness-Landkarten erstellt, um das Problem zu veranschaulichen. Diese Landkarten sind eine Abbildung, in der für jede Kombination der Parameter im Parameterraum die Funktionswerte im Lösungs- oder Fitnessraum berechnet werden.

Der Parameterraum für das Leckageeingrenzungsproblem besteht aus der Größe der Leckage, abgebildet durch den Emitterkoeffizienten c_e , und der Position der Leckage im System L_P . Anschließend wird die Fitnessfunktion für jedes mögliche Größen- und Positions-Paar berechnet und das Ergebnis grafisch

dargestellt, um daraus Schlüsse auf das Problem zu ziehen. So ist aus dieser Darstellung zum Beispiel ersichtlich, welcher Algorithmus für die Lösung des Problems am besten geeignet ist. Besitzt das Problem ein ausgeprägtes Optimum und ist die Funktion positiv definit, so können gradientenbasierte Verfahren verwendet werden, die schnell zur optimalen Lösung konvergieren. Besitzt das Problem jedoch mehrere lokale Optima, dann scheitern diese Verfahren, da sie in lokalen Optima verbleiben. Zur Vermeidung dieses Problems sind heuristische Verfahren (z.B. Genetische Algorithmen, Partikelschwarmoptimierung, Simulated Annealing, etc.) geeignet, da sie die Fähigkeit besitzen, die beste Lösung im gesamten Lösungsraum zu finden (globale statt lokaler Optima). Allerdings geht durch die stochastische Komponente in diesen Verfahren die Garantie verloren, dass bei einmaliger Durchführung der Optimierung die beste Lösung gefunden wird. Deswegen müssen diese Algorithmen öfter auf das Problem angewendet werden. Die Form der abstrakten Fitness-Landkarte hat einen wesentlichen Einfluss auf das Konvergenzverhalten von Optimierungsalgorithmen. Besitzt die Fitnessfunktion sehr viele lokal getrennte Optima, so wird die Suche nach dem globalen Optimum erschwert. Algorithmen brauchen dann länger, um die optimale Lösung zu finden.

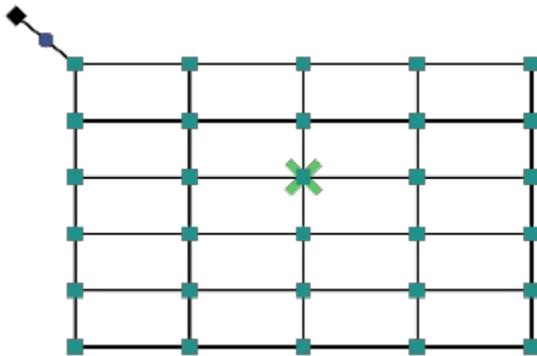


Abbildung 76: Netz von Poulakis mit Durchflusssensor am Einspeisepunkt (blauer Kreis) und Drucksensoren an jedem Knoten (grüne Quadrate). Die Leckage der Größe 1.5 l/s (hellgrünes Kreuz) befindet sich an Knoten J-16

Als Beispielnetz dient das Netz von Poulakis (Poulakis et al., 2003) (siehe Abbildung 76). Der Durchfluss im Einspeisepunkt wird gemessen (blauer Kreis). Zusätzlich wurde an jedem möglichen Punkt im System ein Drucksensor installiert (grüne Quadrate). Eine Leckage mit einem Leckageausfluß von 1.5 l/s wurde in der Mitte des Systems am Knoten J-16 simuliert (hellgrünes Kreuz). Dies entspricht einem Emitterkoeffizienten von $c_e = 0.25$.

Die Fitnesslandkarte ist in Abbildung 77 dargestellt. Hierzu wurde der Emitterkoeffizient zwischen $c_e = 0.0$ und $c_e = 0.5$ für jeden Knoten variiert und die Fitnessfunktion F als Wurzel der quadratischen Abweichung für die gemessenen und simulierten Messwerte für jedes Wertepaar von Leckagegröße und -ort berechnet.

$$d(\mathbf{m}, \hat{\mathbf{m}}(x)) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (m_i - \hat{m}_i(x))^2}$$

Dies entspricht dem Abstand zweier Vektoren in euklidischer Norm. Zusätzlich sind in Abbildung 77 die Minima, die Mittelwerte, die Maxima und die Werte an der exakten Leckageposition über alle c_e Werte dargestellt (Abbildung 77 oben). Das gleiche wurde für alle L_p Werte durchgeführt (Abbildung 77 rechts).

ERGEBNISSE

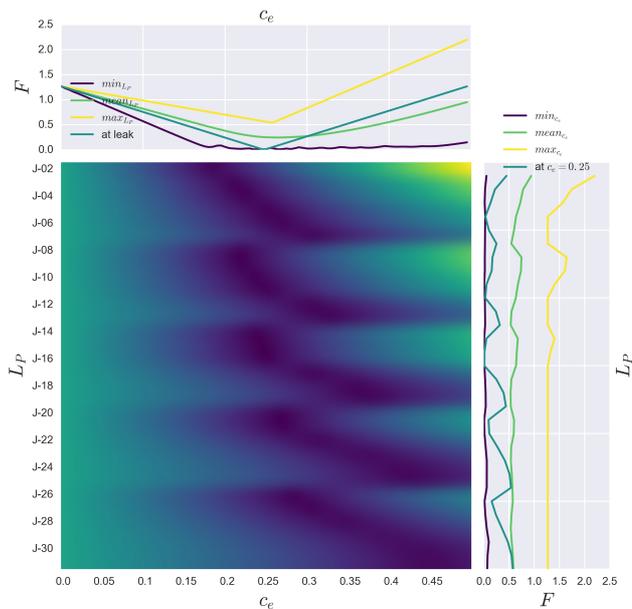


Abbildung 77: Darstellung der Fitnesslandkarte des Leckageszenarios aus Abbildung 77 im Leckagegröße/Leckageort Raum

Es ist schwer, in Abbildung 77 das Minimum der Funktion zu erkennen, da die Fitnessfunktion in einigen Bereichen sehr flach ist. Daher wurde in Abbildung 78 der Logarithmus mit Basis 10 zur Darstellung der Fitnessfunktion verwendet. Blaue Farben stehen für kleine Fitnesswerte, gelbe für sehr große Fitnesswerte. Das globale Minimum an der Leckageposition J-16 mit einem c_e Wert von $c_e = 0.25$ ist deutlich zu erkennen. Neben diesem globalen Minimum befinden sich noch mehrere lokale Minima in der Fitnesslandschaft, z.B. bei J-10 und $c_e = 0.24$, oder J-22 und $c_e = 0.26$. Das bedeutet, dass gradientenbasierte Verfahren für die modellgestützte Leckageeingrenzung ausgeschlossen werden können. Aufgrund der vielen lokalen Minima in der Fitnesslandschaft kommen nur heuristische Verfahren in Frage. Diese Schlussfolgerung besitzt große Aussagekraft, speziell im Hinblick auf die Anzahl der Drucksensoren und dem Informationsgehalt über das System in der Fitnesslandschaft.

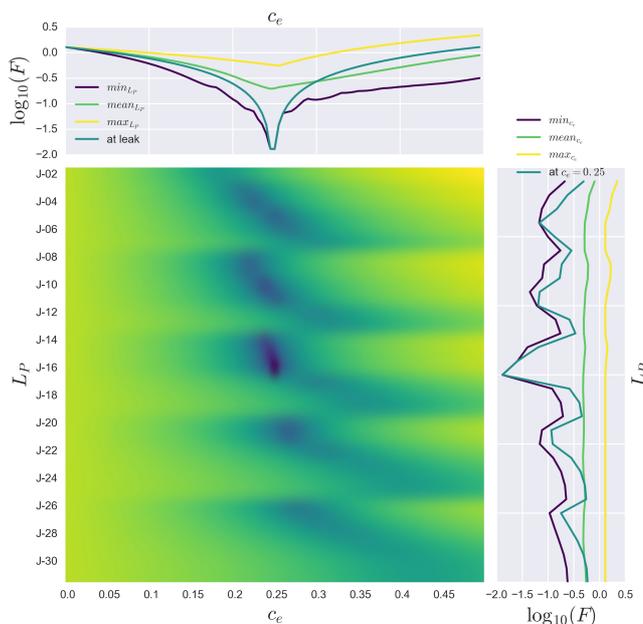


Abbildung 78: Logarithmus mit Basis 10 um die Minima der Fitnessfunktion besser darzustellen zu können

Eine Reduktion der Sensoren (siehe Abbildung 80) führt zu zusätzlichen lokalen Minima. In Abbildung 81 ist die Fitness-Landkarte gleich wie jene in Abbildung 78, die durch volle Drucksensorenzahl erhalten wurde, für drei Drucksensoren dargestellt. Ein Drucksensor befindet sich am Einspeisepunkt, zwei zusätzliche Sensoren wurden mit dem Algorithmus von Casillas an den sich daraus ergebenden idealen Positionen simuliert.

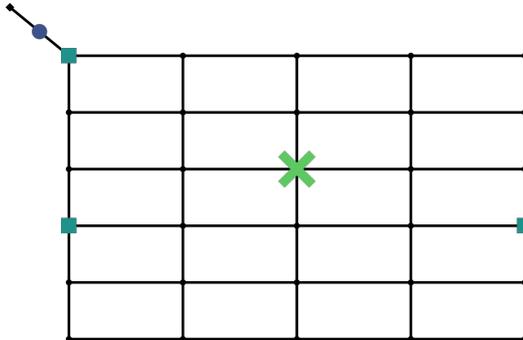


Abbildung 79: Reduzierung der Sensoren aus Abbildung 77 auf Messungen am Einspeisepunkt plus zwei zusätzliche Druckmesspunkten, die mit dem Algorithmus von Casillas gefunden wurden

In Abbildung 80 ist zu sehen, dass die Anzahl der lokalen Optima stark steigt. Zusätzlich ist zu erkennen, dass sich das globale Optimum aufgrund des Informationsverlustes im System durch die geringere Sensoranzahl an eine andere Stelle verschiebt. Es befindet sich nun an Knoten J-15, zwar noch in der unmittelbaren Nachbarschaft der wirklichen Leckage, aber doch an der falschen Stelle. Dies ist auch der Grund, warum mit modellbasierten Leckageeingrenzungsverfahren im Allgemeinen nur die Leckage eingegrenzt, und nicht exakt lokalisiert werden kann.

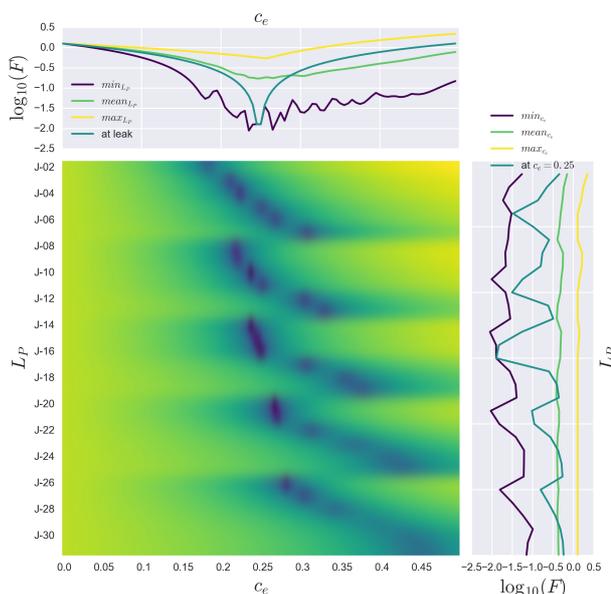


Abbildung 80: Logarithmus mit Basis 10 der Fitnessfunktion, die sich für das Problem aus Abbildung 80 ergibt

Ziel der nächsten zwei Unterkapitel ist es zu untersuchen, ob die Form des Optimierungsproblems und somit der Fitness-Landkarte vor der Optimierung insoweit beeinflusst werden kann, dass die Optimumssuche für den Leckageeingrenzungs-Algorithmus erleichtert wird. Vereinfacht wird die Optimumssuche, wenn die Zahl der lokalen Minima gesenkt oder die lokalen Minima von dem globalen Minimum dominiert wird.

Die Form des Optimierungsproblems hat einen direkten Einfluss auf die Konvergenzgeschwindigkeit des Leckageeingrenzungs-Algorithmus und auf die Qualität der erhaltenen Ergebnisse. Dadurch haben Methoden, die die Form der Fitnesslandschaft beeinflussen, enormes Potential, um Rechenzeit zu sparen.

5.1.4 EINFLUSS DER METRIK AUF DIE FITNESSFUNKTION UND KONVERGENZ DES LECKAGEEINGRENZUNGS-ALGORITHMUS

In diesem Unterkapitel wird untersucht, welchen Einfluss die Art der Formulierung der Fitnessfunktion auf die Konvergenz des Leckageeingrenzungsalgorithmus hat. Wie im Kapitel 4.1.1, Seite 35 schon erwähnt wurde, kann die Distanz d zwischen zwei Vektoren, dem Messvektor und dem dazu korrespondierenden Simulationsvektor, auf verschiedenste Arten bzw. mit Hilfe verschiedener Metriken formuliert werden. Bis jetzt wurde der Unterschied zwischen den Vektoren als euklidischer Abstand definiert. Die Distanz zwischen den Vektoren kann auch in anderen Metriken berechnet werden. In der Korrelationsmetrik wird der Abstand zwischen zwei Vektoren über die Pearson-Korrelation berechnet.

$$d(\mathbf{m}, \hat{\mathbf{m}}(x)) = 1 - \frac{Cov(\mathbf{m}, \hat{\mathbf{m}}(x))}{\sqrt{Var(\mathbf{m})} \cdot \sqrt{Var(\hat{\mathbf{m}}(x))}}$$

Dabei steht $Cov(x,y)$ für die Kovarianz zwischen zwei Vektoren und $Var(x)$ für die Varianz eines Vektors. Das Ergebnis für das in Abbildung 79/Abbildung 80 beschriebene Problem berechnet mit Hilfe der Korrelationsmetrik ist in Abbildung 81 dargestellt. Dies liefert ein gänzlich anderes Bild als die euklidische Metrik in Abbildung 80. Anstatt der vielen lokalen Minima führt die Korrelationsmetrik nur mehr zu vier lokalen Minima an den Knoten J-07, J-12, J-15 und J-16. Die Fitnessfunktion ist also in der Korrelationsmetrik gutartiger als in der euklidischen Metrik. Daher sollte es für Optimierungsalgorithmen leichter sein, das globale Optimum in dieser Metrik zu finden.

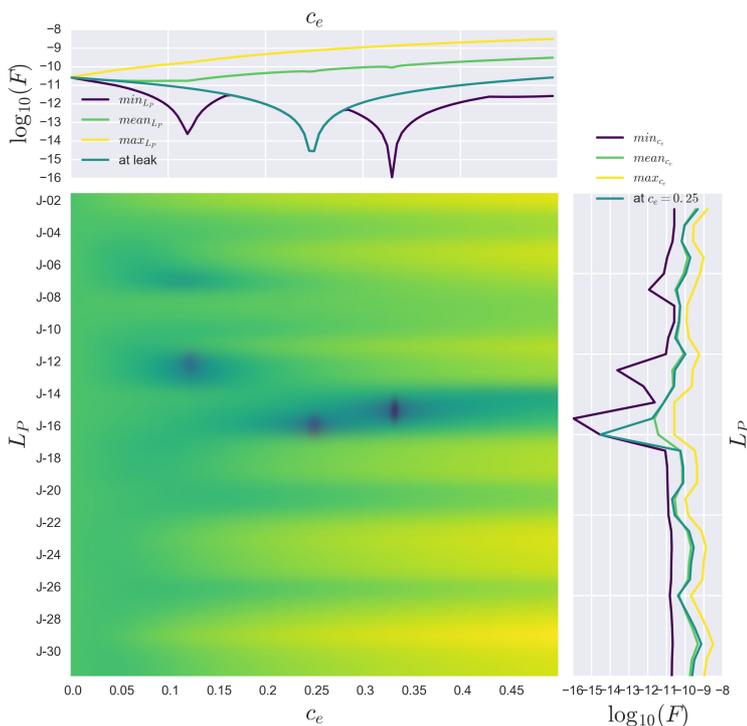


Abbildung 81: Fitness-Landkarte für das Problem in Abbildung 80 berechnet mittels Korrelationsmetrik

Eine weitere Möglichkeit den Unterschied zwischen den zwei Vektoren zu berechnen, stellt die Kosinus-Metrik dar.

$$d(\mathbf{m}, \hat{\mathbf{m}}(x)) = 1 - \frac{\mathbf{m} \cdot \hat{\mathbf{m}}(x)}{(\sum_{i=1}^N m_i^2) \cdot (\sum_{i=1}^N \hat{m}(x)_i^2)}$$

Diese kann als der Winkel zwischen zwei Vektoren interpretiert werden. Wenn der Winkel 0° beträgt, zeigen die Vektoren in die gleiche Richtung und der Abstand ist am geringsten. Zeigen sie in die entgegengesetzte Richtung, ist der Abstand am größten. Für das in beschriebene Problem liefert die Kosinus-Metrik das Ergebnis in Abbildung 80. In der Kosinus-Metrik hat die Fitnesslandschaft ein ausgeprägtes globales Minimum, das von Optimierungsalgorithmen leicht gefunden werden sollte.

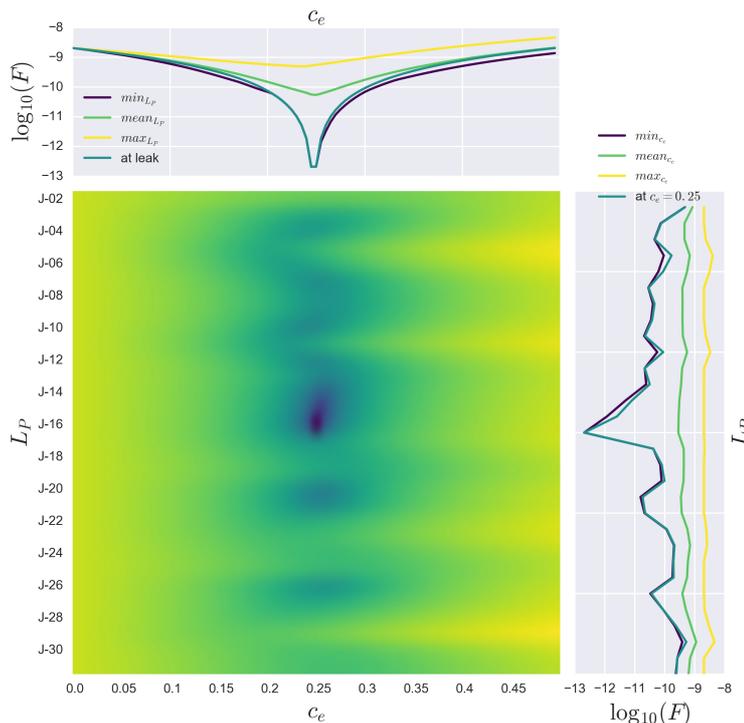


Abbildung 82: Fitness-Landkarte für das Problem in Abbildung 80 berechnet mittels Kosinusmetrik

Die Problemstellung wurde auch noch für weitere andere Metriken berechnet. Die verschiedenen Metriken und die Ergebnisse sind in (Steffelbauer & Fuchs-Hanusch, 2016b) im Detail ersichtlich.

Eine Betrachtung der Konvergenzgeschwindigkeit des Differential Evolution Algorithmus auf diese Problemstellung ist in Abbildung 81 dargestellt. Hierzu wurden für jede der sieben betrachteten Metriken 500 Simulationsdurchläufe mit zufälligen verteilten Leckageszenarien Modellnetz durchgeführt. Der Emitterkoeffizienten $c_e = 0.25$ wurde immer gleich angesetzt. Die Populationsgröße betrug 20 Individuen und die Simulationen wurden über 100 Generationen durchgeführt. Dies resultiert in 2.000 Fitnessfunktionsaufrufen für jeden Optimierungslauf und für jede Metrik. In Abbildung 83 ist die mittlere topologische Distanz zur echten Leckage in Abhängigkeit der Funktionsaufrufe dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Kosinus-Metrik am schnellsten in Richtung der echten Leckage konvergiert und zusätzlich das Endergebnis im Mittel auch näher an der echten Leckage liegt, als in allen anderen Metriken. Die Klasse der Minkowski-Metriken, zu denen auch die euklidische Metrik gehört, konvergieren im Allgemeinen am schlechtesten und liefern auch im Endergebnis schlechtere Resultate. Dieses Beispiel zeigt, dass die Wahl der Metrik der Fitnessfunktion einen wesentlichen Einfluss auf den Leckageeingrenzungsalgorithmus hat. Die richtige Metrik kann die Lecksuche wesentlich beschleunigen und liefert auch qualitativ bessere Ergebnisse.

ERGEBNISSE

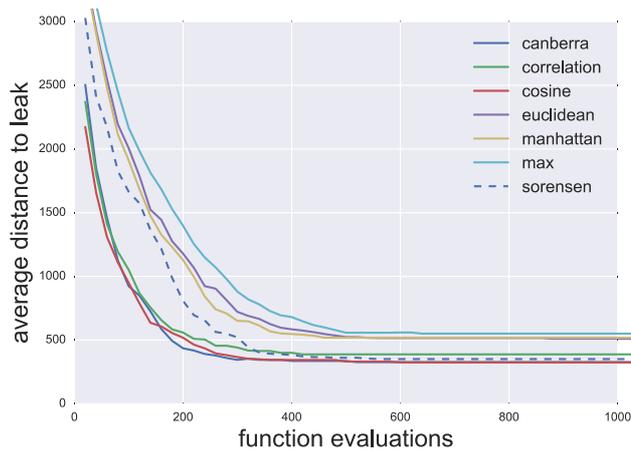


Abbildung 83: Konvergenzverhalten des modellgestützten Leckageeingrenzungsalgorithmus in Abhängigkeit verschiedener Metriken der Fitnessfunktion

5.1.5 EINFLUSS VON UMORDNUNGEN DES PARAMETERRAUMES

Nicht nur die verwendete Metrik, sondern auch die Art, wie die Parameter im Parameterraum angeordnet werden, hat Einfluss auf die Leckageeingrenzung. Der Parameterraum besteht aus zwei Achsen. Die eine Achse stellt die Leckagegröße dar und wird über den Emitterkoeffizienten c_e abgebildet. Dieser Parameter ist kontinuierlich und besitzt eine natürliche Ordnung entsprechend der Größe. Der zweite Parameter L_P , der den Ort der Leckage repräsentiert, besitzt diskrete Werte (die Knoten bzw. Leitungen, an denen sich eine Leckage befinden kann) und kann auf verschiedene Arten angeordnet werden. Eine Umsortierung dieser Achse kann bewirken, dass mehrere lokale Minima zu einem größeren lokalen Minimum verschmelzen und so die Anzahl der Minima reduziert werden kann. Abbildung 84 zeigt eine schematische Darstellung. Dies vereinfacht dem Algorithmus die Leckageeingrenzung und führt sowohl zu einer Steigerung der Konvergenzgeschwindigkeit, als auch zu einer Verbesserung der Qualität des Endergebnisses, ähnlich dem vorigen Beispiel.

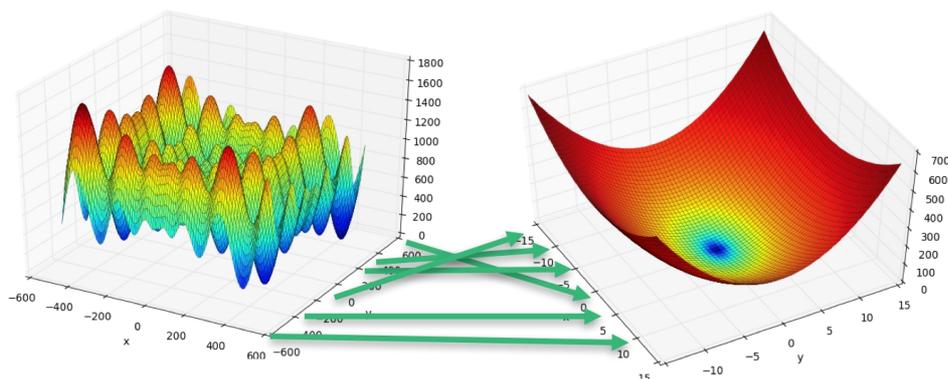


Abbildung 84: Schematische Darstellung des Einflusses der Umsortierung des Parameterraumes auf die Fitnessfunktion

Dies resultiert in der Frage, ob eine ideale Sortierung der L_P -Achse vor der Leckageeingrenzung für ein Netz gefunden werden kann. Dies ist mathematisch nicht möglich, es können zumindest aber bessere, idealere Sortierungen gefunden werden. In diesem Kapitel werden verschiedene Sortierungen empirisch für das Modellnetz Hart bei Graz getestet und ihr Einfluss auf die Konvergenz des Leckageeingrenzungsalgorithmus untersucht.

Als Problemstellung für die Leckageeingrenzungen wurde wiederum das Problem verwendet, welches in Unterkapitel 5.1.1 (Seite 103) vorgestellt wurde. Dabei handelt es sich um das Modellnetz Hart bei Graz, in dem zusätzlich zu Druck und Durchfluss am Einspeisepunkt fünf Druckmesspunkte im System bekannt sind. Als Leckageszenario wurde eine Leckage von 1 l/s am Hydranten HG3164 simuliert. Der Unterschied zwischen Messvektor und Simulationsvektor wurde in allen Experimenten mit Hilfe der Kosinus-Metrik berechnet, da sie, wie in Kapitel 5.1.4 (Seite 115) erwähnt, die besten Ergebnisse lieferte.

