

Angepasste Wasserverlustbilanzierung in intermittierend betriebenen Wasserverteilungssystemen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der KIT-Fakultät für
Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

DISSERTATION

von

M.Sc. Miran Mastaller
aus Shenzhen (VR China)

Tag der mündlichen Prüfung: 24.04.2020

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Franz Nestmann

Korreferent: Apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Steffen Krause

Karlsruhe 2020

Kurzfassung

Hohe Wasserverluste in Verteilungssystemen verschärfen die ohnehin defizitäre Wasserversorgungssituation in vielen Regionen der Erde, insbesondere in Entwicklungs- und Schwellenländern. Dort ist die Verfügbarkeit von erschließbaren Wasserressourcen entweder durch die naturräumlichen Gegebenheiten oder den Mangel an technischen und ökonomischen Mitteln für den Bau und Betrieb von zusätzlichen Wassergewinnungs- und Wassertransportanlagen oftmals limitiert. Daher bieten Maßnahmen der Wasserverlustreduktion in den Leitungsnetzen ein großes Potential, um nachhaltig und ressourcenschonend die Versorgungssituation zu verbessern.

Um Reduktionsmaßnahmen zielgerichtet durchführen zu können, sind im Rahmen eines Wasserverlustmanagements zunächst Art und Ausmaß der aktuellen Wasserverluste zu ermitteln und hinsichtlich des Reduktionspotentials zu bewerten. Mit der Methodik der Wasserverlustbilanzierung werden dabei alle in ein Verteilungssystem eingespeisten und an die Verbraucher abgegebenen Wassermengen quantifiziert. Diese Mengen werden in einer tabellarischen Wasserbilanz gegenübergestellt, um dadurch auf die Verlusthöhe im betrachteten System schließen zu können. Die bestehende Methodik der Verlustbilanzierung wurde jedoch für die in den meisten Industrienationen gegebenen Randbedingungen konzipiert, wie beispielsweise eine kontinuierliche Wasserversorgung. Bei einer intermittierenden Betriebsweise, bei der die Verteilungssysteme nur zeitweise mit Wasser beschickt werden und die in vielen Entwicklungs- und Schwellenländern verbreitet ist, kann die bestehende Methodik nur bedingt für eine zielführende Wasserverlustanalyse in derartig betriebenen Systemen angewandt werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgte daher die Entwicklung und pilothafte Umsetzung einer angepassten Wasserverlustbilanzierung, die die typischen Randbedingungen in intermittierend betriebenen Verteilungssystemen berücksichtigt. Dazu zählen neben der Betriebsweise die fehlende flächendeckende Messung der erforderlichen Betriebsdaten sowie eine volumenunabhängige Kundenabrechnung mittels Fixtarif. Anhand der angepassten Wasserbilanz lassen sich Verlustkomponenten wie die Wasserverschwendung im Kundenbereich oder betriebswirtschaftliche Verluste durch eine mangelhafte Ausgestaltung des Fixtarifs, die in der intermittierenden Versorgung ohne Kundenwasserzähler einen erheblichen Anteil der eingespeisten Wassermenge ausmachen können, direkt ermitteln.

Diesbezüglich wurde ein Monitoringsystem entwickelt, bei dem zur Reduktion des erforderlichen Aufwandes für Implementierung und Betrieb die Messung der an die Verbraucher abgegebenen sowie im Kundenbereich tatsächlich verbrauchten bzw. verschwendeten Wassermengen anhand von Stichprobenmessungen erfolgt. Mittels eines einfachen, Microsoft-Excel basierten Werkzeuges, in dem neben der statisti-

schen Auswertung der Stichprobenmessungen auch ein Verfahren zur Korrektur der Zählermesswerte hinsichtlich der Luftströmung in der intermittierenden Verteilung integriert ist, lässt sich die angepasste Wasserbilanz für den jeweils untersuchten Bilanzzeitraum erstellen.