Abbildung 85 bis Abbildung 88 zeigen Darstellungen der Sortierungen, die für alle Abbildungen demselben Aufbau folgen. Auf der linken Seite der Abbildungen ist die Fitnesslandschaft in der Kosinus-Metrik für das jeweilige Leckageszenario dargestellt, wobei die jeweilige L_P -Achse in der entsprechenden Sortierung vorliegt. Dadurch ist ersichtlich, wie unregelmäßig und hügelig die Fitnesslandschaft ist bzw. wie viele lokale Optima in der Landschaft existieren. Zusätzlich wurde die Position der Leckage in der Fitnesslandschaft mit einem roten Kreis eingezeichnet. Die rechte Seite zeigt einen Netzplan des Modellnetzes Hart bei Graz, wobei die jeweilige Sortierung farblich dargestellt wurde. Knoten im Netz, die in der jeweiligen Sortierung der L_P -Achse nahe beieinanderliegen, haben auch ähnliche Farben. Durch diese Darstellung wird ersichtlich, ob die jeweilige Sortierung auch dazu führt, dass weite Teile des Netzes, die topographisch eng beieinanderliegen, sich auch auf der L_P -Achse ähnlich verhalten.

Die erste Sortierung, die untersucht wurde, ist eine alphabetische Sortierung der Knotennamen der L_P -Achse (siehe Abbildung 85). Diese Sortierung ist diejenige, die in OOPNET standardmäßig verwendet wird. Es ist ersichtlich, dass die Hydranten, deren Namen im EPANET Input File mit HG beginnen, sich auch auf der L_P -Achse nebeneinander befinden. Topographisch ist das logischerweise nicht der Fall. Auf der linken Seite von Abbildung 85 zeigt sich, dass bis auf die Hydranten, welche die dunkelste Farbe in der Abbildung besitzen, weite Teile des Systems auf der L_P -Achse nahe beieinanderliegen, da sie dieselben Farben besitzen.

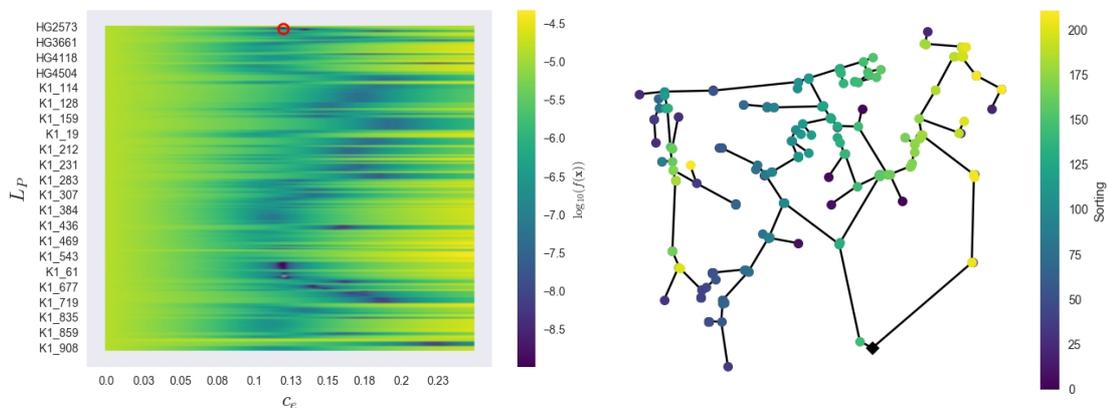


Abbildung 85: Alphabetische Sortierung

Die zweite Sortierung wurde mit Hilfe eines graphentheoretischen Algorithmus, dem Depth-First-Search (DFS) Algorithmus, gefunden. Dieser Algorithmus nummeriert Knoten in einer Reihenfolge, in der von einem Knoten ausgehend, alle Knoten in einem Ast der Reihe nach nummeriert werden. Kommt der Algorithmus an das Ende eines Astes an, geht er bis zum letzten Verzweigungspunkt zurück und setzt die Nummerierung an diesem Ast fort. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis alle Knoten mit einer Nummer versehen sind. Diese Art der Nummerierung liefert einen perfekten topologischen Zusammenhang in gerichteten, azyklischen Graphen. Da Trinkwasserversorgungsnetze aber aufgrund der Versorgungssicherheit mit Ringen versehen sind bzw. eine entsprechend vermaschte Struktur aufweisen, handelt es sich um ein Sortierungsproblem auf einem zyklischen Graphen und die Sortierung gestaltet sich als nicht mehr ideal. Dennoch liefert der Algorithmus weite, zusammenhängende Gebiete und glättet auch die Fitnesslandschaft, wie in Abbildung 86 deutlich erkennbar ist.

ERGEBNISSE

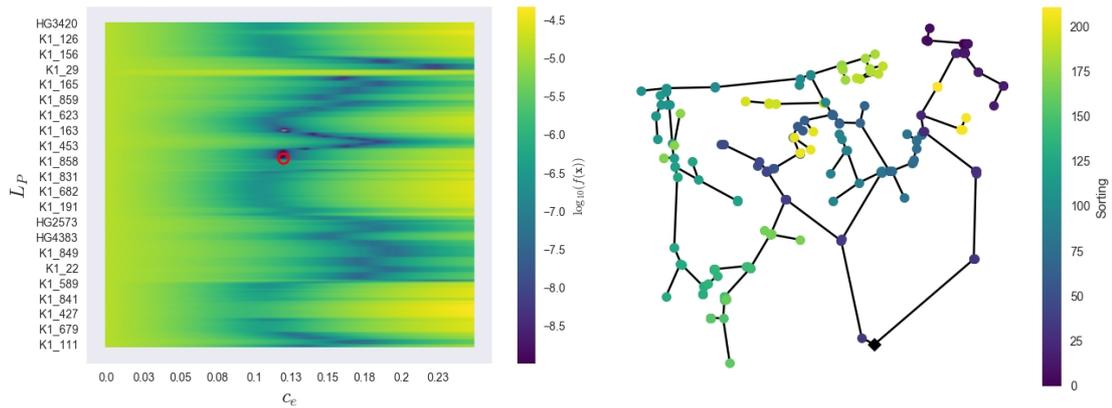


Abbildung 86: Depth-First-Search Sortierung

Eine weitere Methode, die L_P -Achse zu sortieren, liefert der Cuthill-McKee-Algorithmus (Cuthill & McKee, 1969). Dieser Algorithmus reduziert die Bandweite der Inzidenzmatrix. Die Inzidenzmatrix ist eine Abbildung, die zeigt, welche Knoten durch welche Leitung im System verbunden sind. Eine Reduzierung der Bandweite sorgt somit dafür, dass Knoten, welche auch topologisch nahe beieinanderliegen, dies auch in der L_P -Achse tun. Die Cuthill-McKee Sortierung ist in Abbildung 87 dargestellt. Die Fitnessfunktion wirkt wellig (links), dennoch scheinen nahe topografisch beieinanderliegende Knoten auch auf der L_P -Achse nahe beieinanderzuliegen (rechts).

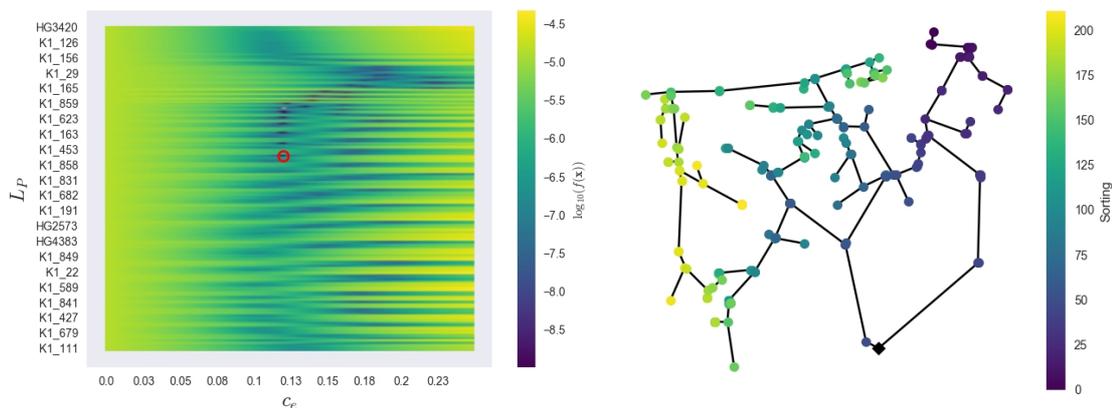


Abbildung 87: Cuthill-McKee Sortierung

Als Vergleich, ob die Sortierung einen Einfluss auf die Konvergenz des Leckageeingrenzungsalgorithmus hat, wurde zudem eine zufällige Sortierung untersucht, in welcher die Knoten einfach nach dem Zufallsprinzip sortiert wurden (siehe Abbildung 88). Hier ist die Fitnesslandschaft von lokalen Minima übersät (links) und es ist kein topografischer Zusammenhang auf der L_P -Achse ersichtlich (rechts).

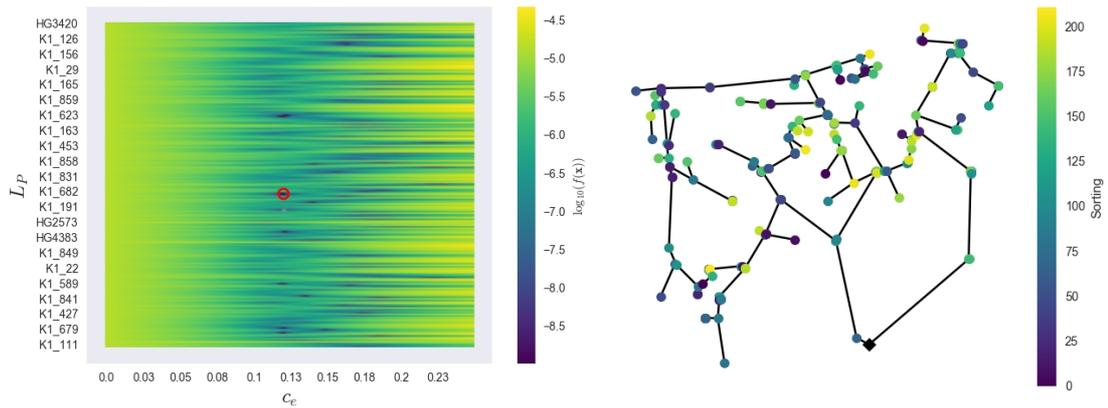


Abbildung 88: Zufällige Sortierung

Um die Konvergenz des Algorithmus zu testen, wurden eine Populationsgröße von 30 Individuen und eine Generationenanzahl von 100 Generationen gewählt. Der Leckageeingrenzungsalgorithmus wurde 100 Mal für jede Sortierung durchgeführt und die Ergebnisse wurden wieder wie zuvor in Unterkapitel 5.1.4 (Seite 115) ausgewertet (siehe Abbildung 89). Es zeigt sich, dass die alphabetische Sortierung am langsamsten konvergiert. Cuthill-McKee und DFS zeigen in etwa dieselbe Performance, wobei Cuthill-McKee am Ende die besten Ergebnisse liefert. Beides ist dadurch zu erklären, dass der Algorithmus anfangs noch einen großen Teil der Fitnesslandschaft absucht und dann sich immer mehr auf einen kleinen Teil im Parameterraum konzentriert. Wenn dieser kleine Teil auch topologisch eng beieinanderliegt, liefern ähnliche Leckagegrößen und -positionen ähnliche Fitnesswerte, da sie dieselben Auswirkungen auf die Messstellen im System haben. Dadurch springt die Leckagesuche nicht mehr topologisch im gesamten System, sondern konzentriert sich auf ein kleines, zusammenhängendes Gebiet, das den meisten Erfolg verspricht. Erstaunlich ist, dass die zufällige Sortierung anfangs noch eine etwa ähnliche Performance zeigt. Aufgrund der zufälligen Sortierung der L_P -Achse bleibt der Algorithmus aber früher oder später in einem lokalen Minimum stecken und liefert nach 100 Generationen die schlechtesten Ergebnisse.

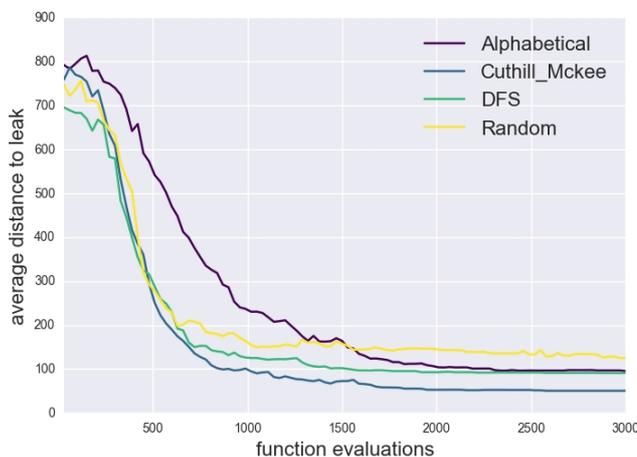


Abbildung 89: Konvergenzverhalten des Leckageeingrenzungsalgorithmus für verschiedene Sortierungen.

5.2 UMSETZUNG DER ENTWICKELTEN METHODEN IM LABORMODELL

Nachfolgend werden die Ergebnisse aus den Leckageeingrenzungsberechnungen im Labormodell für verschiedene Versuchsanordnungen dargelegt. Wie bereits erwähnt, erfolgte das Testen der Algorithmen parallel zu bereits laufenden Feldversuchen. Die Ergebnisse für die Anwendung der Methode auf die Gegebenheiten im Labormodell zeigten ein zufriedenstellendes Ergebnis. Die Leckageeingrenzung im voll ausgebauten Labormodell ergab eine Trefferquote von mehr als 90 % in unmittelbarer Nähe der auftretenden Leckage.

Bereits zu einem recht frühen Projektstadium konnten erste Tests zu Leckageeingrenzungsalgorithmen durchgeführt werden. Zum damaligen Zeitpunkt waren lediglich drei Drucksensoren und zwei Durchflussmessgeräte im Labormodell installiert. Verbraucher wie in Kapitel 4.2.4 (Seite 75) waren zu diesem Zeitpunkt noch nicht vorhanden.

Leckagen wurden durch manuelles Öffnen von Ventilen simuliert. Die Konfiguration des Labormodells zum Zeitpunkt der ersten Leckageeingrenzung im Labormodell ist in Abbildung 90 dargestellt.

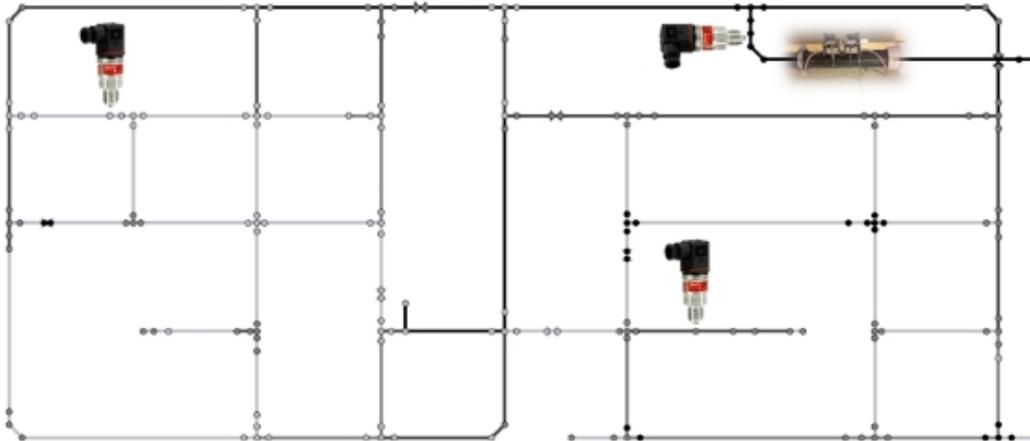


Abbildung 90: Erste Konfiguration Leckageeingrenzung im Labormodell

Die Ergebnisse zur Leckageeingrenzung im Labormodell wurden unter folgenden Bedingungen generiert.

- kein vorangegangenes Sensorplacement
- „trial and error“ kalibriertes hydraulisches Modell
- nur begrenzte Möglichkeit Verbraucher zu simulieren
- 2 Leckagepositionen
- 3 Drucktransmitter
- 1 Durchflussmessung am Einspeisepunkt
- Keine Berücksichtigung von (Verbraucher- und Mess-) Unsicherheiten

Die Leckageeingrenzung wurde mit einer Leckageausflussmenge von 0.09 l/s durchgeführt. Diese Menge entspricht im hydraulischen Modell einem Emitterkoeffizienten am Leckageknoten von $C_e = 0.017$. Des Weiteren wurde angenommen, dass die Berechnung im Nachtminimum stattfindet und ein Gesamtverbrauch im Netz von ca. 0.51 l/s vorliegt.

Die Eingrenzung wurde für das Auftreten einer einzelnen Leckage durchgeführt.

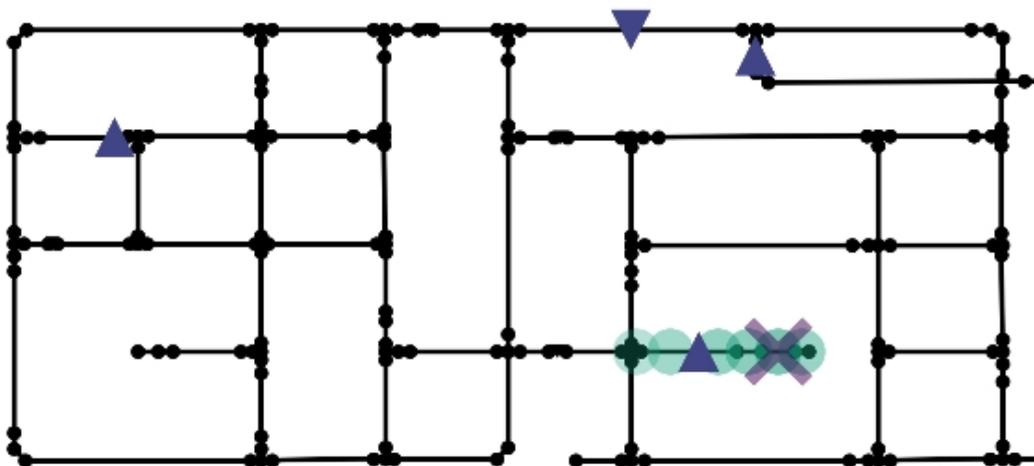


Abbildung 91: Ergebnis Leckageeingrenzung EWDS-TUG

In Abbildung 91 ist das Ergebnis der ersten Leckageeingrenzung im Labormodell ersichtlich. Blaue Dreiecke mit der Spitze nach oben symbolisieren die installierten Druckmessgeräte, das blaue Dreieck mit der Spitze nach unten symbolisiert die Durchflussmessung. Das in hellviolett gehaltene Kreuz zeigt die Position der Leckage. Es wurden 100 Leckageeingrenzungsberechnungen durchgeführt. Wie viele davon direkt auf der leckgeschlagenen Leitung zu liegen (Bezeichnung *h*) kommen, wird im Balkendiagramm in Abbildung 92 illustriert. Ist der nächstgelegene Leitungsabschnitt als potenzielle Leckageposition ermittelt worden, so wird dies durch *n* (neighbour) gekennzeichnet. Identifiziert der Leckageeingrenzungsalgorithmus die Nachbarleitung der nächstgelegenen Leitung ist dies mit *nn* (next neighbour) bezeichnet. Die Nachbarleitung der Nachbarleitung der Leckage wird mit *nnn* (next nearest neighbour) bezeichnet. Alle Treffer, welche nicht diesem Kriterium der nächsten oder übernächsten Leitung entsprechen, werden mit *e* (else) bezeichnet (Günther et al., 2014).

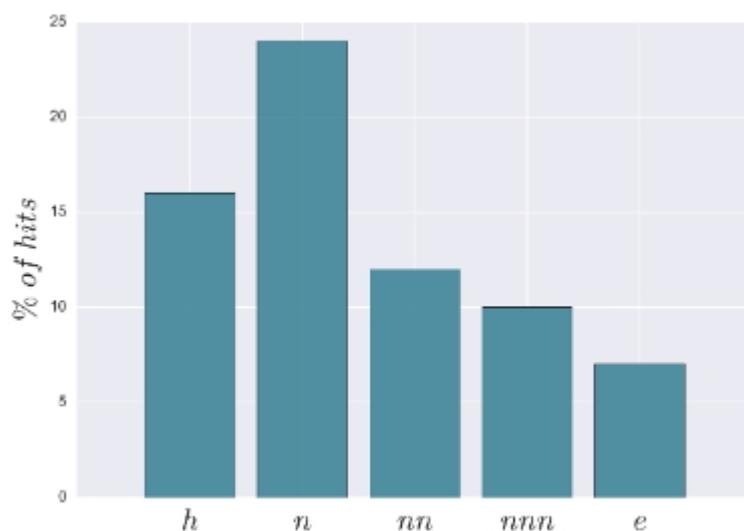


Abbildung 92: Verteilung der Leckagelokalisierung im Labormodell

Insgesamt ist deutlich zu erkennen, dass in mehr als 60 % aller Fälle die auftretende Leckage auch als solche entweder auf der betroffenen Leitung oder den nächstgelegenen Leitungen identifiziert werden konnte.

Daraus kann gefolgert werden, dass die Leckageeingrenzung im Labormodell auch bei Berücksichtigung der zuvor genannten Rahmenbedingungen und trotz sehr geringer technischer Rauigkeiten des Materials (PE-HD) sowie geringer Fließgeschwindigkeiten ein erstes akzeptables Ergebnis liefert. Bei der Durchführung dieser Versuche konnten die hydraulischen Parameter bzw. die Änderungen im Netz mit den installierten Sensoren erfasst werden.

Nach diesem ersten Testlauf zur Leckageeingrenzung wurde das Labormodell kontinuierlich erweitert. Die Planung und Konstruktion der einzelnen steuerbaren Verbraucher sowie die Anschaffung der zusätzlichen Sensoren, eines neuen Laborcomputers, neuer Datenlogger und die Entwicklung des Programms zur Steuerung der einzelnen Komponenten hatten einen hohen zeitlichen Aufwand zur Folge. Diese zeitliche Komponente führte dazu, dass bereits während der Finalisierung des Labormodells der Feldversuch startete und damit ein vorhergehendes Validieren der Methode zur Leckageeingrenzung und ein optimales Sensorplacement nur begrenzt möglich waren. Aus diesem Grund wurde der Fokus fortan auf die Umsetzung der Methode im Feld gelegt und das Labormodell spielte für die Methodenentwicklung und das Testen der Ansätze im übertragenen Sinn eine eher untergeordnete Rolle.

Im Vollausbau des Labormodells wurde eine Reihe von Experimenten zur Simulation von Leckagen durchgeführt. Diese Experimente beinhalteten die Simulation von Verbrauchsganglinien und eine auftretende Leckage ab einem definierten Zeitschritt. Basierend auf diesen experimentellen Daten und dem hydraulischen Modell, wurde die entwickelte Methode zur Leckageeingrenzung mit der Einbeziehung von Verbraucherunsicherheiten erneut durchgeführt. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Berechnungen an einem nicht kalibrierten hydraulischen Modell durchgeführt wurden. Als Messpunkte wurden alle installierten Drucksensoren verwendet. Die Größe der auftretenden Leckage betrug rund 0.18 l/s.

Das Ergebnis der Leckageeingrenzung am Labormodell im Vollausbau ist in den folgenden Abbildungen (in Abbildung 93 und Abbildung 94 sind die Ergebnisse der Leckagelokalisierung im Labormodell zum Stand Endausbau) ersichtlich. Die türkisarbenen Dreiecke symbolisieren die verwendeten Drucksensoren, welche zur Berechnung herangezogen wurden. Das türkisfarbene Kreuz markiert die Position der auftretenden Leckage und der in grün gehaltene Punkt zeigt das Ergebnis der Lokalisierung. Wie in Abbildung 94 b) zu sehen ist, wurde in mehr als 90 % aller Berechnungen der Ort der Leckage richtig ermittelt. Die zugehörigen berechneten Emitter-Koeffizienten der Leckage sind in Abbildung 94 a) dargestellt.

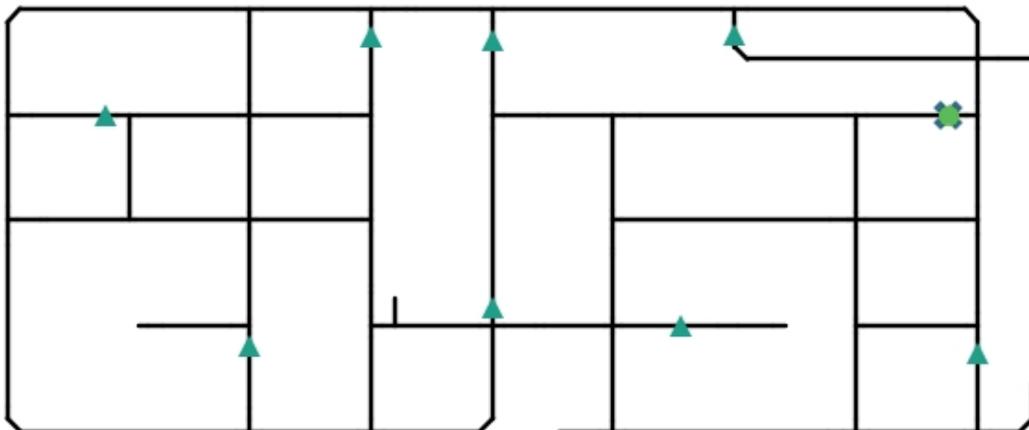


Abbildung 93: Leckagelokalisierung im Labormodell – Vollausbau

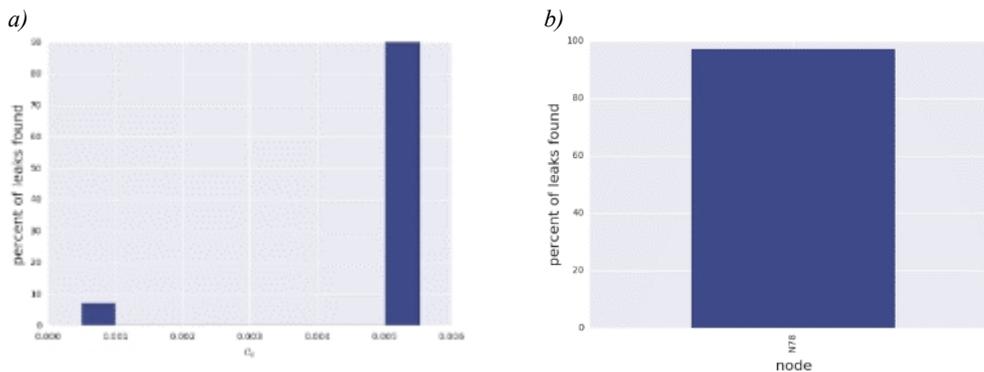


Abbildung 94: Ergebnisse der Leckagelocalisierung

An dieser Stelle sei angemerkt, dass sich das Labormodell in einem Status befindet, in dem noch viele nicht ausgeschöpfte Möglichkeiten zu erkennen sind, die es über dieses Projekt hinaus zu betrachten lohnen würde. Für Wasserversorger und Wasserversorgerinnen spielt nicht nur die Anwendbarkeit der im Rahmen dieses Forschungsprojektes entwickelten Methode eine Rolle, sondern auch verschiedene Begleitaspekte, wie beispielsweise die in Abhängigkeit der Netzstruktur und -größe detektierbaren Leckagemengen und die Lokalisierung dieser. Des Weiteren stellt sich die Frage, welche Infrastruktur dafür im Detail notwendig ist und welche Kosten die Implementierung einer solchen Methode verursachen würde.

Auch bereits im Feld verbaute Messtechnik sollte nicht außer Acht gelassen werden. So kann mit „zufällig“ angeordneten Messgeräten bereits eine Leckageeingrenzung erfolgen, jedoch gilt es z.B. den Unterschied zu einem optimalen Sensorplacement zu quantifizieren.

5.3 UMSETZUNG DER ENTWICKELTEN METHODEN IM FELDVERSUCH

5.3.1 PILOT WIEN – ZONE BLAU IV

Das Ziel des Feldversuchs in Wien Zone Blau IV war die Fragestellung, wie Messungen im Feld durchgeführt werden sollen bzw. wie eine Datenübertragung für die Fragestellung der modellbasierten Leckageeingrenzung vorzustattengehen soll. Im Zuge des Projektes wurden sieben Messstellen im System realisiert. An den Zu- und den Abflusspunkten der Druckzone wurden sowohl Druck als auch Durchfluss gemessen. Diese Messpunkte stellen die Randbedingungen für das hydraulische Modell dar (Sanz & Pérez, 2014). Zusätzlich wurde der Druck an fünf Stellen im System gemessen. Zuerst fanden die Messungen an Hydranten statt, in einem späteren Projektstadium wurden die Messungen an Hausanschlüssen in den Kellern von Wohnhäusern installiert. Der Werdegang als auch die Vor- und Nachteile in Bezug auf Installation, Wartung und Datenübertragung werden im Folgenden genauer beleuchtet.

5.3.1.1 MESSUNGEN AN DEN SYSTEMGRENZEN

5.3.1.1.1 MESSSTELLE GALLGASSE AM BEHÄLTER ROSENHÜGEL

Bei der Messzone Rosenhügel handelt es sich um den Zulaufpunkt der Messzone Wien Blau IV, die sich am Behälter Rosenhügel befindet. Im Bereich von Trinkwasserbehältern können zusätzliche Messensoren meist leicht installiert werden, da die Leitungen in der Schieberkammer des Behälters direkt zugänglich sind. Zusätzlich ist in der Schieberkammer von Trinkwasserbehältern meist eine Stromversorgung für Messung und Datenübertragung der Fernwirktechnik des WVU vorhanden. Des Weiteren ist im Behälterumfeld die Messtechnik vor Diebstahl und Vandalismus geschützt. Für die Erstellung einer Wasserbilanz ist üblicherweise ein Woltmannzähler oder eine Magnetisch Induktive Durchflussmessung (MID) bereits vorhanden.

ERGEBNISSE

Für die Leckagedetektion und -eingrenzung soll die Durchflussmessung sehr genaue und permanente Messwerte liefern. Dazu eignet sich insbesondere die Ultraschall-Durchflussmessung (UDM). Ist kein MID vorhanden müsste für die Installation eines MID die Leitung physisch unterbrochen werden, damit das Messgerät eingesetzt werden kann. Im Bereich des Zuflusses in die Pilotzone Blau IV war zum Zeitpunkt der Einrichtung des Pilotversuches kein MID vorhanden. Ein Einbau wäre mit einem erheblichen Aufwand verbunden gewesen, daher fiel die Entscheidung auf die nicht-invasive Messung des Durchflusses mittels eines Clamp-On UDM (Ultraschall-Aufschnallmessung).

MID und UDM messen mit verschiedenen Messprinzipien die Geschwindigkeit des durchfließenden Mediums. MIDs haben den Vorteil, dass durch den Einbau des Gerätes der Rohrquerschnitt genau gegeben ist und somit der Durchfluss über die Geschwindigkeit genau berechnet wird. Dies ist bei UDMs nicht der Fall. Zur Berechnung des Durchflusses aus der Geschwindigkeit benötigen diese Messgeräte die exakte Eingabe der Rohrgeometrie (Material, Durchmesser und Wandstärke). Bei älteren metallischen Leitungen kann der Querschnitt aufgrund von Korrosion und Verkrustungen stark variieren und ist daher mit einer Unschärfe bezüglich Rohrgeometrie behaftet. Eine Wandstärkenvermessung, ebenfalls mit der Nutzung von Ultraschall ist hier vor der Installation des Messgerätes erforderlich. Messfehler ergeben sich aber dennoch aus der Unregelmäßigkeit. Da aber für die Leckagedetektion und -lokalisierung nicht der absolute Messwert sondern die Veränderung des Messwertes gegenüber den vorangegangenen von Interesse ist, ist dieser Fehler von untergeordneter Bedeutung. Abbildung 95 zeigt die installierte Durchflussmessung am Behälter Rosenhügel.

Auch die Anbringung von Drucksensoren in den Schieberkammern von Behältern stellt in der Regel keinen erheblichen Aufwand dar. Druckmessungen können entweder an bereits vorhandenen Armaturen oder mittels Anbohrschelle installiert werden. Abbildung 96 zeigt die Druckmessung am Behälter Rosenhügel.



Abbildung 95: Durchflussmessung mittels Ultraschall am Behälter Rosenhügel, Messstelle Gallgasse



Abbildung 96: Druckmessung am Behälter Rosenhügel, Messstelle Gallgasse

Durch die fest installierten Messungen am Behälter Rosenhügel in der Schieberkammer Gallgasse wurde durch Vorhandensein von Strom ein kontinuierlicher Betrieb sichergestellt, der keinen zusätzlichen Personalaufwand benötigt. Die Datenübertragung erfolgte mittels myDatanet der Firma Microtronics (dargestellt in Abbildung 97). Die Daten wurden manuell vom Wiener myDatanet Server heruntergeladen und in das OpenSDM System der TU-Graz eingelesen (siehe Abbildung 98). Die Datenübertragung in das Datenmanagementsystem OpenSDM der TUGraz könnte bei Bedarf durch die Nutzung des Programms xPathClient der Firma Microtronics automatisiert werden kann.

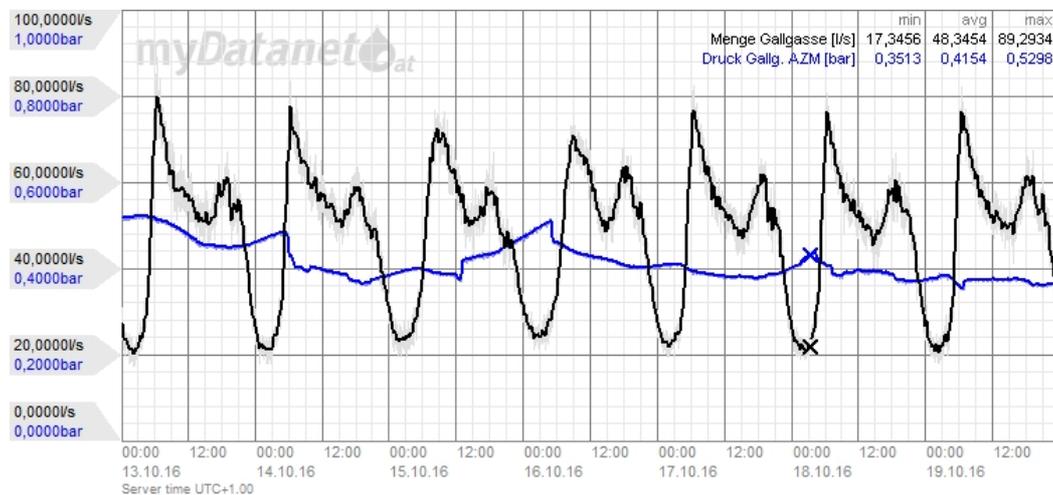


Abbildung 97: Messdaten der Messstelle Gallgasse dargestellt in myDatanet der Firma Microtronics.

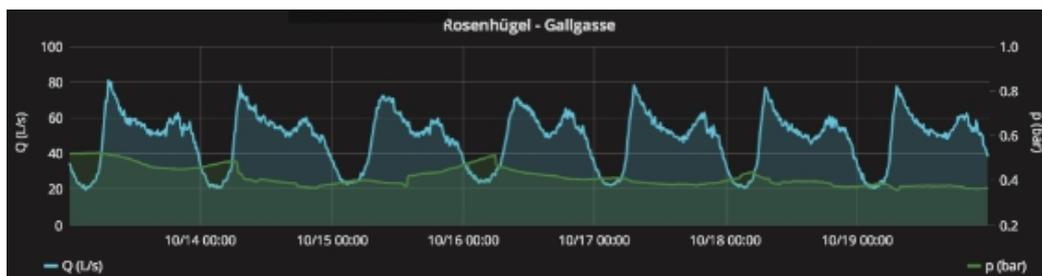


Abbildung 98: Messdaten der Messstelle Gallgasse dargestellt mittels Grafana aus den Daten aus der Zeitseriendatenbank in OpenSDM der TU Graz

5.3.1.1.2 MESSSTELLE KAISERPAVILLON

Bei der Messstelle Kaiserpavillon handelt es sich um den Ablaufpunkt der Messzone Wien Blau IV. Die Messstelle befindet sich in einem Schacht unter dem Radfahrstreifen an der Schönbrunner Schlosstraße. Die Messstelle im Schacht bietet dieselben Vorteile wie eine Messstelle im Behälter Rosenhügel hinsichtlich der Zugänglichkeit zum Rohr, dem Diebstahlschutz und dem Schutz vor Vandalismus, allerdings ist keine Stromversorgung vorhanden. Die Stromversorgung der Sensoren wurde daher mit Batterien sichergestellt. Aus dem Batteriewechsel resultiert ein erhöhter Personalaufwand (siehe Abbildung 99) und zusätzlich kann es durch die Stromversorgung mit Batterien zu Messausfällen kommen.

Am Kaiserpavillon wurde ebenfalls ein UDM (siehe Abbildung 100) sowie ein Drucksensor installiert. Anfangs wurden die Daten über myDatanet verwaltet und mittels Download und erneutes Einlesen in das OpenSDM der TU Graz übertragen. Später wurden die Daten über das Mobilfunknetz auf einen Server der MA31 übertragen. Dies ermöglichte die automatische Datenübertragung in das OpenSDM System der TU Graz über FTP.



Abbildung 99: Batterietausch an der Messstelle Kaiserpavillon in Zone Blau IV



Abbildung 100: Durchflussmessung mittels Ultraschall-Aufschnallmessung an der Messstelle Kaiserpavillon

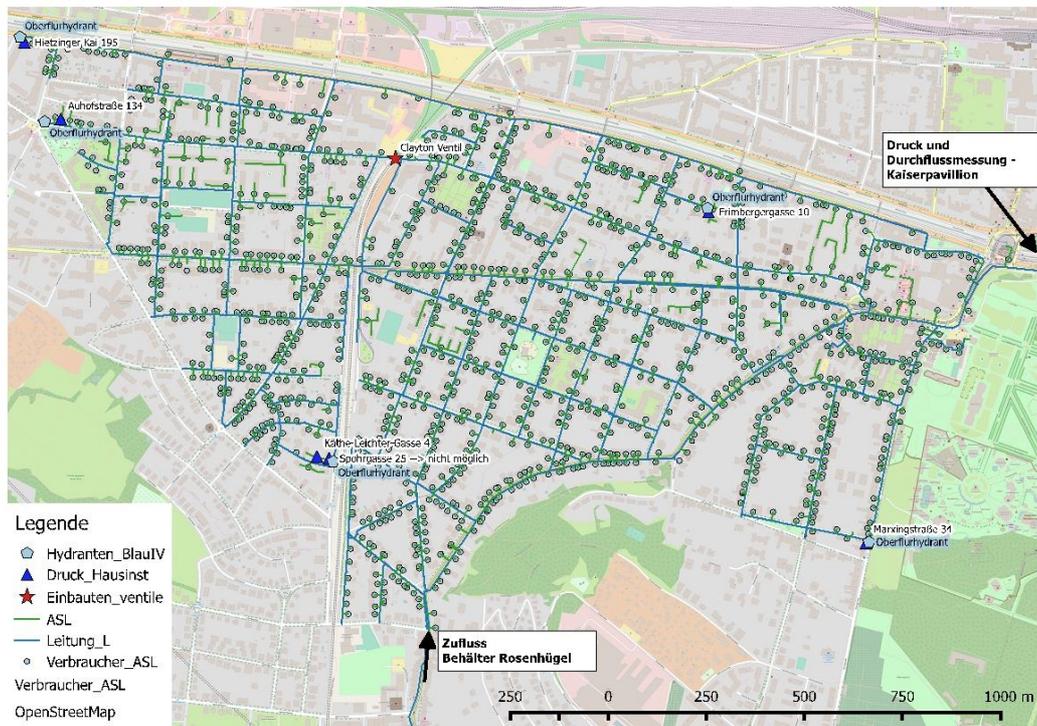


Abbildung 101: Plan des Feldversuches in Wien Blau IV mit eingezeichneten Leitungen, Anschlussleitungen, Verbrauchern, Druckmesspunkte an den Hydranten und an den Hausanschlüssen.

5.3.1.2 TEMPORÄRE DRUCKMESSUNGEN AN HYDRANTEN

In der Zone Blau 4 wurden in einem ersten Schritt für 10 temporäre Druckmessungen ideale Sensorpositionen mittels Shortest Path 2 (SP2) Ansatz berechnet. Als mögliche Positionen dienen alle Hydranten im System, da Hydrantendruckmessgeräte insbesondere für temporäre Messungen am besten geeignet sind. Um den Druck an Hydranten zu messen, wird ein Druckmessgerät an einer Schlauchkupplung installiert und der Hydrant geöffnet.

ERGEBNISSE

Der SP2-Ansatz wurde gewählt, da von Seiten der MA31 die genaue Sensoranzahl nicht feststand. Bei Sensitivitätsbasierten Algorithmen (wie z.B. Pérez oder Casillas) sind die idealen Positionen für z.B. vier Sensoren meist unterschiedlich als jene für fünf Sensoren. Dieses ist bei graphenbasierten Algorithmen nicht der Fall.

Fünf Sensoren wurden schlussendlich an Hydranten in Messkoffern installiert (siehe z.B. Abbildung 102). Die Installation an Hydranten bietet den Vorteil, dass sie leicht durchführbar ist und somit schnell installiert werden kann. Dies ist ideal für temporäre Messungen. Außerdem ist die Datenübertragung mittels Mobilfunk vergleichsweise einfach umzusetzen, da der Empfang im freien normalerweise besser ist als in z.B. Schächten.

Nachteile an einer Installation von Drucksensoren an Hydranten sind:

- Die Versorgung mit Strom erfolgt mit Batterien, weswegen sich ein erheblicher personeller Aufwand für den Tausch der Batterien ergibt.
- Die Möglichkeit von Vandalismus und Diebstahl muss bedacht werden, da die Messgeräte öffentlich zugänglich sind.
- Im Winter können keine Messungen durchgeführt werden, da die Gefahr besteht, dass das Wasser in den Hydranten gefrieren kann und somit die Sensoren beschädigt werden können.
- Der Hydrant muss offen sein, damit der Drucksensor den Druck im Netz misst. Dies ist ein Sicherheitsrisiko, da durch Öffnen einer weiteren Schlauchkupplung, Wasser unter hohem Druck aus dem Hydranten entweichen könnte.
- Die Messungen müssen mit allen Beteiligten Abteilungen abgesprochen werden. Schließt ein Mitarbeiter z.B. den Hydranten führt das zu einem Ausfall der Druckmessung (siehe Abbildung 103).



Abbildung 102: Druckmessung mit einem Messkoffer an einem Hydranten



Abbildung 103: Druckmessung an einem Hydranten, der unabsichtlich geschlossen wurde

Auch die temporären Druckmessungen an Hydranten wurden nach myDatenet übertragen und in weiterer Folge manuell nach OpenSDM exportiert. Dieser manuelle Export hat den Nachteil, dass auf etwaige Fehler wie z.B. leere Batterien und ein Schließen des Hydranten nicht zeitnah reagiert werden kann, sondern erst zu dem Zeitpunkt, an dem die Daten exportiert und auf Plausibilität geprüft werden. Werden die Daten automatisiert übertragen, kann das Zeitintervall, wann die Daten übertragen werden, deutlich reduziert werden. Zusätzlich können automatisierte Alarmierungen programmiert werden und automatisiert zuständige Personen alarmiert werden. Druckmessungen an Hydranten eignen sich daher lediglich für temporäre Messungen.

Für die permanente Installation von Drucksensoren ist die Anbringung an Hausanschlussleitungen im Bereich vor den Wasserzählern geeignet.

5.3.1.3 PERMANENTE DRUCKMESSUNGEN AN HAUSANSCHLUSSLEITUNGEN

Die Sensoren wurden in Häusern direkt an der Anschlussleitung in der Nähe der berechneten idealen Positionen installiert (Abbildung 101).

Die Vorteile der Anordnung im Hausanschlussbereich liegen darin, dass eine permanente Stromversorgung hergestellt werden kann und der Schutz vor Frost, Diebstahl und Vandalismus gegeben ist. Ein Nachteil ist der erhöhte Aufwand bei der Installation der Drucksensoren als auch bei der Herstellung des Stromanschlusses. Allerdings wird so ein permanenter Betrieb der Sensoren gewährleistet, was mit niedrigeren Instandhaltungskosten verbunden ist (z.B. ist kein Batterietausch notwendig). Ausfälle von Messensoren aufgrund von Stromunterbrechungen, wie sie bei einem Batteriebetrieb auftreten können, wird hier vorgebeugt.

Die größte Herausforderung der Installation der Drucksensoren in Kellern an Hausanschlussleitungen stellt die Bereitschaft des Kunden dar, Sensoren im Wohnhaus zu installieren. Im Vorfeld müssen Fragestellungen wie beispielsweise die Zugänglichkeit der Sensoren für Sensorwartung und -betrieb im Objekt der Installation geklärt werden.

Zudem gilt es zu klären, ob der Kunde bereit ist, die zusätzlichen Stromkosten für den Betrieb des Sensors (ca. 3 bis 5 € im Jahr), zu übernehmen. Ist dies nicht der Fall, muss ein eigener Stromanschluss mit Stromzähler und Sicherungskasten installiert werden. Dies ist mit dem elektrischen Versorgungsunternehmen zu klären und bedeutet einen zusätzlichen Aufwand und zusätzliche Kosten in der Umsetzung eines Messpunktes.

Die Datenübertragung aus den Kellern, an denen sich der Hausanschluss und der Wasserzähler befinden, kann auch eine Herausforderung darstellen und muss vor dem Einbau geprüft werden. Im gegenständlichen Projekt AZM stellte dies kein Problem dar, da die Datenübertragung über das Mobilfunknetz aus den Kellern, in denen Sensoren installiert wurden, problemlos funktionierte.

Die Installation von Sensoren an idealen Positionen im TVN steht in engem Zusammenhang mit der Bereitschaft der Kunden, Sensoren zu installieren. Im Gegensatz zur Installation an Hydranten kann dies dazu führen, dass die Anbringung der Sensoren am idealen Punkt nicht möglich ist. Somit stimmen die Positionen, die als ideal berechnet wurden, mit den Positionen, an denen Sensoren installiert werden können nicht überein. Bei der Installation an Hausanschlüssen führt dies aber zu einem Problem: Wird eine Position als ideal berechnet, aber der Kunde weigert sich, einen Sensor dort zu installieren, muss eine alternative Position gefunden werden. In diesem Fall gilt es zwei Alternativen zu prüfen. Zum einen könnte die Position, wo die Installation aufgrund des sich weigernden Kunden nicht möglich ist, als Messposition aus dem Algorithmus zur idealen Sensorplatzierung gestrichen werden und die idealen Positionen neu berechnet werden. Die zweite Option besteht darin, weitere Möglichkeiten und Kunden welche einer Installation zustimmen, zu suchen um Sensoren zu installieren. Hierbei kann ein Abweichen der Messpunkte von idealen Positionen und damit einhergehenden Einbußen in der Qualität der Leckageeingrenzung nicht ausgeschlossen werden. Die Masterarbeit (Moors, 2016) stellt eine innovative Methode vor, wie diesem Problem begegnet werden kann. In einem ersten Schritt wurden die idealen Sensorpositionen berechnet. Danach wurde Kontakt zu den Kunden aufgenommen und abgeklärt, ob ein Sensor am Hausanschluss installiert werden kann und ob Strom und Internetanschluss zur Verfügung gestellt würde, um die Datenübertragung sicherzustellen. Diese Methode stellte sich als sehr aufwendig und zum Teil umständlich heraus um einen entsprechenden Erfolg zu erlangen. Nur 10 % der Kunden waren mit einer Installation am Hausanschluss einverstanden. Aufgrund der ernüchternden Rückmeldungen der Kunden wurde ein neuer Zugang gewählt. Im folgenden Ansatz wurden 500 Emails an zufällig ausgewählte Kunden in der Messzone gesendet. Die persönlichen Nachrichten enthielten Information über die Sensoren und die Bedingungen, die für einen Sensoreinbau vorhanden sein müssen (Zugänglichkeit, Strom und Internetanschluss) und die Frage, ob die Kunden damit einverstanden wären, wenn Sensoren bei ihnen eingebaut werden. Wiederum resultierte das Ergebnis in einer Erfolgsquote von rund 10 %, was jedoch in diesem Fall 50 mögliche Sensorpositionen lieferte. Unter diesen möglichen Positionen wurden dann die idealen Sensorpositionen für 12 Sensoren berechnet.

In Wien konnten abschließend 5 Sensoren an Hausanschlussleitungen vor dem Wasserzähler zusammen mit einer Stromversorgung permanent installiert werden (siehe Abbildung 104 und Abbildung 105). Die Sensoren befinden sich in der Nähe der Hydranten, die für die temporäre Messung als ideal berechnet wurden (siehe Abbildung 101). Im Allgemeinen ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit den als ideal berechneten Positionen. Allein in der Spohrgasse 25 war es nicht möglich, einen Sensor zu installieren. Aus diesem Grund wurde der Sensor in unmittelbarer Nähe, in der Käthe-Leichter-Gasse 4, installiert. Im Messkoffer befindet sich ein Drucksensor (BD Sensors DMP 331) und ein Modul für die Datenübertragung über das Mobilfunknetz. Die Stromversorgung erfolgt extern (siehe Abbildung 106). Die Kosten für permanent installierte Sensoren mit Stromversorgung und Datenübertragung betragen rund 2000 € pro Sensor bzw. Messpunkt.

Permanente Druckmessungen in hydraulischen Systemen sind nicht nur für eine modellbasierte Leckageeingrenzung wichtig. Die Messdaten können auch für andere Aufgabenbereiche parallel genutzt werden:

- Alarmierung bei Auffälligkeiten im System
- Entdecken von geschlossenen Schiebern
- Nachverdichtung in Städten, ist Druck ausreichend oder braucht Gebäude Drucksteigerungsanlage
- Druckmanagement
- Optimierte Pumpensteuerung

ERGEBNISSE

- Automatische Kalibrierung
- Verbraucher-Kalibrierung um bessere Verbrauchsmodelle zu erhalten

Zeitgleiche Messungen von Druck und Durchfluss in der Zone Wien Blau IV sowohl in der Gallgasse als auch am Kaiserpavillon existieren seit dem 19. März 2015. Natürlich ist es aufgrund der temporär installierten Messung am Kaiserpavillon mit Batterieversorgung zu vereinzelt Messausfällen gekommen, die Daten stehen aber bis heute zu einem Großteil der Zeitspanne zur Verfügung. Die temporären Messungen an den Hydranten wurden von 20. August 2015 bis zum 11. November 2015 durchgeführt. Hier kam es allerdings vermehrt zu Messausfällen aufgrund leerer Batterien. Ein durchgehender Messbetrieb an den permanent an Hausanschlussleitungen installierten Sensoren besteht seit dem 21. Juli 2016. Dieser Messbetrieb funktioniert bis heute nahezu problemlos, was für die permanente Installation von Druckloggern spricht. Diese Messdaten, obwohl noch nicht intensiv verwendet, bilden für die Wissenschaft ein großes Potential, da unseres Wissens nach bis jetzt noch nicht so hoch aufgelöste Daten eines echten TVN über einen solch langen Zeitdauer existieren. Alle Daten wurden in das OpenSDM System der TU Graz übertragen, exemplarisch ist ein Ausschnitt der Messdaten, visualisiert mittels Grafana, in Abbildung 107 und Abbildung 108 dargestellt.