Die pilothafte Umsetzung der entwickelten Methodik erfolgte im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekts *WaLUE* in einer intermittierend betriebenen Versorgungszone der südindischen Projektstadt Tiruvannamalai. Die Ergebnisse der angepassten Wasserverlustbilanzierung zeigen das Potential zur Reduktion der häuslichen Wasserverschwendung sowie zur verbesserten Einnahmengenerierung durch eine Anpassung des Fixtarifes an die effektiv an die Verbraucher abgegebenen Wassermengen auf.

Der Umsetzungsprozess in Tiruvannamalai macht auch entscheidende Faktoren zur erfolgreichen Implementierung der Methodik und insbesondere der kontinuierlichen Datenerhebung durch das Monitoringsystem sichtbar, die bei der Übertragung der Methodik auf andere Verteilungssysteme berücksichtigt werden sollten. Dazu zählen neben dem Einsatz von robuster und in Betrieb und Wartung einfacher Messtechnik insbesondere die Verfügbarkeit von ausreichend Betriebspersonal zur regelmäßigen Datenauslesung und -auswertung sowie eine umfassende Verbrauchereinformation über die Ziele der Wasserverlustbilanzierung und dem dazu erforderlichen Verbrauchsmonitoring im Kundenbereich.

Abstract

High water losses in distribution systems exacerbate the already deficient water supply situation in many regions of the world, especially in developing and emerging countries. In these regions, the availability of accessible water resources is often limited either due to natural conditions or the lack of technical and economic means for the construction and operation of additional water extraction and water transport facilities. Water loss reduction measures therefore offer a high potential for improving the supply situation in a sustainable and resource-saving manner.

To purposefully carry out reduction measures, the type and extent of the current water losses must first be determined in the framework of a water loss management and evaluated with regard to the reduction potential. For this purpose, the results of a water loss balancing are used among other things, which is based on the most precise possible quantification of all water quantities put into a distribution system as well as successfully supplied to the consumer. These quantities are compared in a tabular water balance in order to draw conclusions about the amount of loss in the examined system. However, the existing water loss balancing methodology has been designed for the boundary conditions that exist in most industrialized countries, such as a continuous water supply. In an intermittent operation mode, in which the distribution systems are only temporarily supplied with water and which is common in many developing and emerging countries, the existing methodology can only be used to a limited extent for a targeted water loss analysis in systems operated in this way.

The subject of this thesis has therefore been the development and pilot implementation of an adapted water loss balancing methodology, which takes into account the typical boundary conditions in intermittently operated distribution systems. In addition to the mode of operation, this includes the missing area-wide measurement of the required operating data and a volume-independent customer billing applying a fixed water tariff. Using the adapted water balance, loss components such as water wastage in the customer area or economic losses due to an inadequate design of the fixed tariff, which can make up a significant proportion of the system input volume in the intermittent supply without customer metering, can be directly determined.

In this regard, a monitoring system has been developed where, in order to reduce the implementation and operation effort, the measurement of the quantities of water supplied to the consumer as well as actually used or wasted in the customer area is carried out using sample measurements. Using a simple, Microsoft Excel-based tool, in which the statistical evaluation of the sample measurements as well as a method for correcting the meter measurement values regarding the air flow in the inter-

mittent distribution are integrated, the adapted water balance for each examined balancing period can be established.

The pilot implementation of the developed methodology was carried out as part of the joint project *WaLUE* funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) in an intermittently operated supply zone in the south Indian project city of Tiruvannamalai. The results of the adapted water loss balance showed the water utility the potential for reducing domestic water wastage as well as for improved income generation by adjusting the fixed tariff to the amount of water effectively delivered to the consumers.