Abbildung 104: Installation eines Drucksensors mit Stromversorgung vor dem Wasserzähler eines Hauses.



Abbildung 105: Installation eines weiteren Drucksensors mit Stromversorgung vor dem Wasserzähler eines Hauses.



Abbildung 106: Inhalt eines Messkoffers, wie sie an den Hydranten und an den Hausanschlüssen installiert wurden. In der Mitte ist das Datenübertragungsmodul zu sehen, unten der Drucksensor. Bei den Hydrantenmessungen befindet sich zusätzlich eine Batterie im Messkoffer.

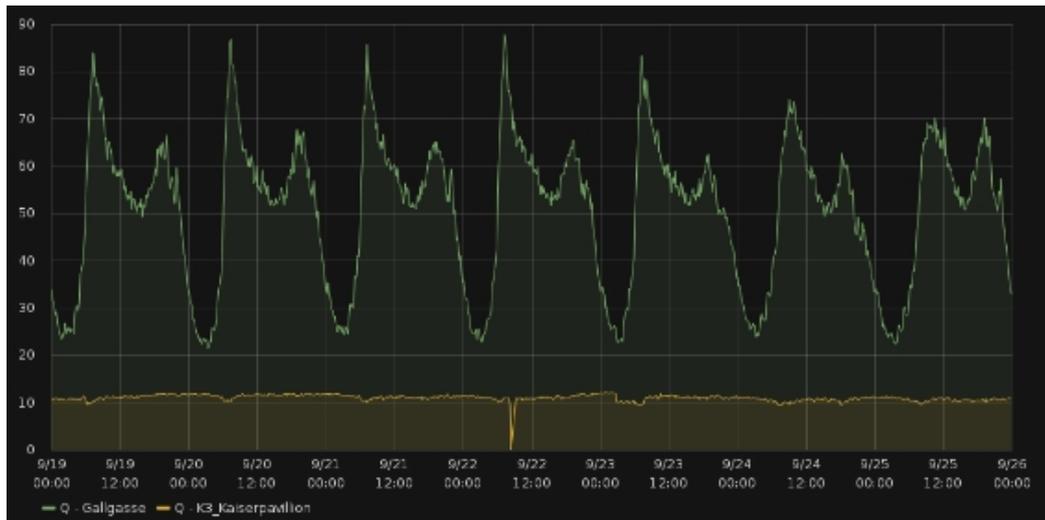


Abbildung 107: Messungen des Durchflusses im Netz Wien Blau IV an den Messstellen Gallgasse und Kaiserpavillon

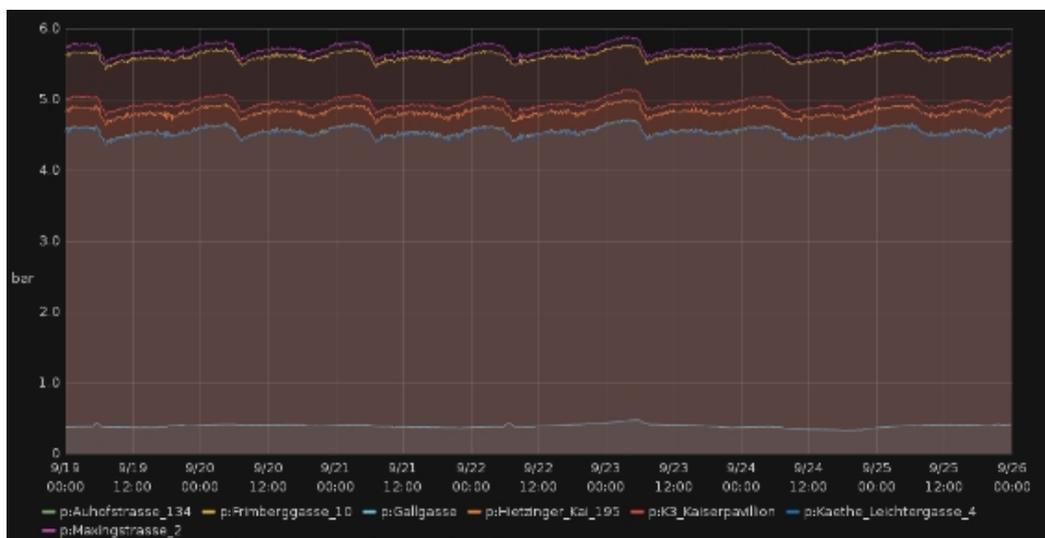


Abbildung 108: Messungen des Drucks an den Messstellen Gallgasse und Kaiserpavillon sowie auch den permanent an den Hausanschlüssen installierten Messpositionen

Im Feldversuch Wien wurde getestet, welche Vorteile eine permanente Installation von Druckloggern bietet bzw. wie eine solche realisiert werden kann. Im Feldversuch Hart bei Graz wurde die Methode der modellbasierten Leckageeingrenzung in einem echten Netz mit temporär installierten Sensoren mittels kleiner künstlicher Leckagen getestet.

5.3.2 MODELLBASIERTE LECKAGELOKALISIERUNG IM FELDVERSUCH HART BEI GRAZ – ZONE RAGNITZ HB KOPPENHOF

Der Feldversuch in Hart bei Graz hatte drei Aufgaben zum Ziel:

1. Untersuchung der Anforderungen an das der Leckagelokalisierung zugrundeliegende hydraulische Modell
2. Vergleich unterschiedlicher Sensorplatzierungsalgorithmen im Hinblick auf die Genauigkeit der Leckagelokalisierung

3. Ableitung der auf Basis der modellbasierten Leckagelokalisierung und der installierten Sensoren detektierbaren Leakagegröße im Untersuchungsgebiet

Dazu wurden in Hart bei Graz – Zone Ragnitz HB Koppenhof des Wasserleitungsverbandes GFSO 12 Drucksensoren an den von unterschiedlichen Sensorplatzierungsansätzen ermittelten Positionen eingebaut. Der Einbau erfolgte an Oberflur- und Unterflurhydranten (siehe Kapitel 4.3.2, Seite 94). Es wurden mobile Druckmessgeräte ohne Onlinedatenübertragung verwendet, wodurch ein manuelles Auslesen erforderlich war. Diese Form der Installation wurde bevorzugt, da ein Umsetzen der Druckmessgeräte auf allenfalls besser geeignete Positionen dadurch leicht möglich war. Die Installation einer externen Stromversorgung für die Datenübertragung wie z.B. durch Solarpaneele stand zudem aus Kostengründen für diese temporäre Versuchsanordnung nicht zur Diskussion. Der kontinuierliche Betrieb von Druck- und Durchflussmessungen in Trinkwassernetzen wurde auf Basis des Feldversuches Wien Zone Blau IV getestet (siehe Kapitel 4.3.1, Seite 92).

Zur Simulation von Leckagen im Feld wurden an drei unterschiedlichen Positionen im Netz Hydranten geöffnet. Dabei wurden Leckagen zwischen 0.25 und 1 l/s simuliert (Details siehe Kapitel 4.3.2.2.2, Seite 98)

5.3.2.1 KALIBRIERUNG DES HYDRAULSICHEN MODELLS

Es ist davon auszugehen, dass die Qualität des hydraulischen Modells einen signifikanten Einfluss auf die Möglichkeit der modellgestützten Leckageeingrenzung hat. Aus diesem Grund ist der Kalibrierung des hydraulischen Modells besonderes Augenmerk zu schenken.

Die Kalibrierung des hydraulischen Modells erfolgte im Zuge des Projektes Aquademia unter Zuhilfenahme der Software Mike Urban sowie manueller lokaler Anpassungen durch die Projektantin. Nach dieser ersten Kalibrierung des hydraulischen Modells konnten die Abweichungen zwischen Realität und Berechnungen im hydraulischen Modell auf maximal 3 m bzw. 0.3 bar reduziert werden.

Basierend auf dem hydraulischen Modell aus der ersten Messkampagne, konnten unter Verwendung der neu generierten Messreihen im April 2016 die Unterschiede zwischen den Modellberechnungen und gemessenen Werten weiter verringert werden.

Dazu wurde der Verbrauch im Nachtminimum auf Basis der Langzeiteinspeisedurchflussmessungen des „ungestörten“ Systems angepasst. Der dafür herangezogene Messzeitraum lag zwischen April 2016 bis Mitte Juli 2016. Die Einspeisemessungen wurden zur Ableitung einer mittleren Zuflussganglinie um Ausreißer bereinigt. Abbildung 109 zeigt Median, Mittelwert und Standardabweichung des Tagesganges im Gebiet Hart bei Graz, wobei die linke Grafik Wochenenden und Ausreißer beinhaltet, woraus eine deutlich höhere Standardabweichung resultiert. Diese beträgt zum Beispiel in den Morgenstunden 1.5 l/s und zum Zeitpunkt des Nachtminimums 0.4 l/s. Die rechte Grafik zeigt den Tagesgang von Wochentagen nach Ausreißerbereinigung. Die Standardabweichung im Nachtminimum konnte dadurch von mehr als 1l/s auf 0,5l/s reduziert werden.

ERGEBNISSE

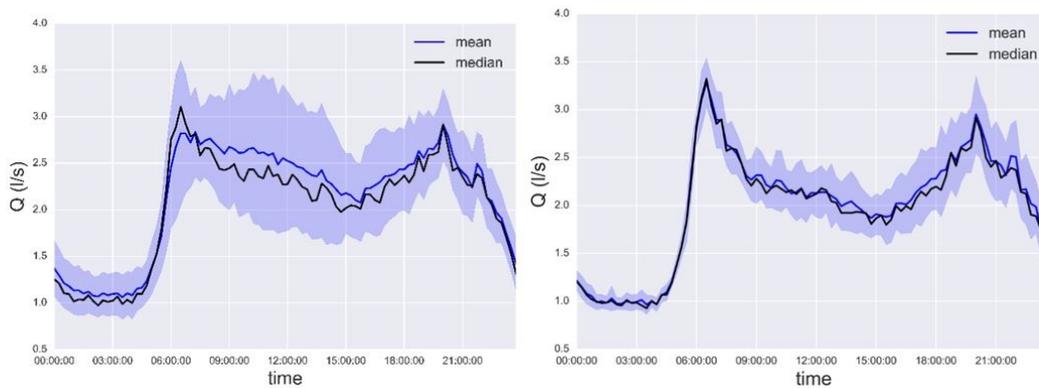


Abbildung 109: Median, Mittelwert und Standardabweichung der Einspeisemessungen von April 2016 bis Juli 2016. Links: mit Ausreißern und Wochenenden. Rechts: Ohne Ausreißer und Wochenenden

Zusätzlich wurden die Langzeitdruckmessungen des ungestörten Systems mit den berechneten Drücken in den Messpunkten verglichen, um abschätzen zu können, inwiefern das hydraulische Modell die Drücke im System bei herkömmlichen Verbrauchsverhältnissen abbilden kann. Abbildung 110 zeigt Median, Mittelwert und Standardabweichung der Differenz zwischen gemessenen zu berechneten Drücken in zwei exemplarischen Messpunkten. Median und Mittelwert der Abweichung zwischen Simulation und Messung betragen im Nachtminimum in beiden gewählten Messpunkten 0.1 m in der Morgenspitze sind die Abweichungen allerdings höher. In der linken Grafik liegt diese bei 0.2 m in der rechten Grafik bei bis zu 0.3 m. Genauso nimmt ist auch die Standardabweichung zu Spitzenlastzeiten höher.

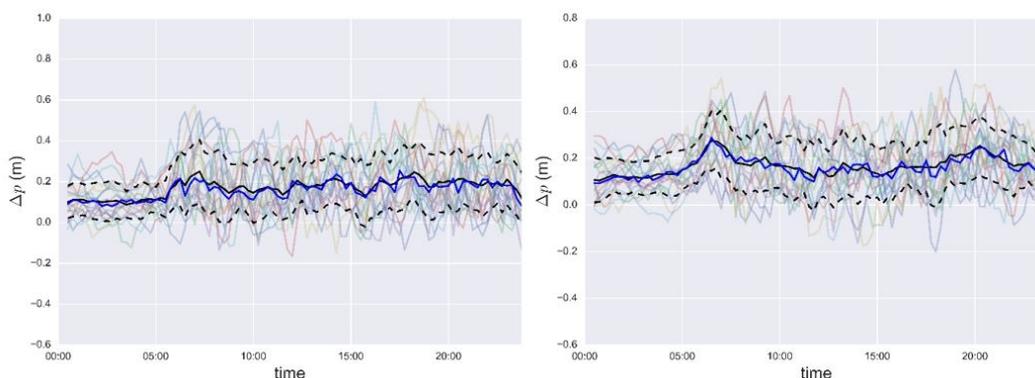


Abbildung 110: Median, Mittelwert und Standardabweichung (strichliert) der Druckabweichung zwischen simulierten und von April 2016 bis Juli 2017 gemessenen Drücken an zwei unterschiedlichen Messpunkten.

Da für die modellbasierte Leckagelokalisierung insbesondere die Nachtminimaverhältnisse von Interesse sind, wurde resultierend aus dem Vergleich der gemessenen vs. simulierten Drücke die Höhenkoten aller Messpunkte entsprechend angepasst. Von einer weiteren Kalibrierung der Rauigkeiten wurde allerdings abgesehen.

5.3.2.2 VERGLEICH DER LOKALISIERUNGSGENAUIGKEIT FÜR UNTERSCHIEDLICH PLATZIERTE SENSOREN

Die Unterschiede in der Qualität und Genauigkeit der Leckagelokalisierung wurden für sechs verschiedene Sensorplatzierungsansätze und neun verschiedene Leckage-Szenarien untersucht. Eine detaillierte Beschreibung der untersuchten Sensorplatzierungsalgorithmen ist in Kapitel 4.1.2 (Seite 36) zu finden. Für jedes Leckage-Szenario wurde mit den Messdaten der sechs verschiedenen Sensor Sets die wahrscheinlichste Position der Leckage berechnet. Dazu wurde der in Kapitel 4.1.2 (Seite 36) im Detail beschriebene Leckagelokalisierungsalgorithmus verwendet. Je Leck-Szenario und Sensor Set wurden 100

Lokalisierungsdurchgänge gerechnet. Im Folgenden sind die dabei erzielten Ergebnisse im Detail beschrieben.

5.3.2.2.1 SENSORPLATZIERUNG ERGEBNISSE

Das Netz Hart bei Graz diente dazu, verschiedene ideale Sensorplatzierungsalgorithmen miteinander zu Vergleichen. Der Vergleich sollte nicht nur am Computer durch Simulation hergestellt werden, sondern unter realen Bedingungen durch die Durchführung eines Feldversuchs. Hierzu werden dann im Kapitel 5.3.2 (Seite 109) die Ergebnisse vorgestellt, die aus dem Feldversuch hervorgegangen sind. Dies ist das erste Mal weltweit, dass optimale Sensorplatzierungsalgorithmen miteinander unter echten Bedingungen verglichen werden.

Um die verschiedenen Sensorplatzierungsalgorithmen, die in Kapitel 4.1.2 (Seite 36) vorgestellt wurden, auf das Netz Hart bei Graz anwenden zu können, wird ein kalibriertes hydraulisches Modell benötigt. Dieses hydraulische Modell wurde im Zuge des Projektes Aquademia in Zusammenarbeit mit einer Studentin aus Belgien und einer Grazer Firma erstellt. Die Verbrauchsinformation wurde aus Zählerablesungen zwischen den Jahren 2010 und 2014 generiert, wobei ein mittlerer Verbrauch über diesen Zeitraum herangezogen wurde. Das zeitliche Verbrauchsmuster wurde durch Analyse der Einspeisemessungen erhalten. Im August 2015 wurde eine Kalibrierungsmesskampagne in der Nacht durch eine Grazer Firma und Unterstützung der TU-Graz durchgeführt. Auf Basis dieser nächtlichen Messwerte konnte das hydraulische Modell kalibriert werden. Im Zuge dieser Arbeit entstanden nicht nur ein kalibriertes hydraulisches Modell, sondern mehrere Modelle mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad.

Für die optimalen Sensorplatzierungsalgorithmen zum Zweck der Leckagelokalisierung wurde ein sehr detailliertes Modell des Netzes Hart bei Graz verwendet. Dieses Modell besteht aus rund 1.300 Knoten, die über ungefähr gleich viele Leitungen miteinander verbunden sind. Die Gesamtlänge der Leitungen des Netzes beträgt 15.4 km und die Innendurchmesser reichen von 25.4 mm bis hin zu 126.6 mm Rohren. Die Drücke erstrecken sich von 29 Meter am Einspeisepunkt bis hin zu 103 Meter (siehe auch Abbildung 111). Diese hohen Druckunterschiede kommen vor allem durch ein starkes Gefälle im Netz zustande. Das Nachtminimum im hydraulischen Modell für die Sensorplatzierung beträgt 1.04 l/s.

Das sehr detaillierte hydraulische Modell besitzt sehr viele Knoten, die als mögliche Messpunkte dienen können. Diese hohe Anzahl der Knoten führt zu einem Problem, da die Anzahl der Möglichkeiten M , k Sensoren an N Punkten zu platzieren, durch den Binomialkoeffizienten gegeben ist

$$M = \binom{N}{k}$$

Wird beispielweise eine Anzahl von $k = 5$ Sensoren im System platziert, so ergibt das im Netz von Hart bei Graz rund $3 \cdot 10^{13}$ Möglichkeiten. Dies stellt den Lösungsraum des optimalen Sensorplatzierungsproblems dar. Besteht das Ziel darin, die optimale Lösung erhalten, müsste jede dieser Möglichkeiten betrachtet bzw. berechnet werden, um diese Lösung zu erhalten. Dies ist selbst mit modernsten Computern nicht möglich. Selbst wenn 100 mögliche Platzierungen in der Sekunde überprüft werden könnten, würde die gesamte Berechnung aller Möglichkeiten rund 10.000 Jahre in Anspruch nehmen. Genetische Algorithmen bilden eine Abkürzung zu diesem Problem, optimale Lösungen oder quasi-optimale Platzierungen in vertretbarer Zeit zu berechnen. Durch die schier unendliche Größe des Lösungsraums können Algorithmen nur einen sehr begrenzten Teil des Lösungsraums absuchen. Selbst wenn 100 Berechnungen in der Sekunde möglich wären und der Algorithmus einen ganzen Tag rechnen würde (entspricht rund 8.6 Millionen Berechnungen), würde der genetische Algorithmus im besten Fall nur 0.00003 % des gesamten Lösungsraumes berechnen. Dies ist ein zu kleiner Ausschnitt, um die geforderte Optimalität garantieren zu können.

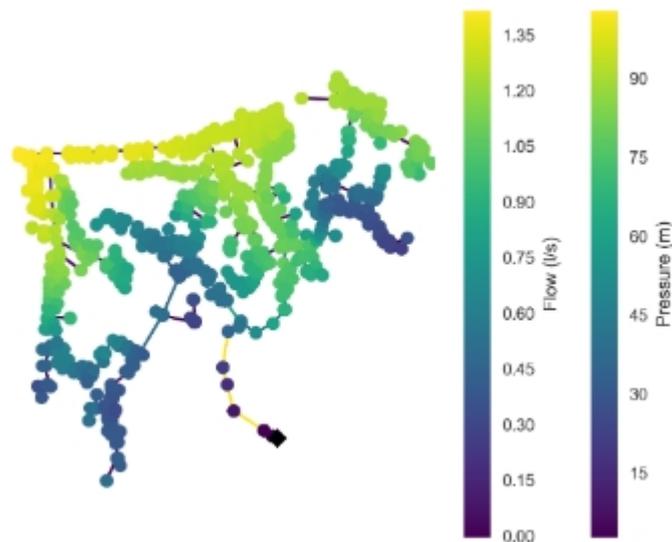


Abbildung 111: Hydraulisches Modell des Pilotnetzes in Hart bei Graz

Daraus ergibt sich die Fragestellung, wie der Lösungsraum weit genug verkleinert werden, um das Problem der idealen Sensorplatzierung im Feldversuch lösen zu können. Die Antwort liegt darin, eine Reduzierung der möglichen Stellen, an denen Sensoren platziert werden können, herbeizuführen. In der Realität können Sensoren nicht an jedem beliebigen Knoten des hydraulischen Modells platziert werden. Es kann zum Beispiel der Fall vorliegen, dass ein hydraulischer Knoten sich unter einer stark befahrenen, wichtigen Verkehrsachse befindet und Versorgungsunternehmen nicht gewillt sind, an dieser Stelle Grabungsarbeiten durchzuführen, um Sensoren zu platzieren. In so einem Fall stellt auch die Wartung des Sensors (Batterietauschen, etc.) einen limitierenden Faktor dar. Ergebnisse haben gezeigt, dass eine effektive Art den Lösungsraum einzuschränken darin besteht, dass TVU im Vorfeld jene Stellen bekanntgeben, an welchen ein Einbau von Sensoren realistisch umgesetzt werden kann. Da es sich zum Beispiel beim Feldversuch in Hart bei Graz um einen temporären Versuch handelt und die Entscheidung getroffen wurde, Druckmesspunkte nur auf Hydranten zu positionieren, schränkte das den Lösungsraum ungemein ein.

Das System in Hart bei Graz besitzt 35 Hydranten, welche als mögliche Positionen für eine Druckmessung in Frage kommen. Die möglichen Messpositionen sind in Abbildung 112 dargestellt. Dies reduziert die möglichen Kombinationen der Sensorpositionen in diesem Modell auf rund 325.000. Dies entspricht einer Größe, die auch mit modernen Computern gut bewältigt werden kann. Könnte man 100 mögliche Platzierungen in einer Sekunde berechnen, so wäre die Berechnung aller möglichen Kombinationen von fünf Sensoren im System bereits nach rund einer Stunde erfolgt.



Abbildung 112: Mögliche Sensorpositionen an Hydranten im Modell Hart bei Graz

Für den Feldversuch standen insgesamt 12 Sensoren zur Verfügung. Aufgeteilt auf die sechs Sensorplatzierungsmethoden resultiert dies in fünf Sensoren pro Methode. Diese Zahl ergibt sich aus der Überschneidung idealer Positionen der einzelnen Algorithmen.

TABELLE 9: SENSORPOSITIONEN AN HYDRANTEN BERECHNET MIT VERSCHIEDENEN ALGORITHMEN

Hydrant/Algor.	SP1	SP2	SE	Pérez	Casillas	SPuDU	Summe Sensoren
HG3420			X		X	X	3
HG3445	X	X					2
HG3835					X		1
HG3933	X		X	X	X	X	5
HG4150	X	X					2
HG4162						X	1
HG4215			X	X	X	X	4
HG4339b	X	X	X	X			4
HG4383				X	X	X	3
HG4540				X			1
HG4576		X					1
HG4744	X	X	X				3

Die Positionen der Sensoren an den Hydranten mit den Knotennamen aus dem hydraulischen EPANET-Modell sind in Tabelle 9 und Abbildung 113 dargestellt. Manche Positionen werden von mehreren Algorithmen als ideal ausgewählt, während sie für andere Algorithmen nicht von Bedeutung sind. Dies ergibt sich aus den unterschiedlichen Methoden, welche von den genannten Algorithmen verwendet werden. Beispielhaft soll dieser Umstand am Hydranten HG3933 erläutert werden. Dieser Hydrant wurde von fünf der sechs Algorithmen als optimale Position ermittelt. Der Hydrant HG3933 wurde vom Shortest Path 1 Algorithmus aufgrund seiner weiten Entfernung vom Behälter ausgewählt, während dieser von anderen Sensitivitätsmatrix-basierten Algorithmen (Shannon Entropie, binärisierte Sensitivitätsmatrix nach Pérez und nicht-binärisierte Ansatz von Casillas) aufgrund seiner hohen Sensitivität auf Leckagen gewählt wurde. Die Leckage-Sensitivitäten aller Punkte im Netz sind in Abbildung 114 dargestellt. Des Weiteren ist der Effekt der unsicheren Verbraucher an dieser Stelle nicht so groß (siehe Abbildung 115), weswegen er auch vom SPuDU Algorithmus, der Verbraucherunsicherheiten in die Berechnung berücksichtigt, ausgewählt wurde. Es sei darauf hingewiesen, dass aufgrund des hohen Detaillierungsgrades des hydraulischen Modells die Verbraucher sehr klein sind, weswegen die Auswirkungen ihrer Unsicherheiten aus hydraulischer Sicht sehr gering sind. Lediglich der Shortest Path 2 Algorithmus berechnet die ideale Position nicht am Hydranten

ERGEBNISSE

HG3933, weil durch Setzen von Sensoren auf den Hydranten HG4339b, HG4744 und HG4150 und durch Setzen der Gewichte der Leitungen vom Behälter bis zu diesen Punkten, der kürzeste Weg zu diesem Hydranten verkürzt wird, und aus diesem Grund als nicht ideal vom Algorithmus erachtet wird. Es sei hier erwähnt, dass diese Position für den Shortest Path 1 Algorithmus gerade noch in die Liste der idealen Sensorpositionen Eingang findet, da er als letzter Messpunkt in der Liste der idealen Sensoren aufgenommen wird.

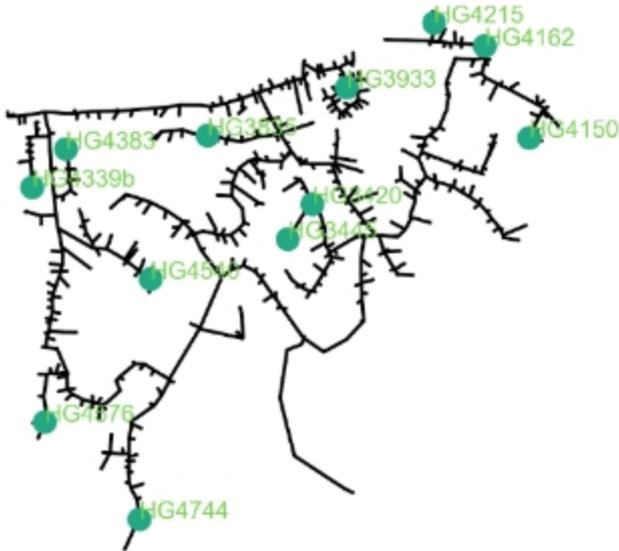


Abbildung 113: Positionen aller Sensoren im Netz Hart bei Graz beschriftet mit Knotennamen aus dem EPANET-Modell

Die Hydranten HG4215 und HG4339b, die jeweils für vier Algorithmen als ideal angesehen werden, werden von unterschiedlichen Algorithmen präferiert. Während sich HG4339b bei den graphentheoriebasierten Algorithmen als ideal herausstellt, wird im Gegensatz dazu der Hydrant HG4215 von den sensitivitätsbasierten Algorithmen präferiert.

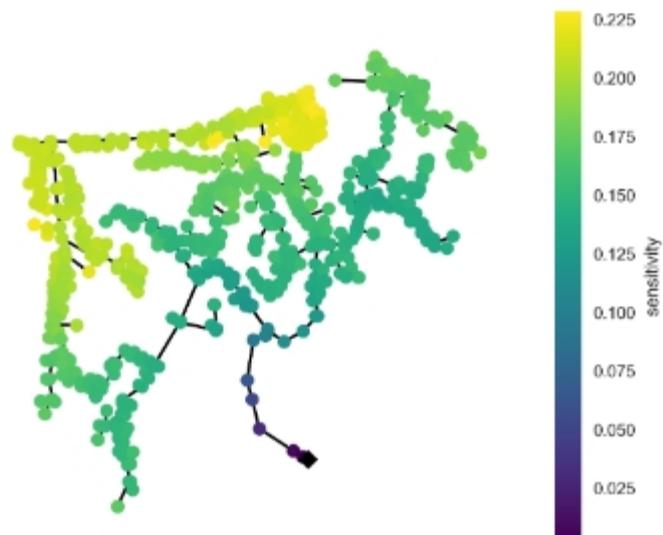


Abbildung 114: Sensitivität auf Leckagen im Netz Hart bei Graz

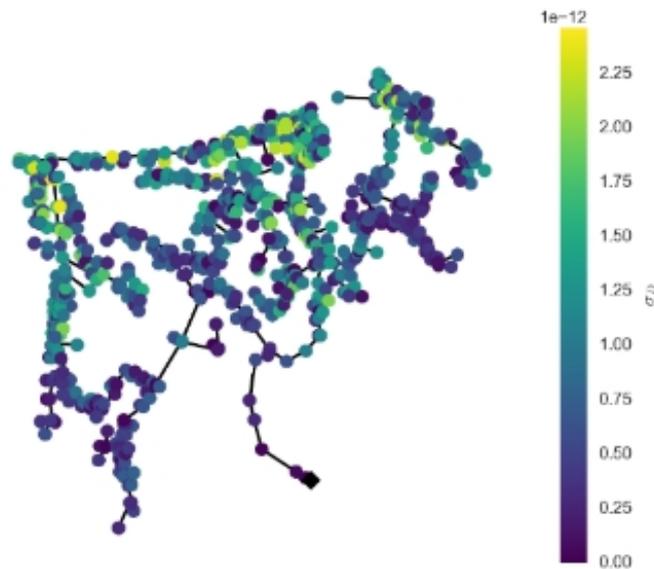


Abbildung 115: Verbraucherunsicherheiten im Netz Hart bei Graz

Die Hydranten HG3445 und HG4150 werden alleine von den Shortest Path Algorithmen ausgewählt, während die sensitivitätsbasierten Algorithmen gänzlich auf diese Messpositionen verzichten. Der Hydrant HG4576 wird beispielsweise lediglich vom Shortest Path 2 Algorithmus ausgewählt. Das Auslassen dieser drei Messpositionen durch die sensitivitätsmatrixbasierten Algorithmen hat den Grund, dass die Leckage-Sensitivität an diesen Positionen gering ist (siehe Abbildung 114).

Eine weitere Besonderheit stellt der Hydrant HG4744 dar. Dieser wird sowohl von beiden Shortest Path Algorithmen (siehe Abbildung 116 und Abbildung 117), als auch vom Shannon Entropie Algorithmus (siehe Abbildung 118) ausgewählt, d.h. von allen Algorithmen, die in (de Schaetzen et al., 2000) beschrieben werden. Dieser Hydrant ist nicht sehr sensibel auf Leckagen, aber der Einfluss der Shannon-Entropie-Funktion auf die Platzierung und damit verbunden die möglichst größte Streuung der Sensoren über das gesamte System dürften zur Auswahl dieses Messpunktes führen.

Bei genauerer Betrachtung der Shortest Path Algorithmen unterscheiden sich die gefundenen Sensorpositionen lediglich durch zwei Sensoren, HG3933 bei Shortest Path 1 und HG4576 bei Shortest Path 2. Die Positionen der Sensoren im Netz sind in Abbildung 116 und Abbildung 117 dargestellt. Zusätzlich sind die Sensoren und der jeweilige Rang, wann diese vom Algorithmus ausgewählt wurden, in Tabelle 10 zusammengefasst. Der unterschiedliche Rang resultiert daraus, dass der Algorithmus bei der Berechnung iterativ vorgeht. Das bedeutet, dass beim Shortest Path 1 Algorithmus zuerst ein Sensor auf den am weitest entfernten Hydranten HG4339b gesetzt wird und anschließend alle kürzesten Pfade aktualisiert werden. Die Gründe dafür wurden bereits in Kapitel 4.1.2.4 (Seite 41) näher erläutert. Anschließend wird der zweite Sensor auf dem am weitest entfernten Punkt vom Behälter unter Berücksichtigung des ersten Sensors gesetzt. Daher korrespondiert die Reihenfolge mit der Wichtigkeit der Sensoren oder dem Rang, welchen die Shortest Path Algorithmen den Sensorpositionen zuteilen. Für die ersten drei Sensoren unterscheidet sich der Rang nicht signifikant. Logischerweise wählen beide Algorithmen den Hydranten HG4339b an erster Stelle, da sich dieser am weitest entfernten Punkt vom Behälter befindet. Dies resultiert daraus, dass beide Algorithmen sich nur in der Weise unterscheiden, wie sie die kürzesten Wege aktualisieren. Auf Rang zwei und drei folgen bei beiden Algorithmen die Hydranten HG4150 und HG4744, jedoch in unterschiedlicher Reihenfolge. Der Unterschied ist auf Rang vier größer. Während der Shortest Path 1 Algorithmus den Hydranten HG3445 wählt, welcher beim zweiten Algorithmus auf Rang 5 gereiht wird, wählt der Shortest Path 2 Algorithmus einen Sensor an der Stelle HG4576, der beim ersten Algorithmus nicht in den ersten fünf Rängen vorkommt.

Im Gegensatz dazu setzt der Shortest Path 1 Algorithmus einen Sensor auf Rang fünf. Es sei hier erwähnt, dass eine Auflistung der Sensoren nach Wichtigkeit nur bei den Shortest Path Algorithmen getroffen werden kann, da die Sensitivitätsmatrix basierten Algorithmen einer anderen Gesetzmäßigkeit folgen. So kann es beispielsweise der Fall sein, dass das Problem gelöst mit dem Algorithmus von Casillas für fünf Sensoren keine Übereinstimmung der Sensoren mit demselben Problem für vier Sensoren liefert. Dies wird näher in (Kapelan et al., 2005) für die Fragestellung Kalibrierung und in (Steffelbauer & Fuchs-Hanusch, 2016a) für die Fragestellung Leckageeingrenzung beschrieben.

TABELLE 10: RANKING DER SENSOREN MIT DEN ZWEI SHORTEST PATH ALGORITHMEN. DIE HYDRANTEN, WELCHE NUR BEI EINEM ALGORITHMUS VORKOMMEN, SIND FARBLICH HERVORGEHOBEN

Rang/Algor.	SP1	SP2
1	HG4339b	HG4339b
2	HG4150	HG4744
3	HG4744	HG4150
4	HG3445	HG4576
5	HG3933	HG3445

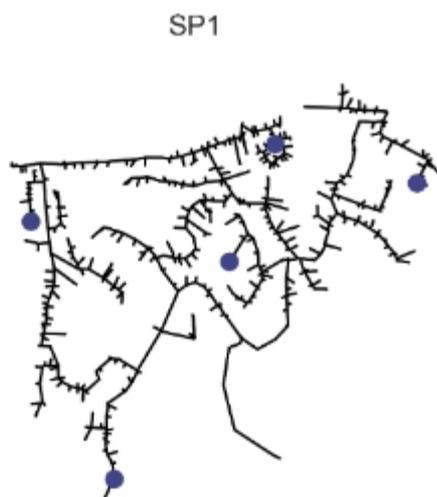


Abbildung 116: Ideale Sensorpositionen berechnet mit dem Shortest Path 1 Algorithmus

SP2



Abbildung 117: Ideale Sensorpositionen berechnet mit dem Shortest Path 2 Algorithmus

SE



Abbildung 118: Ideale Sensorpositionen berechnet mit dem Shannon-Entropie-Algorithmus

Nachfolgend werden Algorithmen, welche auf Leckage-Sensitivitätsmatrizen basieren, genauer betrachtet. Die resultierenden optimalen Sensorpositionen für die Methode nach Pérez sind in Abbildung 119, jene basierend auf der projektionsbasierten Methode nach Casillas in Abbildung 120 und die Methode, welche Verbraucherunsicherheiten miteinbezieht (SPuDU), in Abbildung 121 dargestellt. Diese drei Algorithmen haben drei Sensorpositionen, die an denselben Hydranten (HG4383, HG3933 und HG4215) berechnet werden, gemeinsam. Daraus lässt sich ableiten, dass diese drei Positionen aufgrund ihrer Sensitivität im Hinblick auf Leckagen gewählt wurden (siehe Abbildung 113). Des Weiteren haben die Berechnungen nach Casillas und SPuDU noch eine gemeinsame Sensorposition, nämlich am Hydrant HG3420. Diese Position wird zusätzlich noch vom Shannon-Entropie-Algorithmus gewählt. Daraus kann darauf geschlossen werden, dass dieser Messpunkt zwar nicht der auf Leckagen sensitivste Punkt ist, jedoch für die Eingrenzung der Leckage eine signifikante Position darstellt. Der Einfluss der unsicheren Verbraucher (siehe Abbildung 115) resultiert darin, dass sich die ideale Sensorposition von HG3835, berechnet nach Casillas ohne Berücksichtigung von Unsicherheiten, bei Berücksichtigung im SPuDU Algorithmus auf Position HG4162 ändert.

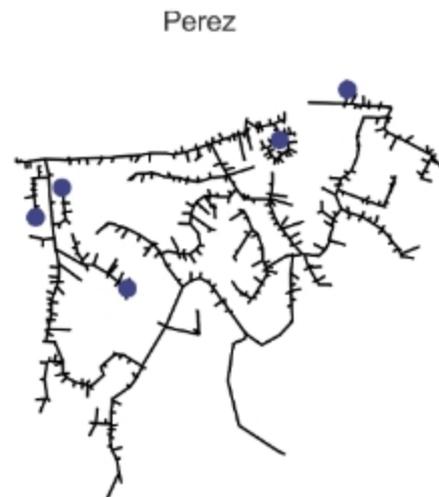


Abbildung 119: Ideale Sensorpositionen berechnet mit dem Algorithmus nach Pérez mittels Binärisierung der Sensitivitätsmatrix

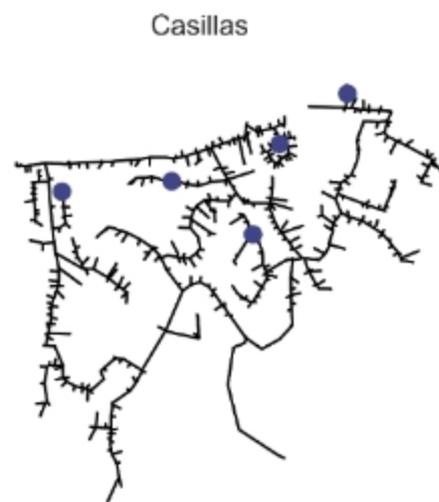


Abbildung 120: Ideale Sensorpositionen berechnet mit projektionsbasiertem Ansatz von Casillas



Abbildung 121: Ideale Sensorpositionen unter Einbeziehung von Verbraucherunsicherheiten mittels des SPuDU-Algorithmus

Im gegenständlichen Kapitel wurde erläutert, welcher ideale Sensorplatzierungsalgorithmus zu welchen unterschiedlichen Messpositionen im System führt und welcher Algorithmus aus welchem Grund entsprechende Sensorpositionen bevorzugt, beziehungsweise was die Gemeinsamkeiten der vorgestellten Algorithmen in Punkto Sensorplatzierung sind. Diese Ausführungen stellen jedoch keine Validierung der Algorithmen dar. Aus diesem Grund wurden im AZM Projekt die einzelnen Sensorplatzierungsalgorithmen unter realen Bedingungen getestet, was in Kapitel 5.1.1 (Seite 103) beschrieben ist. Eine Entscheidungshilfe, welcher Algorithmus gewählt werden sollte, kann basierend auf den Daten, welche über das zu untersuchende System vorhanden sind, gegeben werden. Liegt beispielsweise kein kalibriertes hydraulisches Modell vor, so sollte auf die Sensitivitätsmatrizen basierenden Methoden (Shannon Entropie, Pérez, Casillas und SPuDU) verzichtet werden und an ihrer Stelle auf Shortest Path Algorithmen zurückgegriffen werden, da diese nur die Topologie des Netzes berücksichtigen und keine hydraulischen Randbedingungen erfordern.

Die Topologie kann sehr einfach aus dem GIS eines WVU gewonnen werden. Mit Hilfe der so platzierten Sensoren kann die Kalibrierung eines Netzes zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt werden und die daraus neu gewonnenen Informationen können dazu verwendet werden, um Sensitivitätsmatrix basierte Ansätze, die im Allgemeinen besser zu funktionieren scheinen, im Problem der Platzierung von Sensoren zur Leckageeingrenzung zu berücksichtigen. Liegen die neuen Sensorpositionen vor, kann das Wasserversorgungsunternehmen noch immer entscheiden, ob die Sensoren entsprechend umgesetzt werden, um die Lokalisierung von Leckagen zu verbessern.

Bei sehr großen Versorgungsstrukturen sollten aufgrund der großen Rechenzeiten und des entsprechend großen Lösungsraumes entweder die möglichen Sensorpositionen aufgrund von praktischen Überlegungen reduziert werden (Sensoren an Positionen, wo eine Messung leicht realisiert werden kann), oder das Netz in hydraulisch kleinere Zonen, physisch oder durch zusätzliche Druck und Durchflusssensoren virtuell, zu teilen. Damit kann ein komplexes System in kleinere Teilsysteme partitioniert werden. Ist dies nicht möglich, so bleibt wiederum die Option, graphenbasierten Algorithmen zu verwenden, um zumindest eine gute topologische Überdeckung des Gesamtsystems mit Drucksensoren zu gewährleisten.

5.3.2.2.2 LECKAGELOKALISIERUNG

Tabelle 11 zeigt exemplarisch eine Ergebniszusammenstellung der Leckagelokalisierung für die ersten 12 Rechendurchgänge für ein Leck der Größe 0.7 l/s am Hydranten HG3880. Für die Lokalisierung mittels Lokalisierungsalgorithmus wurden Messwerte der gemäß des an der TU Graz entwickelten Sensorplacement-Algorithmus SPuDU platzierten Sensoren verwendet.

TABELLE 11: BEISPIEL ERGEBNISAUSGABE (LECK: 0.7 L/S AN HYDRANT HG3880, SENSORPOSITIONEN: SPUDU)

	Leck Position	Leckgröße gemessen [l/s]	Leck Position Ergebnis	Leckgröße Ergebnis [l/s]	Distanz zum Leck [m]	Erreichtes "Fitness value"
0	HG3880	0.69222939	HG4383	0.72	491.669137	0.243226550
1	HG3880	0.69222939	HG4383	0.72	491.669137	0.243226550
2	HG3880	0.69222939	K1_62	0.63	360.535348	0.265734575
3	HG3880	0.69222939	HG4383	0.72	491.669137	0.243226550
4	HG3880	0.69222939	HG4383	0.72	491.669137	0.243226550
5	HG3880	0.69222939	K1_97	0.63	581.382822	0.271647511
6	HG3880	0.69222939	K1_97	0.63	581.382822	0.271647511
7	HG3880	0.69222939	K1_11	0.63	301.023108	0.271647511
8	HG3880	0.69222939	HG4383	0.72	491.669137	0.243226550
9	HG3880	0.69222939	K1_62	0.63	360.535348	0.265734575
10	HG3880	0.69222939	HG4383	0.72	491.669137	0.243226550
11	HG3880	0.69222939	K1_97	0.63	581.382822	0.271647511
12	HG3880	0.69222939	HG4383	0.64	491.669137	0.244082830

Zur besseren Interpretierbarkeit wurden die Berechnungsergebnisse je Sensor Set und Leckagegröße wie folgt zusammengefasst:

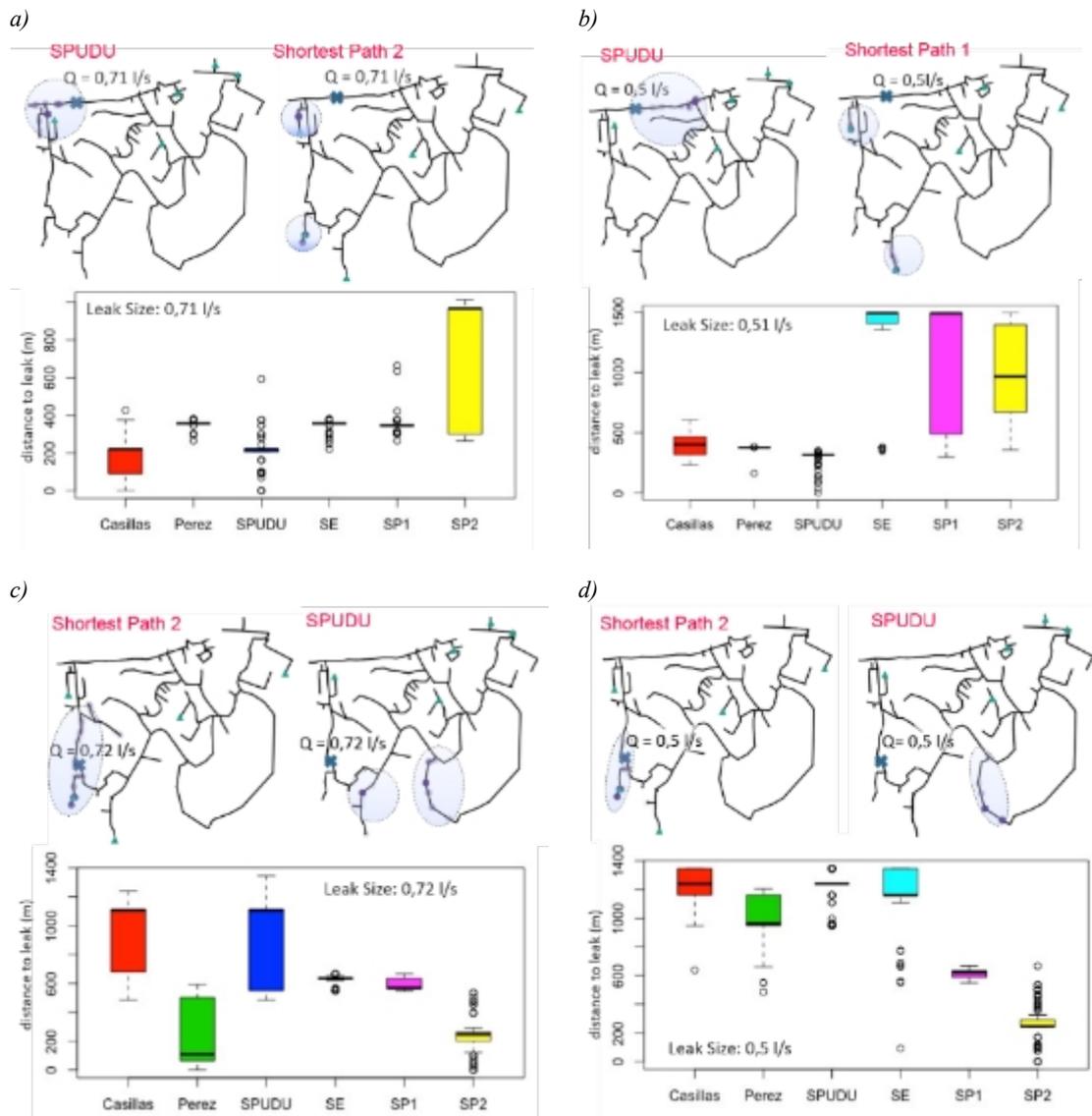


Abbildung 122: Berechnete Abstände zur tatsächlichen Leckage. Die Box-Plots illustrieren die Ergebnisse aller Simulationen für unterschiedlicher Leckagegrößen- und -positionen. Die Abbildungen a) bis d) beinhalten blaue Umrahmungen welche die Regionen darstellt, wo ein Team für die Punktortung der Leckage entsandt würde. Die blauen Kreuze in den Abbildungen a) bis d) kennzeichnen den Ort der Leckage.

Abbildung 122 zeigt zusammengefasste Ergebnisse der Leckagelocalisierung für zwei verschiedene Leckpositionen und -größen (0.5 l/s und 0.7 l/s). Die Illustrationen Abbildung 122 a) bis d) zeigen jeweils zwei Lageplots der Ergebnisse zweier unterschiedlicher Sensor Sets und einen Box-Plot. Der Box-Plot zeigt für alle 6 Sensor Sets Median, Innerquartilsbereich und Ausreißer der berechneten Distanz zur Leckage der je 100 Simulationsergebnisse. Die Netzplots zeigen die Position des Lecks, markiert durch ein blaues Kreuz und die Positionen der Berechnungsergebnisse als violette Punkte. Die Farbintensität der Punkte deutet darauf hin wie oft ein Knoten als wahrscheinlichste Leckageposition berechnet wurde. Je dunkler das Violett umso häufiger wurde der Knoten bei den Berechnungsdurchgängen gefunden. Zusätzlich sind in den Netzplots Gebiete markiert, in welchen aufgrund der Rückschlüsse aus den Berechnungsergebnissen das WVU eine Vor- und Punktortung veranlassen würde.

Abbildung 122 a) zeigt beispielsweise, dass für ein Leck mit der Größe 0.7 l/s die Leckagelocalisierung bei Verwendung der Daten von den gemäß SPuDU und Casillas gesetzten Sensoren die besten Ergebnisse liefern. Die durchschnittliche Distanz zum Leck beträgt ca. 200 m, wobei die Streuung der Ergebnisse bei SPuDU geringer ist. Die mittlere Distanz zum Leck bei Verwendung der Messungen aller anderen Sensor

ERGEBNISSE

Sets betrug außer für Shortest Path 2 ca. 500 m. Der Lageplot zu den auf Basis der Messungen des Sensor Sets Shortest Path 2 erzielten Ergebnisse, zeigt zwei unterschiedliche Regionen als mögliche Leckagegebiete. Eine Lecksuche würde sich hier deutlich zeitaufwändiger gestalten. Nur eine der Regionen befindet sich in der Nähe des tatsächlichen Lecks.

Abbildung 122 b) zeigt dass für ein Leck mit 0.51 l/s die Ergebnisse basierend auf SPuDU, Casillas and Perez Daten annähernd gleich sind, mit mittleren gefundenen Distanzen von ca. 450 m zum Leck. Aus dem Lageplot ist erkennbar, dass bei Verwendung der Daten der SPuDU Sensoren auch direkte Treffer des Lecks erzielt wurden. Der Lageplot basierend auf den Shortest Path 1 Ergebnissen zeigt exemplarisch die annähernd gleichen Ergebnisse der drei Sensor Sets Shortest Path 1 (SP1), Shannon Entropie (SE) und Shortest Path 2 (SP2). Alle drei Ergebnisse hatten Treffer in zwei oder mehr unterschiedlichen Regionen des Netzes, wodurch eine gezielte Vor- und Punktortung nicht erleichtert wird.