The implementation process in Tiruvannamalai also revealed crucial factors for the successful implementation of the methodology and in particular for the continuous data collection by the monitoring system, which should be taken into account when transferring the methodology to other distribution systems. In addition to the use of robust measurement technology that is simple to operate and maintain, this particularly includes the availability of sufficient operating personnel for regular data reading and evaluation measures as well as a comprehensive customer information on the objectives of the water loss balancing methodology and the required consumption monitoring in the customer area.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des Karlsruher Instituts für Technologie. Daher gilt ein besonderer Dank zunächst dem Institutsleiter Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Franz Nestmann für die Ermöglichung der Mitwirkung in internationalen Verbundvorhaben im Bereich Wasserversorgung sowie die Übernahme der Betreuung und Erstbegutachtung dieser Arbeit. Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Steffen Krause der Universität der Bundeswehr München für das Interesse an meiner Dissertation sowie die Übernahme des Zweitgutachters herzlich bedanken. Ein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Bodo Ruck sowie Herrn PD Dr.-Ing. Stephan Fuchs für ihr Mitwirken in der Prüfungskommission.

Diese Arbeit entstand im Rahmen des *WaLUE*-Verbundvorhabens, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wurde. Ich danke allen Mitarbeitern der Verbundpartner auf deutscher Seite für die gute Zusammenarbeit vor Ort und in Deutschland. Auf indischer Seite gilt mein besonderer Dank den Mitarbeitern der Stadtverwaltung Tiruvanannamalais sowie den lokalen *WaLUE*-Mitarbeitern für die Unterstützung bei der Implementierung und dem Betrieb des entwickelten Monitoringsystems zur Wasserverlustbilanzierung.

Auf Institutsseite möchte ich zunächst Herrn Dr.-Ing. Peter Oberle für seine Unterstützung und somit Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit danken. Dem ehemaligen Abteilungsleiter Dr.-Ing. Philipp Klingel gebührt ein besonderer Dank für seine fachlichen Anregungen und Diskussionen sowie die fortwährende Unterstützung während des *WaLUE*-Verbundvorhabens und der Erstellung dieser Arbeit. Allen Kollegen des IWGs danke ich für die stets gute und kollegiale Zusammenarbeit. Herrn David Walter danke ich für seine Anregungen und Ideen bezüglich der Projektbearbeitung sowie dieser Arbeit.

Zu guter Letzt möchte ich mich herzlichst bei meiner Familie und Freunden bedanken. Bei meinen Eltern für die fortwährende Unterstützung meiner beruflichen Laufbahn sowie in allen persönlichen Lebenslagen. Bei meiner Schwester, die mir aufgrund ihrer Lebenseinstellung stets ein Vorbild ist und mit Sicherheit eines Tages die Welt retten wird. Der letzte und besondere Dank gilt meiner Freundin Christa für ihre außerordentliche Unterstützung sowie ihren großen Rückhalt seit vielen Jahren und insbesondere während der Fertigstellung dieser Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Hintergrund	1
1.2	Zielsetzung und Ansatz	3
1.3	Das WaLUE-Verbundprojekt	5
1.4	Aufbau der Arbeit	7
2	Wasserverteilungssysteme	11
2.1	Überblick	11
2.2	Wasserversorgung: Bereitstellung von Wasser als menschliches Grundbedürfnis und Recht	11
2.3	Wasserversorgungssysteme	17
2.3.1	Aufgaben	17
2.3.2	Anlagenkomponenten	17
2.4	Wasserverteilungssysteme als finale Komponente der Wasserversorgung	19
2.4.1	Allgemeines	19
2.4.2	Bestandteile	19
2.4.3	Systemkonzepte	24
2.5	Technischer Betrieb von Wasserverteilungssystemen	25
2.5.1	Aufgaben	25
2.5.2	Betriebsweise	27
2.6	Wassermengen- und Druckmessung	30
2.6.1	Allgemeines	30
2.6.2	Volumenmessung	31
2.6.3	Durchflussmessung	34
2.6.4	Druckmessung	36
2.6.5	Messabweichungen	38
2.7	Wassertarife	47
2.7.1	Ziele	47
2.7.2	Tarifausgestaltung	48
2.7.3	Subventionierung	50
2.7.4	Umsetzungsbeispiele	52
3	Wasserverlustmanagement	55
3.1	Überblick	55
3.2	Wasserverluste	55
3.2.1	Reale Wasserverluste	55
3.2.2	Scheinbare Wasserverluste	60