Abbildung 122 c) und d) zeigen die Ergebnisse für eine weitere Leckageposition und Leckgrößen von 0.7 l/s sowie 0.5 l/s. An dieser Position führen die Berechnungen auf Basis der Daten der Sensor Sets Casillas, Perez, SE und SPuDU zu keinen zufriedenstellenden Ergebnissen. Insbesondere das Leck mit 0.5 l/s kann durch Nutzung der SPuDU Messdaten nicht lokalisiert werden. Als wahrscheinlichste Positionen werden Knoten im Netzzulauf berechnet. Dies deutet darauf hin, dass die Minimierung der Diskrepanz zwischen den Messungen in den fünf Punkten im Netz und den berechneten Drücken in diesen Punkten dann erreicht wird, wenn der Verbrauch im Zulauf erhöht wird und somit der Druck im gesamten Netz gedämpft wird.

6 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

AN DIESER STELLE wird zusammenfassend auf die im Projekt erzielten Ergebnisse eingegangen. Die aus den Projektergebnissen resultierenden Erkenntnisse werden vorgestellt und diskutiert. Zusätzlich werden in diesem Kapitel die aus den Ergebnissen resultierenden Schlussfolgerungen beschrieben und es wird auf offen gebliebene Fragestellungen eingegangen.

Die entwickelte Methode zur Leckageeingrenzung wurde neben hydraulischen Simulationen auch im experimentellen Trinkwasserversorgungssystem der TU Graz und abschließend an einem realen Teilsystem getestet. Jeder Schritt für sich trug wesentlich zur Entwicklung der vorgestellten Methode zur Leckageeingrenzung bei.

6.1 METHODIK MODELLBASIERTE LECKAGEEINGRENZUNG UND SENSORPLACEMENT

Die modellbasierte Leckageeingrenzung kann als ein Optimierungsproblem formuliert werden (siehe Kapitel 4.1.1, Seite 35).

In Kapitel 5.1.3 (siehe Seite 111) wurde durch Darstellen der Fitnesslandschaft des Problems gezeigt, dass dieses Optimierungsproblem viele lokale Minima besitzt. Diese Struktur der Fitnesslandschaft tritt schon bei kleinen Systemen mit einer relativ großen Anzahl von Sensoren auf (siehe Kapitel 5.1.3, Seite 111). Eine Verringerung der Sensoranzahl führt zur Erhöhung der Anzahl lokaler Minima.

Global optimale Lösungen können in einem solchen Fall nur mittels metaheuristischer Algorithmen gefunden werden. Gradientenbasierte Verfahren scheitern, da sie in lokalen Minima stecken bleiben.

Um das Problem der modellbasierten Leckageeingrenzung zu lösen, wurde der Differential Evolution Algorithmus (Storn & Price, 1997) aufgrund seiner guten Konvergenzeigenschaften ausgewählt.

Die Funktionsweise des Algorithmus wurden Simulationen im hydraulische Modellnetz Hart bei Graz geprüft (siehe Kapitel 5.1.2, Seite 109). Hierzu wurden die gleichen Sensorpositionen in der Simulation ausgewählt, wie sie später auch im Feldversuch verwendet wurden. Anhand einer Leckage von rund 1 l/s an einem Hydranten, an dem auch im Feldversuch eine ähnliche Leckagegröße unter realen Bedingungen erzeugt wurde, wurde gezeigt, dass die Methode in der Simulation funktioniert. Die Leckage konnte mit fünf Sensoren auf ein sehr kleines Gebiet eingegrenzt werden. 50 % der Simulationen lieferten Ergebnisse, die sich in unmittelbarer Nähe der Leckage befanden.

Die Form der Fitnesslandschaft hat wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse der modellgestützten Leckageeingrenzung. So beeinflusst die Form sowohl die Konvergenzgeschwindigkeit des Algorithmus, als auch die Güte des Endergebnisses. Ist die Fitnesslandschaft glatter und besitzt weniger lokale Minima, so ist es für den Algorithmus einfacher, das globale Optimum zu finden. In den Kapiteln 5.1.4 und 5.1.5 (siehe Seite 115 und 117) wurde gezeigt, dass die verwendete Metrik, in der die Fitnessfunktion formuliert wird, als auch die Ordnung des Parameterraumes die Form der Fitnesslandschaft wesentlich beeinflusst. Dies hat Auswirkungen auf die Konvergenzgeschwindigkeit als auch die Qualität des Endergebnisses. Eine Formulierung der Fitnessfunktion in der Kosinusmetrik bei gleichzeitiger Ordnung der L_p -Achse mit Hilfe des Cuthill-McKee-Algorithmus zeigte die beste Performance.

Beim Problem der optimalen Sensorplatzierung ist der Lösungsraum aufgrund der möglichen Kombinationen von Sensoren an allen möglichen Messpunkten sehr groß. Es ist empfehlenswert, den Lösungsraum durch Bekanntgabe von Positionen, an denen Sensoren installiert werden können (z.B. an Hydranten), einzuschränken. Für das Netz Hart bei Graz wurden sechs verschiedene Algorithmen zur idealen Platzierung von Sensoren an den 35 Hydranten im System angewandt, fünf aus der Literatur und ein von der TU Graz im Zuge des AZM Projektes entwickelter Algorithmus. Bei dem von der TU Graz entwickelten Algorithmus SPuDU handelt es sich um eine Weiterentwicklung des Algorithmus von Casillas, der das Einbeziehen von Unsicherheiten erlaubt. Es kann vorkommen, dass mögliche Messpositionen, die empfindlich auf Leckagen reagieren, auch Positionen sind, an denen Unsicherheiten im Verbrauch große Auswirkung hinsichtlich der aus diesen Unsicherheiten resultierenden Druckbandbreiten aufweisen. Deshalb sind diese Messpositionen weniger ideal, um Sensoren zu positionieren. Diese Effekte werden im SPuDU Algorithmus berücksichtigt. Dadurch werden Sensoren an im Hinblick auf Unsicherheiten robusten Messpositionen priorisiert.

Die sechs getesteten Sensorplatzierungsalgorithmen basieren auf unterschiedlichen mathematischen Prinzipien. Graphentheoretische Algorithmen (Shortest Path 1 und 2) sorgen für eine weite Aufteilung der Sensoren über das ganze Netz, während sensitivitätsbasierte Algorithmen Positionen bevorzugen, die am sensitivsten auf Leckagen reagieren.

Genauere Untersuchungen, die die Auswirkung von Verbraucherunsicherheiten auf die idealen Sensorpositionen im SPuDU Algorithmus betrachten, sind in Kapitel 5.1.1 (siehe Seite 103) zu finden. Es konnte abgeleitet werden, dass die Qualität des Sensorplacements in Abhängigkeit der Anzahl der Sensoren einem Potenzgesetz gehorcht. Diese Funktion kann als Kosten-Nutzen-Funktion interpretiert werden und ermöglicht eine Abschätzung, wie viele Sensoren in einem Netz platziert werden müssen, um einen gewünschten Prozentsatz der im Netz möglichen Leckagen eingrenzen zu können. Die Form dieser Funktion ändert sich nicht bei Einbeziehung von Unsicherheiten, allerdings werden mehr Sensoren als im unsicherheitsfreien Fall benötigt. Zusätzlich wurde gezeigt, dass ein Placement für $N+1$ Sensoren nicht das ideale Placement für N Sensoren beinhaltet. Dies hat zur Konsequenz, dass der optimale Sensorplatzierungsalgorithmus für jede Anzahl N von Sensoren gesondert aufgerufen werden muss.

6.2 LABORMODELL

Das Labormodell in der in diesem Abschlussbericht vorgestellte Konfiguration (siehe Kapitel 4.2, Seite 61) ermöglichte die Evaluierung der entwickelten Methode. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Methode der modellgestützten Leckageeingrenzung in den im Labor untersuchten Anwendungsbeispielen funktioniert.

Die Errichtung des Labormodells bis hin zur im Detail erläuterten Konfiguration (siehe Kapitel 4.2, Seite 61) umfasste zahlreiche Teilschritte und es galt hinsichtlich der Realisierung des Netzes, der Steuerung sowie der Datenübertragung und -verarbeitung adäquate Lösungen zu erarbeiten. Neben der konstruktiven Ausbildung der Knoten und Verbindungen stellte die Anschaffung von geeigneten Sensoren und Datenloggern eine Herausforderung dar.

Zum Zwecke der modellbasierten Leckageeingrenzung im Labormodell mussten Lösungen für die Anbringung der Sensoren im physischen Netz, deren Stromversorgung und die Datenübertragung erarbeitet werden. Zudem galt es Schnittstellen und die Art der Übertragung so zu wählen, dass diese für die im Projekt geforderten Ziele geeignet sind.

Um das Verbrauchsverhalten an verschiedenen Netzknoten zu simulieren wurden Kugelventile, Magnetventile (zum Ein und Abschalten des Verbrauches) und vorgeschaltete Durchflussmessgerät, wie in Kapitel 4.2.4 (Seite 75) im Detail beschrieben, installiert. Mit dieser Konfiguration kann auch die Simulation des Verbrauches als druckunabhängig, wie in der Computersimulation mittels hydraulischer

Simulationssoftware Epanet vereinfachend angenommen wird, umgesetzt werden. Die Druckabhängigkeit der im Labormodell simulierten Leckagen kann ebenfalls abgebildet und interpretiert werden.

Die Leckagen werden bislang als Loch einer bestimmten Größe eingebaut. Die Bauart des Labormodells ermöglicht für weiterführende Untersuchungen, z.B. des Druck-Wasseraustritts Zusammenhanges bei elastischen Rohrwerkstoffen, defekte Rohrabschnitte einzubauen.

Im Zuge der kontinuierlichen Weiterentwicklung des Labormodells konnten einige Fragestellungen, wie beispielsweise die geeignetste Form der Datenübertragung für das Labormodell, beantwortet werden. Die kabelgebundene Übertragung der Sensorsignale als Spannungssignal erfüllt im Falle des Labormodells die geforderten Zwecke. Diese Form der Datenübertragung ist in realen Netzen kaum umsetzbar, da eine Verkabelung aller Messstellen aus Kostengründen oft nicht realisierbar ist. In realen Netzen ist eine drahtlose Datenübertragung zweckmäßig, wobei hier insbesondere bei einer Installation der Sensoren in Stahlbetonkellern bzw. in Schächten und Kammern im Sinne einer robusten Signalübertragung eine geeignete Frequenz gewählt werden muss.

Im Labormodell wurde unter anderem auch die erforderliche Auflösung der Daten zum Zweck der modellgestützten Leckageeingrenzung untersucht. Dabei wurden folgende Erkenntnisse gewonnen:

1. Aggregierte Sekundenmittelwerte reichen für die Leckageeingrenzung im Labor aus. Die Sensorsignale bzw. Messwerte werden für die Dauer eines Schaltzustandes in Sekundenauflösung aufgezeichnet und als Mittelwert über die Dauer des Zustandes für die Leckageeingrenzung im Labor herangezogen.

Aufgrund der Tatsache, dass im hydraulischen Modell stationäre Simulationen, d.h. jeder Simulationszeitschritt für sich betrachtet wird, reicht diese Form der Messwerterhebung aus. Im Detail bedeutet das, dass die Datenauflösung der durchgeführten Experimente eine Sekunde betrug. Während eines hydraulischen Zustandes bzw. einer Schaltkonfiguration des Verbrauches (bzw. einer Leckage, siehe Kapitel 4.2.6.2, Seite 84) wurden jede Sekunde Messwerte der Sensoren an die Datenverarbeitung übergeben. Die Zeitdifferenz zwischen den einzelnen hydraulischen Zuständen (Schaltvorgängen) wurde mit 15 Sekunden festgelegt. Während dieser 15 Sekunden wurde jede Sekunde ein Messwert der Sensoren erhoben. Diese 15 Messwerte wurden in weiterer Folge gemittelt und für die Leckageeingrenzung verwendet. Diese Vorgehensweise kann mit realen Bedingungen bei der modellbasierten Leckageeingrenzung verglichen werden. Beispielsweise wurden die Druckmessungen im Pilotversuch in Hart bei Graz als Stundenmittelwerte aus minütlichen Messungen im Leckagelokalisierungsalgorithmus herangezogen und mit der Simulation der Druckverhältnisse bei durchschnittlichem stündlichen Nachtmindestverbrauch verglichen.

2. Die installierten Sensoren erfüllen hinsichtlich Messgenauigkeit und Messbereich die Anforderungen für die entwickelte Methode der modellgestützten Leckageeingrenzung.

Für die im Labor herrschenden Randbedingungen können für die untersuchten Szenarien und basierend auf den dabei durchgeführten Messungen Leckagen modellbasiert eingegrenzt werden (siehe Kapitel 5.2, Seite 120). Im Gegensatz zu realen Netzen kann im Labormodell eine hohe Anzahl hydraulischer Parameter bis hin zu den Kundenverbräuchen gemessen werden, wodurch die Leckageeingrenzung auf den direkt betroffenen Abschnitt möglich ist. Die konnte im Feldversuch bei den untersuchten Leckagegrößen nicht erreicht werden.

Im Ausbauzustand zum Zeitpunkt des Projektabschlusses ermöglicht das Labormodell die Simulation von Verbrauchsvorgängen und gleichzeitig auftretenden Leckagen. Durch die im Labormodell implementierte Steuerungsmöglichkeit der Verbräuche können beliebige Verbrauchssituationen bei gleichzeitigem

Auftreten von Leckagen im System simuliert werden. Die installierten Druck- und Durchflussmessungen erlauben die messtechnische Erfassung der hydraulischen Vorgänge in Trinkwassernetzen in höherer Auflösung als in realen Trinkwassernetzen. Das Labormodell stellt daher im Gegensatz zu realen Systemen ein aus hydraulischer Sicht hochbestimmtes System dar. Dieser Umstand ermöglicht weiterführende Betrachtungen hinsichtlich Detektionsschwelle von Leckagen oder im Hinblick auf den Einfluss unsicherer Verbrauchsannahmen auf die Anwendbarkeit der Methode.

3. Das im Projekt entwickelte experimentelle Trinkwasserverteilnetz bietet eine einzigartige Möglichkeit, Leckagedetektions- und Lokalisierungsmethoden und deren Weiterentwicklungen kostengünstig zu untersuchen.

Abschließend gilt es festzuhalten, dass das Labormodell EWDS-TUG weltweit eine einzigartige Versuchsanordnung darstellt und die Bearbeitung weiterer Fragestellungen hinsichtlich Detektionsschwelle, Berücksichtigung des Einflusses unsicherer Verbrauchsannahmen sowie das Verhalten realer Leckagen unter in Österreich typischen Druckbedingungen erlaubt. Die Form der Datenübertragung und Aufbereitung ermöglicht die Nutzung des Labormodells als Benchmarkverteilstück zur Evaluierung verschiedener Methoden der z.B. modellgestützten Leckageeingrenzung oder Methoden für die automatisierte Modellkalibrierung (Günther et al., 2016).

Die Ableitung möglicher Skalierungsfaktoren auf Basis der im Labor generierten Daten für reale Netze zur Abschätzung von zu erwartenden Druckänderungen infolge Leckagen sowie die für reale Netze notwendige Messdatenauflösung zur erfolgreichen modellgestützten Leckageeingrenzung stellen zukünftige Forschungsfragen dar.

6.3 FELDVERSUCHE

In diesem Kapitel wird zum einen auf die Erkenntnisse bei der Durchführung von Messkampagnen zur Modellkalibrierung sowie zur Simulation von Leckagen und zum anderen auf Anforderungen an die permanente Installation von Druckmessungen in Trinkwassernetzen eingegangen. Darüber hinaus werden Schlussfolgerungen im Hinblick auf die Anwendbarkeit der Methode der modellbasierten Leckagelokalisierung in realen Trinkwassernetzen gezogen.

6.3.1 TEMPORÄRE MESSUNGEN UND WASSERENTNAHMEN ZUR KALIBRIERUNG VON HYDRAULISCHEN MODELLEN UND ZUR LECKAGESIMULATION –

Bei der Abbildung von Trinkwassernetzen in einem hydraulischen Modell sind Vereinfachungen zu treffen. Das reale System lässt sich nicht 1:1 in einer Computersimulation abbilden. Bei der Erstellung vereinfachter hydraulischer Modelle ist mit unterschiedlichen Fehlerquellen zu rechnen. Mögliche Fehlerquellen sind Fehler bei den Eingabedaten wie Lage- und Höhenmessfehler oder falsche bzw. unbekannte Innendurchmesser, Fehler aufgrund ungenauer Verbrauchskennnisse oder Fehler beim Abschätzen von Rohrrauigkeiten. Manche dieser Fehler können durch genaue Erhebung der Eingabedaten reduziert werden, viele der Fehler können allerdings nur durch Messungen und darauf aufbauende Modellkalibrierungen minimiert werden.

Grundsätzlich sollte die möglichst realitätsnahe, natürlich aber vereinfachte Abbildung der physikalischen Komponenten im Modell von Anfang an verfolgt werden. Werden hydraulische Modelle aus Geodaten, die zuvor eingemessen wurden, generiert so ist üblicherweise von einer fundierten Basis im Hinblick auf Lage und Höhengenaugigkeit der Netzknoten auszugehen.

Die Grundlage der Kalibrierung des im Feldversuch verwendeten hydraulischen Modells bildeten Druck- und Durchflussmessungen an geeigneten Positionen im Netz sowie Entnahmen von größeren Wassermengen

an Hydranten (siehe Kapitel 4.3.2 Seite 94 und Kapitel 5.3.2.1 Seite 135). Bei der Auswahl der Wasserentnahmestellen wurde darauf geachtet werden, dass das entnommene Trinkwasser kontrolliert abgeleitet werden kann, ohne angrenzende Einfahrten, Grundstücke oder sonstige im Besitz von Anrainern befindliche Gegenstände zu fluten. Bereits im Vorfeld der Kalibrierungsmessung wurden die unmittelbar angrenzenden Anrainer darüber informiert, dass Messungen geplant sind, die möglicherweise auch eine Lärmbelästigung darstellen können, da das Trinkwasser in der Regel frei aus dem Stutzen des Hydrantenprüfgerätes ausläuft. Zudem wurde auf eine entsprechende Absicherung der an den Messungen beteiligten Personen geachtet. Im Zuge solcher Messkampagnen kann es schnell zu unvorhersehbaren, unangenehmen und sogar gefährlichen Situationen kommen. Hier sei beispielsweise auf zeitungszustellende Personen verwiesen, die die oft abgelegenen Straßen sehr genau kennen und vor allem nicht zu diesen Stunden mit Hindernissen auf der Straße rechnen. Generell ist der intensive Kontakt zu den Anrainern bzw. betroffenen Parteien sehr wichtig, da die Unterstützung der Bevölkerung nicht nur zur besseren Akzeptanz der für das Messprogramm notwendigen Tätigkeiten führt, sondern auch das Bewusstsein für das Thema Trinkwasser und dessen zugehörige Infrastruktur in der Bevölkerung fördert. Bei zu geringer Öffentlichkeitsarbeit kann es unter Umständen dazu kommen, dass die Anrainer gänzlich andere Tätigkeiten vermuten und die Polizei verständigen.

Feldversuche bzw. Messkampagnen stellen einen hohen personellen und finanziellen Aufwand dar. Eine entsprechende Schulung der Personen, welche die Messgeräte bedienen, ist daher außerordentlich wichtig. Eine nicht ordnungsgemäße Durchführung bzw. falsche Bedienung beim Auslesen oder Fehler bei der Programmierung der Sensoren führen unter Umständen dazu, dass Daten verloren gehen, gar nicht erst gemessen oder in einem falschen, nicht verwertbaren Format abgespeichert werden. Werden Sensoren ohne Datenfernübertragung, so wie in Hart bei Graz, zum Zweck der Langzeitbeobachtung im hydraulischen System belassen, wird frühestens zum Zeitpunkt der nächsten Datenauslesung (z.B. alle 14 Tage) ersichtlich, dass ein Sensor falsch konfiguriert wurde oder erst gar nicht aufgezeichnet hat.

6.3.1 PERMANENTE INSTALLATION VON DRUCKSENSOREN MIT ONLINE-DATENÜBERTRAGUNG

Im Feldversuch Wien Zone Blau IV wurde neben der temporären Installation von Druckmessgeräten an Hydranten auch die Möglichkeit der permanenten Installation von Druckmessgeräten im Hausanschlussbereich getestet (siehe Kapitel 4.3.1 Seite 92 und Kapitel 5.3.1 Seite 124).

Insgesamt wurden fünf Drucksensoren im Hausanschlussbereich eingebaut. Diese verfügen sowohl über eine Online-Datenübertragung als auch über eine Stromversorgung. Die Installation der Sensoren erforderte insbesondere im Hinblick auf Abstimmungen mit den Hauseigentümern gründliche Vorbereitungen und konnte erst zu Ende der Projektlaufzeit realisiert werden. Ein durchgehender Messbetrieb an den permanent an Hausanschlussleitungen installierten Sensoren besteht seit dem 21. Juli 2016. Dieser Messbetrieb funktioniert bis heute nahezu problemlos, was für die permanente Installation von Drucksensoren spricht.

Diese Messdaten, obwohl noch nicht intensiv verwendet, bilden für die Wissenschaft ein großes Potential, da unseres Wissens nach bisher keine derart hoch aufgelösten Druckdaten über einen solch langen Zeitdauer in einem realen TVN existieren. Diese können beispielsweise im Hinblick auf eine mögliche Nutzung solcher Messungen zur quasi Echtzeitleckage- bzw. Rohrbruchfrüherkennung analysiert werden. Ein weiterer Betrieb der Messstationen und weitere Versuche im Hinblick auf die Simulation von Leckagen an Hydranten im Netz Zone Blau IV sollten daher angestrebt werden.

6.3.2 ANWENDBARKEIT MODELLBASIERTE LECKAGELOKALISIERUNG

Das für die modellbasierte Leckagelokalisierung im Feldversuch verwendete hydraulische Modell wurde anhand von Langzeitdruckmessungen (mehrere Wochen) und mittels Starklastentnahmen aus Hydranten in

einer Nachtmesskampagne kalibriert. Die erfolgreiche Anwendung der Methode zur frühzeitigen Leckagedetektion und -lokalisierung steht in engem Zusammenhang mit der Qualität des verwendeten hydraulischen Modells. Die Kalibrierung des hydraulischen Modells – speziell in großen, komplexen Netzen – kann zum limitierenden Faktor werden. Des Weiteren sind in Netzen großer WVU mehrere Betriebszustände im Regelbetrieb möglich. Die idealen Sensorpositionen können nur jeweils für einen bestimmten Betriebszustand abgeleitet werden. Bei einer kontinuierlichen Nutzung der vorgestellten Methode im praktischen Betrieb des Versorgungssystems ist dies zu berücksichtigen.

Die vorgestellte Methode eignet sich für kleine Versorgungssysteme sowie für hydraulisch abgegrenzte Teilbereiche großer Netze, für welche alle Zu- und Abflüsse und Drücke messtechnisch erfasst werden. Sind mehrere Betriebszustände im System möglich, ist ein maßgeblicher Betriebszustand zu definieren auf welchen die Methode angewandt wird. Eine Anwendung in sehr großen Teilnetzen (> 50km Netzlänge) erfordert je nach Netztopographie zusätzliche Durchflussmessungen, die eine Voreingrenzung auf Teile des untersuchten Netzes erlauben. Für die weitere Lokalisierung auf wenige hundert Meter zur Unterstützung der Punktortung sind aus Kostengründen sowie aus Gründen der Eingrenzungsmöglichkeit allerdings nur Druckmessungen zweckmäßig. Diese können im Hausanschlussbereich relativ einfach auch permanent installiert werden, wobei hingegen Durchflussmessungen im System nur schwer zu realisieren sind.

Hinsichtlich des Einbaus von Drucksensoren im Netz kann die Konfiguration wie sie in der Pilotregion Zone Blau IV in Wien umgesetzt wurde, als umsetzbare Variante genannt werden (siehe dazu Kapitel 5.3.1 Seite 124). Der Einbau an Hausanschlüssen bietet neben der in den meisten Fällen vorhandenen Stromversorgung noch zusätzlichen Nutzen, beispielsweise kann auf Basis der erhaltenen Daten die hydraulische Situation des Versorgungssystems im Betrieb näher analysiert werden. Die Weiterführung der in Wien Blau IV installierten Drucksensoren im Hausanschlussbereich ist aus Sicht der Autoren in jedem Fall anzustreben. Dadurch kann die langfristige Ausfallsicherheit, die Qualität der Daten und deren Übertragung getestet werden. In zukünftigen Forschungsvorhaben kann beispielsweise die Nutzung dieser Daten zur Leckagefrüherkennung in Echtzeit untersucht werden und dafür nutzbaren Algorithmen getestet und entwickelt werden. Allerdings ist vor dem Einbau eine Abstimmung mit den Kunden erforderlich, dies sollte auch in den Überlegungen zum idealen Sensorplacement berücksichtigt werden. Die Erfolgsquote, wie viele Kunden einem Einbau von Sensoren positiv gegenüberstehen, könnte mit monetären Vergünstigungen erhöht werden. Eine weitere Möglichkeit, die Bereitschaft zur Sensorinstallation im Hausanschlussbereich zu vereinfachen, stellt der Einsatz von Energy Harvesting Systemen dar. Bei solchen Systemen wird Energie z.B. durch Miniturbinen aus dem durch die Leitungen fließenden Wasser gewonnen. Ob und unter welchen Bedingungen der Sensor mit der dabei gewonnen Energie betrieben werden kann ist noch zu untersuchen. Des Weiteren sind hier natürlich entsprechende Druckverluste die natürlich die Konsequenz. Wodurch solche Systeme nur in Bereichen, in denen ansonsten Druckminderventile erforderlich wären zweckmäßig sind. Die Frage, ob Messung und Datenübertragung durch die mittels Energy Harvesting zu verbrauchsstarken Zeiten geladenen Batterien möglich sind, ist derzeit noch Gegenstand der Forschung. Wie eine hohe Effizienz bei Datentransfer und Energieverbrauch erreicht werden kann (z.B. durch Implementierung von neuen Datenübertragungsstandards wie LoRaWan), ist im Moment Gegenstand eines Forschungsprojektes am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau zusammen mit dem Institut für Technische Informatik der TU Graz.