3.2.3	Wasserverschwendung	62
3.2.4	Auswirkungen von Wasserverlusten	62
3.2.5	Wasserverluste in Zahlen	64
3.3	Wasserverlustmanagement als iterativer Prozess	68
3.4	Wasserverlustanalyse	69
3.4.1	Allgemeines	69
3.4.2	Schaffung der Voraussetzungen	69
3.4.3	Wasserbilanz	71
3.4.4	Weitere Verfahren der Wasserverlustermittlung	77
3.4.5	Kennzahlen zur Wasserverlustbewertung	82
3.4.6	Strategieentwicklung zur Wasserverlustreduktion	88
3.5	Gegenmaßnahmen zur Wasserverlustreduktion	91
3.5.1	Allgemeines	91
3.5.2	Reale Wasserverlustreduktion	92
3.5.3	Scheinbare Wasserverlustreduktion	94
4	Intermittierende Wasserverteilung am Fallbeispiel Tiruvannamalai	97
4.1	Überblick	97
4.2	Projektstadt Tiruvannamalai	97
4.2.1	Geografische Einordnung	97
4.2.2	Demografie	98
4.3	Wasserversorgungssystem Tiruvannamalai	99
4.4	Technischer Betrieb der Wasserversorgung	101
4.4.1	Organisation	101
4.4.2	Intermittierende Betriebsweise	101
4.5	Wassertarif	104
4.6	Ursachen und Auswirkungen der intermittierenden Wasserverteilung .	104
4.6.1	Mangelhafte Datenhaltung	105
4.6.2	Mangelhaftes Systemkonzept und -planung	105
4.6.3	Mangelhafter Betrieb und Instandhaltung	107
4.7	Bedarf angepasster Lösungen für die intermittierende Wasserverteilung	110
5	Entwicklung der angepassten Wasserverlustbilanzierung	113
5.1	Überblick	113
5.2	Limitierte Anwendbarkeit der IWA-Wasserbilanz	113
5.3	Modifikationsansätze der IWA-Wasserbilanz	115
5.4	Anpassung der IWA-Wasserbilanz	118
5.5	Verfahren zur Ermittlung und Bewertung der Bilanzkomponenten . .	121
5.5.1	Zielsetzung	121
5.5.2	Stichprobenmessung und Einfluss von Luft auf Zählermessungen	122
5.5.3	System Input Volume	141
5.5.4	Flat-Rate Billed Authorised Supply	144
5.5.5	Consumption und Wastage	149
5.5.6	Unbilled Authorised Supply	150

5.5.7	Apparent Losses	150
5.5.8	Real Losses	151
5.5.9	Revenue Water und Non-Revenue Water	151
5.6	Kennzahlen zur Bewertung der Wasserverlustkomponenten	152
5.7	Werkzeug zur Erstellung der angepassten Wasserbilanz	153
6	Pilothafte Umsetzung der angepassten Wasserverlustbilanzierung	155
6.1	Überblick	155
6.2	Pilotgebiet	155
6.3	Ermittlung haushaltsbezogener Daten	158
6.3.1	Zielsetzung und Vorgehen	158
6.3.2	Ergebnisse	159
6.4	Monitoringsystem	161
6.4.1	Konzeption	161
6.4.2	System Input Volume	161
6.4.3	Flat-Rate Billed Authorised Supply und Consumption	163
6.5	Einführung der kontinuierlichen Datenerhebung und -auswertung	165
6.6	Ergebnisse der angepassten Wasserverlustbilanzierung	167
6.6.1	Bilanzzeitraum	167
6.6.2	Bilanzkomponenten	168
6.6.3	Angepasste Wasserbilanz	174
6.6.4	Angepasste Kennzahlen	176
6.7	Diskussion der Ergebnisse	177
6.7.1	Unsicherheiten der Mess- und Schätzwerte	177
6.7.2	Plausibilität der Mess- und Schätzwerte	178
6.8	Übertragbarkeit der entwickelten Methodik	179
7	Zusammenfassung und Ausblick	185
7.1	Zusammenfassung	185
7.2	Ausblick	187
	Literaturverzeichnis	189