Die Anwendung der im Projekt AZM entwickelten Methode zur Leckageeingrenzung im Feldversuch zeigte deutlich, dass es möglich ist, Lecks auf Basis von Druck- und Durchflussmessungen zu identifizieren und auf einen kleinen Teilbereich einzugrenzen. Im Feldversuch konnten Leckagen der Größenordnung von 0.5 l/s bis 1 l/s auf wenige hundert Meter Netzlänge eingegrenzt werden (siehe Kapitel 5.3.2 Seite 134). Weiterführende Untersuchungen bezüglich der lokalisierbaren Größenordnungen von Leckagen in Abhängigkeit der Netzgröße, Netztopologie und Netzstruktur sind allerdings noch erforderlich und zählen zu weiteren offenen Forschungsfragen. Zusätzlicher Forschungsbedarf besteht zudem in der näheren

Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Netzeinspeisung, Nachtminstdurchfluss, Drucksituation und detektierbarer und lokalisierbarer Größe von Leckagen im Versorgungssystem.

Im Hinblick auf die Implementierung der entwickelten Methode im Betrieb von Wasserversorgungsunternehmen gilt es Lösungen zu finden, welche Prozessabläufe abbilden und automatisiert Aufgaben, basierend auf die erhaltenen Messdaten, durchführen können. Ein Prototyp für eine komplett automatisierte Leckageeingrenzungssoftware könnte folgendermaßen aussehen:

Die Messdaten werden automatisch in eine Zeitseriendatenbank übertragen und konvertiert, anschließend werden die Daten validiert. Wenn die Messdaten Auffälligkeiten zeigen, wie sie bei Auftreten einer Leckage vorkommen (Zufluss ins System steigt, Druck sinkt ab), wird automatisch der Eingrenzungsalgorithmus ausgeführt. Die Ergebnisse werden dann automatisch per Mail an den Hauptverantwortlichen geschickt, der wiederum umgehend ein Leckortungsteam ins Feld schickt, um die Leckage punktgenau zu orten. Die Leckortung muss dabei nicht im gesamten durchflussüberwachten Teilnetz erfolgen, sondern kann bereits in jenem Bereich starten, an dem der Algorithmus die Leckage vermutet. Nach dem Finden der exakten Leckageposition können weitere Maßnahmen ergriffen werden (Schließen von Schiebern, Anleiten von Reparaturmaßnahmen, etc.).

6.4 ÖKOLOGISCHER UND VOLKSWIRTSCHAFTLICHER NUTZEN DES AKTIVEN ZUSTANDSMONITORINGS VON TRINKWASSERNETZEN

Der technologische Fortschritt im Hinblick auf Messtechnik und Datenübertragung – Stichwort Wasser 4.0 – ermöglicht den WVU in Österreich neue Wege zur nachhaltigen Bewirtschaftung der Ressource Wasser.

Die Methode der modellgestützten Leckageeingrenzung als innovatives Werkzeug zur Verkürzung der Eingriffszeit bei Leckagen in der Trinkwasserversorgung bringt aus ökologischer Sicht viele positive Aspekte mit sich. Zum einen führt die schnellere Eingriffszeit zu einer signifikanten Verringerung der Leckagemenge und zum anderen zur Reduktion von potentiellen Beschädigungen an angrenzender Infrastruktur. Dies hat zur Folge, dass die Ressource Wasser geschützt wird und finanzielle Mittel eingespart werden.

Die Reduktion von Wasserverlusten führt zu geringeren Pump- und Aufbereitungskosten und verringert dadurch auch den Ausstoß an Treibhausgasen (CO₂-Emissionen). Die Senkung der Wasserverluste bringt zudem den positiven Effekt zusätzlicher Kapazitäten im Versorgungssystem mit sich. Zusätzliche volkswirtschaftliche und ökologische Kosten, die durch Bauarbeiten am Leitungssystem infolge von Rohrbrüchen und den damit einhergehenden Verkehrsbehinderungen, den Stauzeiten und dem zusätzlichen CO₂-Ausstoß, entstehen, werden ebenfalls verringert.

Bereits die Installation von Messtechnik mit Fernübertragung stellt für WVU jeder Größe einen hohen Informationsgewinn dar. Das Wissen über das System, speziell im Hinblick auf die Systemeinspeisung und die Variabilität dieser lässt bessere Rückschlüsse auf Fehler im Versorgungssystem zu. Die permanenten Messungen hydraulischer Parameter im Versorgungssystem öffnen auch die Möglichkeit, das System hinsichtlich Energieverbrauch zu optimieren. Erfolgt beispielsweise die Versorgung aus Brunnen und Pumpen, kann die Pumpdauer und die damit verbundenen Kosten effizient an die Verbrauchssituation des WVU angepasst werden.

6.4.1 UMSETZUNGSMÖGLICHKEITEN DER METHODE IN ÖSTERREICHISCHEN WVU

Die Ergebnisse aus dem gegenständlichen Forschungsprojekt haben in Computersimulation, im Laborversuch und letztendlich im Feldversuch gezeigt, dass es möglich ist, durch die Nutzung heuristischer Optimierungsalgorithmen auf Basis von nur wenigen Druck- und Durchflussmessungen und hydraulischen

Modellen Leckagen auf wenige hundert Meter einzugrenzen. Die Implementierung in komplexen, hydraulisch kaum untergliederten Trinkwassernetzen bedarf noch weiterer Untersuchungen. Dort können sich die hydraulischen Rahmenbedingungen sehr komplex gestalten, da Betriebszustände verhältnismäßig oft geändert werden. Die Anwendung der Sensorplatzierungsmethode auf das gesamte Netz der Stadt Linz, welches noch kaum in Messzonen unterteilt wurde und zahlreiche unterschiedliche Betriebszustände aufweist ist derzeit in Umsetzung.

Es ist davon auszugehen, dass die Implementierung der vorgestellten Methode für WVU aller Versorgungsstrukturen von großem Interesse ist. Insbesondere mittelgroße Netze bzw. Teilnetze mit 20 bis 50 km Netzlänge und eindeutiger Zu- und Abflusssituation erscheinen aus aktueller Sicht als besonders geeignet für die Anwendung der Methode. Der Grund liegt darin, dass diese Netze bereits zu groß sind um rasch und effizient im Anschluss und das Erkennen neuer Leckagen aus der Nachteinspeisemessung eine Leckageeingrenzung nach Stand der Technik (z.B.: durch Abschiebern, Akustische Leckortung, Geräuschlogger...) vorzunehmen. Zudem ist bei diesen Netzgrößen und der daraus resultierenden Größenordnung der Nachteinspeisemenge bereits fraglich, ob ein rasches Erkennen von Leckagen durch reine Interpretation der Nachteinspeisemenge möglich ist.

Die Kosten für die Implementierung einer modellgestützten Leckageeingrenzung können an dieser Stelle nur abgeschätzt werden. Als Beispiel wird ein Trinkwasserversorgungssystem mit einer Gesamtlänge von ca. 20 km herangezogen. Die Anzahl der versorgten Kunden beläuft sich auf ca. 2.000 Einwohner. Die Versorgung erfolgt über Quellwasser und einen Hochbehälter die bislang noch nicht mit zentraler Fernwirktechnik ausgestattet sind.

Die Kosten für die Einbindung der Sensoren in eine zentrale Leittechnik, welche neben einfachen Visualisierungsaufgaben auch eine Regelung einzelner Anlagenteile ermöglicht, kann für diesen Beispielversorger mit 16.000 bis 20.000 Euro beziffert werden. Die Kosten umfassen die Einbindung folgender Sensoren

- Neue Durchflussmessung am Einspeisepunkt
- Einbindung bestehender Sensoren
 - Behälterstand (Drucksensor)
 - UV-Anlage, pH-Wert
 - Stromverbrauch UV-Aufbereitung
- Einbindung von 5 Drucksensoren an geeigneten Positionen (Hausanschlüssen)
- Zutrittskontrolle und Objektschutz

Die Kosten für die Anschaffung der Sensoreinbindung sowie der Datenübertragung müssen als langfristige Investition in die Infrastruktur des WVU gesehen werden. Die laufenden Kosten der Datenübertragung und die Miete einer externen Server-Infrastruktur zur Datensicherung und Verwaltung stellen einen untergeordneten Kostenfaktor dar. Je nach Anbieter für die Datenübertragung und IT-Infrastrukturnutzung kann mit rund 300 € im Jahr, speziell für dieses Fallbeispiel, gerechnet werden.

Durch eine Vermeidung von Rohrbrüchen mit erhöhtem Schadensausmaß infolge der Früherkennung durch die eingebaute Messtechnik ist auch in Netzen ohne Pumpefordernisse wie in dem oben genannten mit einer langfristigen Einsparung zu rechnen. Diese ergibt sich aus einer potenziellen Einsparung bei den

Schadensreparaturkosten sowie aus einer nachhaltigen Ausnutzung der Lebensdauer der Rohrleitungen. So kostet beispielsweise die Reparatur von Rohrbrüchen und Leckagen zwischen € 500 und € 6.000 je nach Schadensbild und Lage der Leitung (D. Fuchs-Hanusch, 2012). Schäden wie Korrosionslöcher, Rundrisse oder Längsrisse in einem frühen Stadium verursachen in der Regel geringere Reparaturkosten als Schäden welche durch längere Laufzeiten zu Auswaschungen des umgebenden Bodens und einer Ausdehnung des Schadensbildes bzw. der Bruchfläche führen. Teilweise führen zu spät erkannte Schäden in letzter Konsequenz zu frühzeitig erforderlichen Teilerneuerungen größerer Rohrabschnitte und dem darüber liegenden Straßenaufbau. Somit ist auch in Hinblick auf einen lebenszykluskostenorientierten Betrieb von Rohrnetzen die Implementierung von Leckagefrüherkennungsmethoden anzustreben. Diese ermöglichen neben einem schonenden Umgang mit der Ressource Wasser eine optimale und nachhaltige Ausnutzung der Lebensdauer von Rohrleitungen.

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Zusammenfassung von Methoden zur Leckageeingrenzung und Ortung (OEVGW Richtlinie W 63, 2009).....	24
Tabelle 2: Zusammenfassung der Vor- und Nachteile diverser optimaler Sensorplacement-Algorithmen	51
Tabelle 3: Zusammenfassung installierter Sensoren	76
Tabelle 4: Struktur Konfigurationsdatei zur Umrechnung der Spannungssignale	82
Tabelle 5: Spezifikation des Durchflussmessgerätes in der Messstation Gallgasse (Behälter Rosenhügel) ...	93
Tabelle 6: Spezifikation der eingebauten Drucksensoren	94
Tabelle 7: Eingabeparameter für die Simulation der Leckageeingrenzung im Modellnetz Hart bei Graz für 200 Simulationsdurchläufe.....	110
Tabelle 8: Ergebnisse der modellbasierten Leckageeingrenzung im Modellnetz Hart bei Graz nach 200 Simulationsdurchläufen. Die Angaben stellen die Entfernung der vom Algorithmus gefundenen Leckage zur tatsächlichen Leckageposition in Metern berechnet über die topologische Distanz dar...	110
Tabelle 9: Sensorpositionen an Hydranten berechnet mit verschiedenen Algorithmen	139
Tabelle 10: Ranking der Sensoren mit den zwei Shortest Path Algorithmen. Die Hydranten, welche nur bei einem Algorithmus vorkommen, sind farblich hervorgehoben.....	142
Tabelle 11: Beispiel Ergebnisausgabe (Leck: 0.7 l/s an Hydrant HG3880, Sensorpositionen: SPuDU)	146

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Grafische Projektstruktur	10
Abbildung 2: Wasserdargebot und Struktur der österreichischen Wasserversorgung (Versorgungsstruktur: Infoportal Trinkwasser, 2016)	14
Abbildung 3: Stromverbrauch nach Bereichen (Mayr et al., 2012)	14
Abbildung 4: Die 4 Säulen einer erfolgreichen Wasserverlustmanagement Strategie (OEVGW Richtlinie W 63, 2009).....	15
Abbildung 5: IWA Wasserbilanz (OEVGW Richtlinie W 63, 2009)	16
Abbildung 6: Empfohlene Methoden zur Leckage Detektion und Lokalisierung (Hamilton & Charalambous, 2013).....	17
Abbildung 7: Kategorien von Leckagen in Anlehnung an das BABE-Konzept (adaptiert von (Thornton et al., 2008))	18
Abbildung 8: Einfluss der Leckagelaufzeit (Frauendorfer & Liemberger, 2010)	18
Abbildung 9: Geräuschlogger und Funktionsprinzip (Quelle: www.sebakmt.com)	21
Abbildung 10: Funktionsprinzip Korrelatoren (Hamilton & McKenzie, 2014).....	22
Abbildung 11: Bodenmikrofon mit diversen Adaptern für unterschiedliche Untergründe (Quelle: www.sewerin.com).....	23
Abbildung 12: Prinzip eines modellbasierten Lösungsansatzes.....	32
Abbildung 13: Reibungsmodell zur Modellierung von Rohrleitungen.....	33
Abbildung 14: Beispielnetz von Poulakis	38
Abbildung 15: Schematische Darstellung der Methode, einen "virtuellen" Knoten an einer Leitung anzusetzen, um die Leckage der Leitung zuordnen zu können.....	39
Abbildung 16: Sensitivitätsmatrix für das Netz von Poulakis.....	39
Abbildung 17: Sensitivität der möglichen Druckmesspunkte im Netz von Poulakis über alle Leckage-Szenarios	40
Abbildung 18: Normierte Sensitivitätsmatrix für das Netz von Poulakis	40
Abbildung 19: Binärisierte Sensitivitätsmatrix für verschiedene Thresholds	43
Abbildung 20: Anzahl der gleichen Zeilen ("Number of signatures") und maximale Anzahl der gleichen Zeilen ("Maximum number of nodes") als Funktion des Thresholds für das Netz von Poulakis um den idealen Threshold zu finden.....	44
Abbildung 21: Auswirkung eines unsicheren Verbrauchers.....	47
Abbildung 22: Ergebnisse einer Monte Carlo Analyse für das Netz von Poulakis. Auf der linken Seite sind die Abweichungen der Verbräuche von den tatsächlichen Verbräuchen im Nachtminimum dargestellt. Die Verbräuche wurden mittels einer Normalverteilung mit einer Standardabweichung σ von 10 % vom tatsächlichen Verbrauch am Knoten verrauscht. Auf der rechten Seite sind die Druckabweichungen an den einzelnen Druckmesspunkten aufgrund der unsicheren Verbräuche dargestellt. Diese sind wieder Normalverteilt, allerdings mit unterschiedlicher Standardabweichung σ	48
Abbildung 23: Darstellung der Auswirkung des Verbrauchsrauschens auf die Druckmesspunkte im System. Je weiter die Entfernung zum Zuflussknoten J-02, desto stärker wirkt sich das Rauschen im Netz von Poulakis aus.....	49
Abbildung 24: Auf der linken Seite ist das Rauschen in den Druckmesspunkten aufgrund von Verbraucherschwankungen dargestellt. Auf der rechten Seite sieht man den gemittelten Effekt von Leckagen verteilt im ganzen System auf die einzelnen Druckmesspunkte. Es ist ersichtlich, dass im Netz von Poulakis Knoten, die empfindlich auf Leckagen reagieren, auch die Knoten sind, an denen das Rauschen am stärksten ist.....	49
Abbildung 25: Gleiche Darstellung wie in Abbildung 24, allerdings für das Netz Linz-Pichling. Die farblichen Unterschiede in der linken und in der rechten Abbildung lassen sich damit erklären, dass im Netz Linz-Pichling verschieden große Verbraucher an unterschiedlichen Positionen im Netz vorhanden sind. Zusätzlich besitzen die Knoten im Netz Linz-Pichling im Gegensatz zum Netz von Poulakis unterschiedliche Höhenniveaus.....	49
Abbildung 26: Netz zur numerischen Validierung der Ergebnisse. Der Farbverlauf zeigt die lokalen Druckverhältnisse entlang der Leitungen.....	56
Abbildung 27: Monte Carlo Analyse zur Untersuchung der Druckvariation aufgrund von Verbrauchsvariationen.....	57

Abbildung 28: Standardabweichung der Strangflüsse als Folge des Prozessrauschens. Die Ergebnisse des statistischen Modells (gestrichelte Linie) stimmen mit den Ergebnissen der Monte Carlo Analyse (durchgezogen) überein	57
Abbildung 29: Screenshot Jenkins Web-Plattform - Nutzung Parameterkonfiguration und anschließende Ausführung der Leckageeingrenzungsalgorithmen	60
Abbildung 30: Vollausbau des experimentellen Trinkwasserverteilnetzes im Technikum des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der TU Graz	61
Abbildung 31: Teilnetz Linz-Pichling	62
Abbildung 32: Hydraulisches Modell Linz-Pichling	63
Abbildung 33: Ausschnitt Fließgeschwindigkeiten Linz-Pichling	64
Abbildung 34: Gegebenheiten im Technikum, a) Tiefbehälter inklusive Pumpensteuerungsmodul b) Brunnenpumpe nach Installation	66
Abbildung 35: a) System Klemmfitting, b) Anbohrschelle vor Einbau und c) inkl. eingebautem Drucksensor (Quelle: www.plasson.de)	67
Abbildung 36: Schiebergarnitur, a) Hausanschlussschieber b) Handrad zur Betätigung (Quelle: www.hawle.de)	68
Abbildung 37: CAD-Plan des experimentellen Trinkwasserverteilnetzes	69
Abbildung 38: Hydraulisches Modell des experimentellen Trinkwasserverteilnetzes EWDS-TUG	70
Abbildung 39: Hydraulische Modellierung ausgewählter Bauteile	70
Abbildung 40: Sondereinbauten a) Schmutzfänger am Einspeisepunkt b) Entlüftungsventil	71
Abbildung 41: Grundwasserpumpe Grundfos SP 8A-15 mit zugehöriger Pumpenkennlinie	72
Abbildung 42: Ultraschall-Durchflussmessgeräte unterschiedlicher Hersteller a) Flexim b) Endress und Hauser c) MID am Einspeisepunkt des Labormodells (Danfoss) d) MID zur Messung von Verbrauchern/Leckagen (Kobold)	74
Abbildung 43: Drucksensoren unterschiedlicher Hersteller, Messbereichen und Genauigkeiten a) HART-fähiger Drucksensor 0-10 bar, 0.1% FS Genauigkeit, b) Drucksensor 0-6 bar, 4-20 mA Schnittstelle, 0.25% FS Genauigkeit. c) Drucksensor 0-6 bar, 0.5% FS Genauigkeit	75
Abbildung 44: Vorrichtung zur Simulation von Verbraucher oder Leckage	76
Abbildung 45: Funktionsprinzip 4 – 20 mA Stromschnittstelle (Stromschnittstelle, 2016)	79
Abbildung 46: Funktionsweise HART-Multidrop (Wie funktioniert HART,)	80
Abbildung 47: Prinzipskizze Profibus PA/DP (PROFIBUS DP-V1 Master Network Interface Module, 2016)	81
Abbildung 48: Einspeisemessung Pilotregion MA31 Blau IV (4. bis 11. August 2015)	85
Abbildung 49: Überführung Realdaten a) in Stundenmittelwerte b)	86
Abbildung 50: Prinzip für die Erstellung eines Zeitschrittes im Labormaßstab a), exemplarischer Aufbau einer Schaltmatrix (Günther et al., 2015) b)	86
Abbildung 51: Kontrollpanel Unterwasserpumpe	88
Abbildung 52: Zentraler Schaltschrank für Stromversorgung, Steuerung und Datenübertragung	89
Abbildung 53: Vergleich Stundenmittelwerte Systemeinspeisung reales Versorgungssystem (oben) sowie berechneter Durchfluss im Labormodell basierend auf Schaltmatrixerstellung (unterer Teil der Abbildung)	90
Abbildung 54: Vergleich berechneter Labordurchfluss, im Labor simulierter Durchfluss, Drucksignale sowie auftretende Leckage (von oben nach unten) (Günther et al., 2016)	91
Abbildung 55: Lage Pilotregion Wien, Zone Blau IV	92
Abbildung 56: Detailausschnitt Pilotregion Zone Blau IV	93
Abbildung 57: Positionen Drucksensoren Zone Blau IV (Quelle: DI Schuster, MA31)	94
Abbildung 58: Geographische Lage Pilot Wasserverband Grazer Feld Südost – Hart bei Graz (Quelle: GIS-Steiermark)	95
Abbildung 59: Ausschnitt Luftbild der Pilotregion in Hart bei Graz (Quelle: GIS-Steiermark)	96
Abbildung 60: Übersicht der Pilotregion in Hart bei Graz inklusive vorhandener Leitungsdurchmesser sowie Ober- als auch Unterflurhydranten	97
Abbildung 61: Positionen der geöffneten Hydranten sowie Ablauf der Öffnungsvorgänge	98
Abbildung 62: Kalibrierungsmessung mit Hydranten-Prüfgerät	99
Abbildung 63: Rohrabschnitt zur Simulation von Leckagen unterschiedlicher Größe im Feld	99
Abbildung 64: Simulierter Rohrbruch an einem Hydranten und Absicherung gegenüber öffentlichem Verkehr	100
Abbildung 65: Installiertes Ultraschall-Durchflussmessgerät am Behälter Koppenhof, a) angebrachter Sensor auf der Zubringerleitung, b) Datenlogger zum Aufzeichnen der Daten	100

Abbildung 66: Installierte Druckmessgeräte a) Oberflurhydrant, b) Unterflurhydrant	101
Abbildung 67: Auslesen der Sensoren im Behälter und am Hydranten	102
Abbildung 68: Hydraulisches Modell des Teilnetzes Linz-Pichling	104
Abbildung 69: Leckage-Sensitivität (links) und Verbraucherunsicherheiten (rechts)	105
Abbildung 70: Qualitätsfunktion des idealen Sensorplacements in Abhängigkeit der Anzahl der Sensoren	106
Abbildung 71: Qualitätsfunktion des idealen Sensorplacements als Funktion der Anzahl der Sensoren unter Berücksichtigung der Verbraucherunsicherheiten für verschiedene Gewichtungsfaktoren ω der Einbeziehung der Unsicherheiten.....	106
Abbildung 72: Sensorplacement für Linz-Pichling für zwei Sensoren mit verschiedenen Gewichtungsfaktoren.....	107
Abbildung 73: Sensorplacement für Linz-Pichling für vier Sensoren mit verschiedenen Gewichtungsfaktoren	108
Abbildung 74: Sensorplacement für Linz-Pichling für acht Sensoren mit verschiedenen Gewichtungsfaktoren Pilotnetz	109
Abbildung 75: Ergebnisse der simulierten Leckageeingrenzung im Modellnetz Hart Bei Graz.....	111
Abbildung 76: Netz von Poulakis mit Durchflusssensor am Einspeisepunkt (blauer Kreis) und Drucksensoren an jedem Knoten (grüne Quadrate). Die Leckage der Größe 1.5 L/s (hellgrünes Kreuz) befindet sich an Knoten J-16	112
Abbildung 77: Darstellung der Fitnesslandkarte des Leckageszenarios aus Abbildung 77 im Leckagegröße/Leckageort Raum.....	113
Abbildung 78: Logarithmus mit Basis 10 um die Minima der Fitnessfunktion besser darzustellen zu können	113
Abbildung 79: Reduzierung der Sensoren aus Abbildung 77Abbildung 76 auf Messungen am Einspeisepunkt plus zwei zusätzliche Druckmesspunkten, die mit dem Algorithmus von Casillas gefunden wurden..	114
Abbildung 80: Logarithmus mit Basis 10 der Fitnessfunktion, die sich für das Problem aus Abbildung 80 ergibt.....	114
Abbildung 81: Fitness-Landkarte für das Problem in Abbildung 80 berechnet mittels Korrelationsmetrik.	115
Abbildung 82: Fitness-Landkarte für das Problem in Abbildung 80 berechnet mittels Kosinusmetrik.....	116
Abbildung 83: Konvergenzverhalten des modellgestützten Leckageeingrenzungsalgorithmus in Abhängigkeit verschiedener Metriken der Fitnessfunktion.....	117
Abbildung 84: Schematische Darstellung des Einflusses der Umsortierung des Parameterraumes auf die Fitnessfunktion	117
Abbildung 85: Alphabetische Sortierung	118
Abbildung 86: Depth-First-Search Sortierung	119
Abbildung 87: Cuthill-McKee Sortierung.....	119
Abbildung 88: Zufällige Sortierung	120
Abbildung 89: Konvergenzverhalten des Leckageeingrenzungsalgorithmus für verschiedene Sortierungen.	120
Abbildung 90: Erste Konfiguration Leckageeingrenzung im Labormodell	121
Abbildung 91:Ergebnis Leckageeingrenzung EWDS-TUG.....	122
Abbildung 92: Verteilung der Leckagelokalisierung im Labormodell.....	122
Abbildung 93: Leckagelokalisierung im Labormodell – Vollausbau.....	123
Abbildung 94: Ergebnisse der Leckagelokalisierung.....	124
Abbildung 95: Durchflussmessung mittels Ultraschall am Behälter Rosenhügel, Messstelle Gallgasse.....	125
Abbildung 96: Druckmessung am Behälter Rosenhügel, Messstelle Gallgasse	126
Abbildung 97: Messdaten der Messstelle Gallgasse dargestellt in myDatanet der Firma Microtronics.	126
Abbildung 98: Messdaten der Messstelle Gallgasse dargestellt mittels Grafana aus den Daten aus der Zeitseriendatenbank in OpenSDM der TU Graz	127
Abbildung 99: Batterietausch an der Messstelle Kaiserpavillon in Zone Blau IV	127
Abbildung 100: Durchflussmessung mittels Ultraschall-Aufschnallmessung an der Messstelle Kaiserpavillon	128
Abbildung 101: Plan des Feldversuches in Wien Blau IV mit eingezeichneten Leitungen, Anschlussleitungen, Verbrauchern, Druckmesspunkte an den Hydranten und an den Hausanschlüssen.	128
Abbildung 102: Druckmessung mit einem Messkoffer an einem Hydranten	129
Abbildung 103: Druckmessung an einem Hydranten, der unabsichtlich geschlossen wurde	130
Abbildung 104: Installation eines Drucksensors mit Stromversorgung vor dem Wasserzähler eines Hauses.	132

Abbildung 105: Installation eines weiteren Drucksensors mit Stromversorgung vor dem Wasserzähler eines Hauses. 133

Abbildung 106: Inhalt eines Messkoffers, wie sie an den Hydranten und an den Hausanschlüssen installiert wurden. In der Mitte ist das Datenübertragungsmodul zu sehen, unten der Drucksensor. Bei den Hydrantenmessungen befindet sich zusätzlich eine Batterie im Messkoffer..... 133

Abbildung 107: Messungen des Durchflusses im Netz Wien Blau IV an den Messstellen Gallgasse und Kaiserpavillon 134

Abbildung 108: Messungen des Drucks an den Messstellen Gallgasse und Kaiserpavillon sowie auch den permanent an den Hausanschlüssen installierten Messpositionen..... 134

Abbildung 109: Median, Mittelwert und Standardabweichung der Einspeisemessungen von April 2016 bis Juli 2016. Links: mit Ausreißern und Wochenenden. Rechts: Ohne Ausreißer und Wochenenden 136

Abbildung 110: Median, Mittelwert und Standardabweichung (strichliert) der Druckabweichung zwischen simulierten und von April 2016 bis Juli 2017 gemessenen Drücken an zwei unterschiedlichen Messpunkten..... 136

Abbildung 111: Hydraulisches Modell des Pilotnetzes in Hart bei Graz..... 138

Abbildung 112: Mögliche Sensorpositionen an Hydranten im Modell Hart bei Graz 139

Abbildung 113: Positionen aller Sensoren im Netz Hart bei Graz beschriftet mit Knotennamen aus dem EPANET-Modell..... 140

Abbildung 114: Sensitivität auf Leckagen im Netz Hart bei Graz..... 140

Abbildung 115: Verbraucherunsicherheiten im Netz Hart bei Graz 141

Abbildung 116: Ideale Sensorpositionen berechnet mit dem Shortest Path 1 Algorithmus..... 142

Abbildung 117: Ideale Sensorpositionen berechnet mit dem Shortest Path 2 Algorithmus..... 143

Abbildung 118: Ideale Sensorpositionen berechnet mit dem Shannon-Entropie-Algorithmus..... 143

Abbildung 119: Ideale Sensorpositionen berechnet mit dem Algorithmus nach Pérez mittels Binärisierung der Sensitivitätsmatrix..... 144

Abbildung 120: Ideale Sensorpositionen berechnet mit projektionsbasiertem Ansatz von Casillas..... 144

Abbildung 121: Ideale Sensorpositionen unter Einbeziehung von Verbraucherunsicherheiten mittels des SPuDU-Algorithmus 145

Abbildung 122: Berechnete Abstände zur tatsächlichen Leckage. Die Box-Plots illustrieren die Ergebnisse aller Simulationen für unterschiedlicher Leckagegrößen- und -positionen. Die Abbildungen a) bis d) beinhalten blaue Umrahmungen welche die Regionen darstellt, wo ein Team für die Punktortung der Leckage entsandt würde. Die blauen Kreuze in den Abbildungen a) bis d) kennzeichnen den Ort der Leckage. 147

LITERATURVERZEICHNIS

- Ashby, R. & Yost, S. (2013) "Using Water Quality Data From a Water Distribution Lab Model in Calibrating Computer Models" in World Environmental and Water Resources Congress 2013. American Society of Civil Engineers, 1004–1015. [online]
<http://dx.doi.org/10.1061/9780784412947.097> (Accessed June 22, 2015).
- Autodesk | 3D Design, Engineering & Entertainment Software [online] <http://www.autodesk.com/> (Accessed October 19, 2016).
- Bennis, S., Fares, R., Guemouria, N., & Dubois, M. (2011) Theoretical Modeling and Experimental Validation of Leakage in Drinking Water Networks. *Journal - American Water Works Association*, **103**, Number 12(December), 61–72.
- Berry, J. W., Hart, W. E., Phillips, C. A., & Watson, J.-P. (2006) "A Facility Location Approach to Sensor Placement Optimization" in Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006. American Society of Civil Engineers, 1–4. [online]
<http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40941%28247%29111> (Accessed November 17, 2016).
- Blesa, J., Nejari, F., & Sarrate, R. (2014) Robustness Analysis of Sensor Placement for Leak Detection and Location under Uncertain Operating Conditions. *Procedia Engineering*, **89**, 1553–1560.
- Breindl, D. (2013) Kanalsanierung - Eine Herausforderung für die Zukunft.
- Brunone, B. & Meniconi, S. (2013) Discussion of "Case Studies of Leak Detection and Location in Water Pipe Systems by Inverse Transient Analysis" by Dídía Covas and Helena Ramos. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **139**(1), 126–127.
- Camhy D., Gruber G., Steffelbauer D., Hofer T. F., & Muschalla D. (2014) "OpenSDM - An Open Sensor Data Management Tool" in 11th International Conference on Hydroinformatics.
- Casillas, M., Garza-Castañón, L., & Puig, V. (2015a) Optimal Sensor Placement for Leak Location in Water Distribution Networks using Evolutionary Algorithms. *Water*, **7**(11), 6496–6515.
- Casillas, M., Garza-Castañón, L., Puig, V., & Vargas-Martinez, A. (2015b) Leak Signature Space: An Original Representation for Robust Leak Location in Water Distribution Networks. *Water*, **7**(3), 1129–1148.
- Casillas, M. V., Garza-Castañón, L. E., & Puig, V. (2015c) Sensor Placement for Leak Location in Water Distribution Networks using the Leak Signature Space. *IFAC-PapersOnLine*, **48**(21), 214–219.
- Casillas, M. V., Puig, V., Garza-Castanon, L. E., & Rosich, A. (2013a) "Optimal sensor placement for leak location in water distribution networks using genetic algorithms" in 2013 Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol)., 61–66.
- Casillas, M. V., Puig, V., Garza-Castañón, L. E., & Rosich, A. (2013b) Optimal Sensor Placement for Leak Location in Water Distribution Networks Using Genetic Algorithms. *Sensors*, **13**(11), 14984–15005.
- Casillas Ponce, M. V., Garza Castañón, L. E., & Cayuela, V. P. (2014) Model-based leak detection and location in water distribution networks considering an extended-horizon analysis of pressure sensitivities. *Journal of Hydroinformatics*, **16**(3), 649.
- Cassa, A. M. & van Zyl, J. E. (2009) "A Numerical Investigation into the Behaviour of Cracks in uPVC Pipes under Pressure" in American Society of Civil Engineers, 1–8. [online]
<http://cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?169906> (Accessed July 3, 2014).

- Cassa, A. M. & van Zyl, J. E. (2013) Predicting the head-leakage slope of cracks in pipes subject to elastic deformations. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, **62**(4), 214.
- Christodoulou, S. E., Gagatsis, A., Xanthos, S., Kranioti, S., Agathokleous, A., & Fragiadakis, M. (2013) Entropy-Based Sensor Placement Optimization for Waterloss Detection in Water Distribution Networks. *Water Resources Management*, **27**(13), 4443–4468.
- Ćipranić, I. & Sekulić, G. (2015) The analysis of the influence of soil on leakage in water supply systems. *Tehnicki vjesnik - Technical Gazette*, **22**(5), 1179–1184.
- Colombo, A. F., Lee, P., & Karney, B. W. (2009) A selective literature review of transient-based leak detection methods. *Journal of Hydro-environment Research*, **2**(4), 212–227.
- Covas, D. & Ramos, H. (2010) Case Studies of Leak Detection and Location in Water Pipe Systems by Inverse Transient Analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **136**(2), 248–257.
- Cugueró-Escofet, M. A., Puig, V., Quevedo, J., & Blesa, J. (2015a) Optimal Pressure Sensor Placement for Leak Localisation Using a Relaxed Isolation Index: Application to the Barcelona Water Network★. *IFAC-PapersOnLine*, **48**(21), 1108–1113.
- Cugueró-Escofet, P., Blesa, J., Pérez, R., Cugueró-Escofet, M. A., & Sanz, G. (2015b) Assessment of a Leak Localization Algorithm in Water Networks under Demand Uncertainty★. *IFAC-PapersOnLine*, **48**(21), 226–231.
- Cuthill, E. & McKee, J. (1969) “Reducing the bandwidth of sparse symmetric matrices” in Proceedings of the 1969 24th national conference. *ACM*, 157–172. [online]
<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=805928> (Accessed May 31, 2016).
- D. Fuchs-Hanusch, B. K. (2012) Whole of Life Cost Calculations for Water Supply Pipes. *Water asset management international*, **8**, 19–24.
- De Jong, K. A. (1975) An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems.
- De Paola, F., Galdiero, E., Giugni, M., Papa, R., & Urciuoli, G. (2014) Experimental Investigation on a Buried Leaking Pipe. *Procedia Engineering*, **89**, 298–303.
- Dijkstra, E. W. (1959) A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, **1**(1), 269–271.
- DIN 1319, -1 (1995) Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe.
- Dorini, G., Jonkergouw, P., Kapelan, Z., & Savic, D. (2010) SLOTS: Effective Algorithm for Sensor Placement in Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **136**(6), 620–628.
- Evangelista, S., Leopardi, A., Pignatelli, R., & de Marinis, G. (2015) Hydraulic Transients in Viscoelastic Branched Pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*, **141**(8), 04015016.
- Farley, B., Boxall, J. B., & Mounce, S. R. (2010a) “Field Validation of ‘Optimal’ Instrumentation Methodology for Burst/Leak Detection and Location” in *Water Distribution Systems Analysis 2010*. American Society of Civil Engineers, 1093–1102. [online]
<http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41203%28425%2999> (Accessed July 31, 2014).
- Farley, B., Mounce, S., & Boxall, J. (2013) Development and Field Validation of a Burst Localization Methodology. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **139**(6), 604–613.

- Farley, B., Mounce, S. R., & Boxall, J. B. (2010b) Field testing of an optimal sensor placement methodology for event detection in an urban water distribution network. *Urban Water Journal*, **7**(6), 345–356.
- Farley, B., Mounce, S. R., & Boxall, J. B. (2008) “Optimal Locations of Pressure Meters for Burst Detection” in *Water Distribution Systems Analysis 2008*. American Society of Civil Engineers, 1–11. [online] <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41024%28340%2963> (Accessed July 31, 2014).
- Ferrante, M. (2012) Experimental Investigation of the Effects of Pipe Material on the Leak Head-Discharge Relationship. *Journal of Hydraulic Engineering*, **138**(8), 736–743.
- Ferrante, M., Massari, C., Brunone, B., & Meniconi, S. (2011) Experimental Evidence of Hysteresis in the Head-Discharge Relationship for a Leak in a Polyethylene Pipe. *Journal of Hydraulic Engineering*, **137**(7), 775–780.
- Ferrante, M., Massari, C., Todini, E., Brunone, B., & Meniconi, S. (2013) Experimental investigation of leak hydraulics. *Journal of Hydroinformatics*, **15**(3), 666.
- Fontanazza, C. M., Notaro, V., Puleo, V., Nicolosi, P., & Freni, G. (2015) Contaminant Intrusion through Leaks in Water Distribution System: Experimental Analysis. *Procedia Engineering*, **119**, 426–433.
- Franchini, M. & Lanza, L. Leakages in pipes: generalizing Torricelli’s equation to deal with different elastic materials, diameters and orifice shape and dimensions. *Urban Water Journal*, **0**(0), 1–18.
- Frauendorfer, R. & Liemberger, R. (2010) *The issues and challenges of reducing non-revenue water*, [online] <http://alltitles.ebrary.com/Doc?id=10906299> (Accessed March 24, 2016).
- Fuchs-Hanusch, D., Steffelbauer, D., Günther, M., & Muschalla, D. (2015) Systematic material and crack type specific pipe burst outflow simulations by means of EPANET2. *Urban Water Journal*, **0**(0), 1–11.
- Goldberg, D. E. (1989) *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA.
- Greyvenstein, B. & van Zyl, J. E. (2007) An experimental investigation into the pressure - leakage relationship of some failed water pipes. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, **56**(2), 117.
- Günther, M., Camhy, D., Steffelbauer, D., Neumayer, M., & Fuchs-Hanusch, D. (2015) Showcasing a Smart Water Network Based on an Experimental Water Distribution System. *Computing and Control for the Water Industry (CCWI2015) Sharing the best practice in water management*, **119**, 450–457.
- Günther, M., Steffelbauer, D. B., & Fuchs-Hanusch, D. (2016) “Fault detection data creation using an experimental water distribution system” in *Proceedings of the 2016 3rd Conference on Control and Fault-Tolerant Systems*. IEEE, Barcelona, Spain, 331–336.
- Günther, M., Steffelbauer, D., Neumayer, M., & Fuchs-Hanusch, D. (2014) Experimental Setup to Examine Leakage Outflow in a Scaled Water Distribution Network. *Procedia Engineering*, **89**, 311–317.
- Hamilton, S. & Charalambous, B. (2013) *Leak Detection: Technology and Implementation*, IWA Publishing.
- Hamilton, S. & McKenzie, R. S. (2014) *Water management and water loss*,
- Holland, J. H. (1975) *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*, U Michigan Press, Oxford, England.
- Kang, D. & Lansey, K. (2010) Optimal Meter Placement for Water Distribution System State Estimation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **136**(3), 337–347.

- Kapelan, Z., Savic, D., & Walters, G. (2005) Optimal Sampling Design Methodologies for Water Distribution Model Calibration. *Journal of Hydraulic Engineering*, **131**(3), 190–200.
- Krause, A., Leskovec, J., Guestrin, C., VanBriesen, J., & Faloutsos, C. (2008) Efficient Sensor Placement Optimization for Securing Large Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **134**(6), 516–526.
- Lambert, A. (1994) Accounting for Losses: The Bursts and Background Concept. *Water and Environment Journal*, **8**(2), 205–214.
- Mayr, E., Lukas, A., & Perfler, R. (2012) *Erstellung eines Leitfadens zur Optimierung der Energienutzung bei Wasserversorgungsanlagen*, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. [online] https://www.bmlfuw.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/foerderungen/trinkwasser_abwasser/forschung.html.
- Misiunas, D., Vitkovský, J., Olsson, G., Simpson, A., & Lambert, M. (2005) Pipeline Break Detection Using Pressure Transient Monitoring. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **131**(4), 316–325.
- Moors, J. (2016) Model-based leak localization in small water supply networks. [online] <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid:25aa7faa-8111-4198-a247-6eb84a5e49ef/> (Accessed December 6, 2016).
- Mora Rodríguez, J. de J., López Jiménez, P. A., & Ramos, H. M. (2011) Intrusion problematic during water supply systems' operation. *International Journal of Energy and Environment*, **2**(3), 391–400.
- Neunteufel, R., Schmidt, B., & Perfler, R. (2016) *Wasserversorgung im Jahre 2015 - Erfahrungen und Ausblick*, Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz Department Wasser-Atmosphäre-Umwelt Universität für Bodenkultur Wien.
- OENorm B 2539 (2014) Technische Überwachung von Trinkwasserversorgungsanlagen.
- OEVGW Aktuell (2016) [online] <http://www.ovgw.at/aktuell/?uncollapse=307> (Accessed October 31, 2016).
- OEVGW Richtlinie W 59 (2014) Technische Überwachung von Wasserversorgungsanlagen.
- OEVGW Richtlinie W 63 (2009) Wasserverluste in Trinkwasserversorgungssystemen - Ermittlung, Bewertung und Maßnahmen zur Verminderung.
- OEVGW Richtlinie W 100 (2007) Wasserverteilleitungen - Betrieb und Instandhaltung.
- OEVGW Richtlinie W 105 (2011) Schadensstatistik - Erfassung und Verarbeitung von Schadensereignissen.
- Ostfeld, A. & Salomons, E. (2004) Optimal Layout of Early Warning Detection Stations for Water Distribution Systems Security. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **130**(5), 377–385.
- Ostfeld, A., Uber, J., Salomons, E., Berry, J., Hart, W., Phillips, C., Watson, J., Dorini, G., Jonkergouw, P., Kapelan, Z., di Pierro, F., Khu, S., Savic, D., Eliades, D., Polycarpou, M., Ghimire, S., Barkdoll, B., Gueli, R., Huang, J., McBean, E., James, W., Krause, A., Leskovec, J., Isovitsch, S., Xu, J., Guestrin, C., VanBriesen, J., Small, M., Fischbeck, P., Preis, A., Propato, M., Piller, O., Trachtman, G., Wu, Z., & Walski, T. (2008) The Battle of the Water Sensor Networks (BWSN): A Design Challenge for Engineers and Algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **134**(6), 556–568.
- Pérez, R., Cugueró, M.-A., Cugueró, J., & Sanz, G. (2014) Accuracy Assessment of Leak Localisation Method Depending on Available Measurements. *Procedia Engineering*, **70**, 1304–1313.

- Pérez, R., Puig, V., Pascual, J., Peralta, A., Landeros, E., & Jordanas, L. (2009) Pressure sensor distribution for leak detection in Barcelona water distribution network. *Water Science & Technology: Water Supply*, **9**(6), 715.
- Perez, R., Quevedo, J., Puig, V., Nejjari, F., Cuguero, M. A., Sanz, G., & Mirats, J. M. (2011) “Leakage isolation in water distribution networks: A comparative study of two methodologies on a real case study” in 2011 19th Mediterranean Conference on Control Automation (MED)., 138–143.
- Poulakis, Z., Valougeorgis, D., & Papadimitriou, C. (2003) Leakage detection in water pipe networks using a Bayesian probabilistic framework. *Probabilistic Engineering Mechanics*, **18**(4), 315–327.
- PROFIBUS DP-V1 Master Network Interface Module (2016) [online] <http://www.prosoft-technology.com/Products/Rockwell-Automation-In-chassis/Platform/ControlLogix/PROFIBUS-DP-V1-Master-Network-Interface-Module-for-ControlLogix> (Accessed November 14, 2016).
- Pudar, R. & Liggett, J. (1992) Leaks in Pipe Networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, **118**(7), 1031–1046.
- Quevedo, J., Cuguero, M.-À., Pérez, R., Nejjari, F., Puig, V., & Mirats, J. (2011) “Leakage location in water distribution networks based on correlation measurement of pressure sensors” in International Water Association (IWA), San Sebastian, Spain, 290–297.
- Rechenberg, I. (1973) *Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*, Frommann-Holzboog.
- Romano, M., Kapelan, Z., & Savić, D. A. (2013) Geostatistical techniques for approximate location of pipe burst events in water distribution systems. *Journal of Hydroinformatics*, **15**(3), 634.
- Rossman, L. A. (2000) EPANET 2: users manual. [online] <http://ghalambaz.persianganig.com/Amoozeshi/P1007WWU.pdf> (Accessed March 27, 2014).
- Sanz, G. & Pérez, R. (2014) Parameterization and sampling design for water networks demand calibration using the singular value decomposition: Application to a real network. [online] <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/27134/2014-Parameterization+and+Sampling+Design+for+Water+Networks+Demand+Calibration+using+the+SVD.+Application+to+a+real+Network.pdf?sequence=1> (Accessed September 30, 2015).
- Sarrate Estruch, R., Blesa Izquierdo, J., Nejjari Akhi-Elarab, F., & Quevedo Casín, J. J. (2013) “Sensor placement for leak detection and location in water distribution networks” in Proceedings of 7th IWA Specialist Conference on Efficient Use and Management of Water. International Water Association (IWA), 1–10. [online] <http://upcommons.upc.edu/handle/2117/20760> (Accessed March 8, 2016).
- Sarrate, R., Blesa, J., & Nejjari, F. (2014a) “Clustering techniques applied to sensor placement for leak detection and location in water distribution networks” in 2014 22nd Mediterranean Conference of Control and Automation (MED)., 109–114.
- Sarrate, R., Blesa, J., Nejjari, F., & Quevedo, J. (2014b) Sensor placement for leak detection and location in water distribution networks. *Water Science & Technology: Water Supply*, **14**(5), 795.
- Sarrate, R., Nejjari, F., & Rosich, A. (2012) “Sensor placement for fault diagnosis performance maximization in Distribution Networks” in 2012 20th Mediterranean Conference on Control Automation (MED)., 110–115.
- Savic, D. A., Kapelan, Z. S., & Jonkergouw, P. M. R. (2009) Quo vadis water distribution model calibration? *Urban Water Journal*, **6**(1), 3–22.
- de Schaetzen, W. B. F., Walters, G. A., & Savic, D. A. (2000) Optimal sampling design for model calibration using shortest path, genetic and entropy algorithms. *Urban Water*, **2**(2), 141–152.

- Shao, Y., Jeffrey Yang, Y., Jiang, L., Yu, T., & Shen, C. (2014) Experimental testing and modeling analysis of solute mixing at water distribution pipe junctions. *Water Research*, **56**, 133–147.
- Steffelbauer, D. B. & Fuchs-Hanusch, D. (2016a) Efficient Sensor Placement for Leak Localization Considering Uncertainties. *Water Resources Management*, 1–17.
- Steffelbauer, D. B. & Fuchs-Hanusch, D. (2016b) “Fitness landscapes and distance metrics for model-based leakage localization” in Barcelona, Spain.
- Steffelbauer, D. & Fuchs-Hanusch, D. (2015) OOPNET: An object-oriented EPANET in Python. *Procedia Engineering*, **119**, 710–718.
- Steffelbauer, D., Neumayer, M., Günther, M., & Fuchs-Hanusch, D. (2014) Sensor Placement and Leakage Localization Considering Demand Uncertainties. *Procedia Engineering*, **89**, 1160–1167.
- Storn, R. & Price, K. (1997) Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. *J. of Global Optimization*, **11**(4), 341–359.
- Stromschnittstelle (2016) Wikipedia. [online]
<https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Stromschnittstelle&oldid=150721396> (Accessed November 14, 2016).
- Thornton, J., Sturm, R., & Kunkel, G. (2008) *Water loss control*, McGraw-Hill New York.
- Tryby, M. E., Propato, M., & Ranjithan, S. R. (2010) Monitoring Design for Source Identification in Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **136**(6), 637–646.
- Versorgungsstruktur: Infoportal Trinkwasser (2016) [online]
<http://www.trinkwasserinfo.at/trinkwasserdatenbank/versorgungsstruktur/> (Accessed October 24, 2016).
- Walski, T., Bezts, W., Posluszny, E. T., Weir, M., & Whitman, B. E. (2006a) Modeling leakage reduction through pressure control. *Journal - American Water Works Association*, **98**, Number 4(April), 147–155.
- Walski, T. M., DeFrank, N., Voglino, T., Wood, R., & Whitman, B. E. (2006b) “Determining the Accuracy of Automated Calibration of Pipe Network Models” in *Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006*. American Society of Civil Engineers, 1–18. [online]
<http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40941%28247%2967> (Accessed July 29, 2014).
- Walski, T., Whitman, B., Baron, M., & Gerloff, F. (2009) “Pressure vs. Flow Relationship for Pipe Leaks” in *World Environmental and Water Resources Congress 2009*. American Society of Civil Engineers, 1–10. [online] [http://dx.doi.org/10.1061/41036\(342\)10](http://dx.doi.org/10.1061/41036(342)10) (Accessed July 9, 2015).
- Wie funktioniert HART [online] http://de.hartcomm.org/hcp/tech/aboutprotocol/aboutprotocol_how.html (Accessed November 14, 2016).
- Wu, Z., Sage, P., & Turtle, D. (2009) Pressure-Dependent Leak Detection Model and Its Application to a District Water System. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **136**(1), 116–128.
- Yu, T., Tao, L., Shao, Y., & Zhang, T. (2015) Experimental study of solute mixing at double-Tee junctions in water distribution systems. *Water Science & Technology: Water Supply*, **15**(3), 474.
- van Zyl, J. & Cassa, A. (2014) Modeling Elastically Deforming Leaks in Water Distribution Pipes. *Journal of Hydraulic Engineering*, **140**(2), 182–189.



**MINISTERIUM
FÜR EIN
LEBENSWERTES
ÖSTERREICH**

bmlfuwgv.at

FÜR EIN LEBENSWERTES ÖSTERREICH.

UNSER ZIEL ist ein lebenswertes Österreich in einem starken Europa: mit reiner Luft, sauberem Wasser, einer vielfältigen Natur sowie sicheren, qualitativ hochwertigen und leistbaren Lebensmitteln.

Dafür schaffen wir die bestmöglichen Voraussetzungen.

Wir arbeiten für sichere Lebensgrundlagen, eine nachhaltige Lebensart und verlässlichen Lebensschutz.



**MINISTERIUM
FÜR EIN
LEBENSWERTES
ÖSTERREICH**