Abbildungsverzeichnis

1.1	Veranlassung und Ansatz der angepassten Methodik zur Wasserverlustbilanzierung	4
2.1	Wasserversorgungs- und Wasserverteilungssystem	20
2.2	Aufgaben des technischen Betriebs von Wasserverteilungssystemen . .	26
2.3	Bestandteile der Instandhaltung	27
2.4	Prinzip der Energieerhaltung in einem Rohrleitungsabschnitt	29
2.5	Volumen- und Durchflussmessgeräte	31
2.6	Aufbau und Messprinzip eines Einstrahl- und Mehrstrahl-Flügelradzählers	32
2.7	Aufbau und Messprinzip von Woltmannzählern	33
2.8	Laufzeitverfahren und Varianten der Messanordnung bei der Ultraschalldurchflussmessung	35
2.9	Prinzip der kapazitiven Druckmessung	38
2.10	Kapazitive Pegelsonde mit Kommunikationseinheit	38
2.11	Vollständiges Messergebnis mit der abgeleiteten Messunsicherheit . .	39
2.12	Fehlergrenzen und Belastungsbereiche für den Zählertyp $Q_3=4 R80$.	42
2.13	Kennlinien eines Druckmessgeräts sowie Komponenten der Messabweichung bei der Druckmessung	46
2.14	Tarifarten und ihre unterschiedlichen Ausgestaltungen	49
2.15	Subventionen und ihre unterschiedlichen Ausgestaltungen	51
3.1	Reale Wasserverluste und deren Ursachen	56
3.2	Scheinbare Wasserverluste und deren Ursachen	61
3.3	Globale NRW-Niveaus	65
3.4	Wasserverlustzahlen in Deutschland	67
3.5	Wasserverlustzahlen in Indien	68
3.6	Komponenten des Wasserverlustmanagements	69
3.7	Einspeise- und Abgabemengen in einem Wasserversorgungssystem . .	72
3.8	IWA-Wasserbilanz	72
3.9	Komponentenanalyse	78
3.10	Beispiel einer Nachtmindestverbrauchs-messung	80
3.11	Bestimmung der optimalen ökonomischen Wasserverlusthöhe (ELL) am Beispiel von aktiver Leckkontrolle	89
3.12	Vier-Säulen-Konzept der Gegenmaßnahmen zur scheinbaren Wasserverlustreduktion	91
4.1	Bevölkerungsentwicklung und -prognose in Tiruvannamalai	98

4.2	Versorgungszonen sowie Lage der Pumpstationen und Speicherbehälter in Tiruvannamalai	100
4.3	Ausführungen von Hausinstallationen zur Wasserspeicherung	103
4.4	Vergleich der Verbrauchsganglinien in der intermittierenden und kontinuierlichen Versorgung	103
4.5	Kausalketten von Ursachen und Auswirkungen der intermittierenden Wasserverteilung	106
4.6	Schematischer Vergleich der Versorgungsdrücke in der kontinuierlichen und intermittierenden Wasserverteilung	109
5.1	Modifikationen der IWA-Wasserbilanz	117
5.2	Angepasste Wasserbilanz	119
5.3	Mögliche Szenarien bezüglich des Verhältnisses von Q_{RW} und Q_{BS}	121
5.4	Verteilung der Rohrnetzabgabe in der Grundgesamtheit sowie der Stichprobenmittelwerte	126
5.5	Standardform der Normalverteilung sowie Konfidenzintervalle von Stichprobenmittelwerten	126
5.6	Ziehung einer geschichteten Zufallsstichprobe	130
5.7	Versuchsaufbau und Messkonzeption	134
5.8	Druck- und Durchflussverlauf der exemplarischen Messung	135
5.9	Messabweichung in Abhängigkeit vom Luftvolumen und Druck für die Messreihen A und B bei trockener Messkapsel	139
5.10	Messabweichung in Abhängigkeit vom Luftvolumen für die Messreihen A und B sowie theoretische Messabweichung für Messreihe B bei trockener Messkapsel	139
5.11	Monitoringkonzept am Wasserturm THESR	143
5.12	Vorgehen zur Ermittlung der Bilanzkomponente <i>Flat-Rate Billed Authorised Supply</i> Q_{BS}	145
5.13	Monitoringsystem für die Bilanzkomponenten <i>Consumption</i> Q_{BSC} und <i>Wastage</i> Q_{BSW} im Kundenbereich	150
6.1	Wasserverteilungssystem des Pilotgebiets	156
6.2	Bebauung im Pilotgebiet	157
6.3	Öffentliche Zapfstelle	157
6.4	Grundtank	157
6.5	Dachtank	157
6.6	Ergebnisse des Haushaltssurveys im Pilotgebiet	160
6.7	Woltmannzähler am Zulauf des THESR	162
6.8	Wasserstandmessgerät im THESR	162
6.9	USD an der AOL-Leitung	162
6.10	Messsensoren an der AOL-Leitung	162
6.11	Installation eines Wasserzählers	164
6.12	Wasserzähler inkl. Datenlogger am Auslauf eines Dachtanks	164
6.13	Zerstörter Wasserzähler aufgrund Verkehrslast	164

6.14	Gefluteter Wasserzähler	164
6.15	Schulung eines lokalen Mitarbeiters	166
6.16	Auslesung eines Kundenwasserzählers mit Datenlogger	166
6.17	Datenverfügbarkeit über die Projektlaufzeit	167
6.18	Systemeinspeisung in das Leitungsnetz AOL	168
6.19	Lage, ID sowie gemessene Rohrnetzabgabe Q_{BS} der Stichproben- Hausanschlüsse	169
6.20	Wasserstandkurven bei Einspeisung in die Subzonen 5LE und 5UW .	171
6.21	Gefäß zur häuslichen Wasserentnahme	172
6.22	Verbrauchsprotokoll	172
6.23	<i>Real Losses</i> Q_{RLT} durch Überläufe des Wasserturms THESR	174
6.24	Ergebnisse der angepassten Wasserbilanz für das Pilotgebiet	175
6.25	Wasserverschwendung durch geöffneten Hahn und Tanküberlauf . . .	175
6.26	Zeitliche Entwicklung von Q_{SIV} und Q_{BS} über die Projektlaufzeit . .	179
6.27	Demonstration des angepassten Monitoringsystems	183

Tabellenverzeichnis

2.1	Verfahren der Trinkwasseraufbereitung	18
2.2	Rohrverbindungen und ihre Anforderungen	23
2.3	Vor- und Nachteile verschiedener Bauformen von Wasserzählern	33
2.4	Beispiele für Baugrößen und Genauigkeitsklassen von Wasserzählern	41
3.1	Übersicht der wichtigsten Daten für die Wasserverlustanalyse	70
3.2	Kennzahlen zur Bewertung der Wasserverlustkomponenten	84
5.1	Übersicht der Versuchsparameter	138
6.1	Rohrleitungsdaten des Verteilungssystems	157
6.2	Ergebnisse der Stichprobenverfahren zur Schätzung von Q_{BS}	170
6.3	Messabweichung durch Luftströmung E_{air} im Bilanzzeitraum	172
6.4	Kombinierte Messunsicherheiten der ermittelten Wasserverluste	178

Abkürzungsverzeichnis

5LE	Subzone ‚Lower East‘ der Versorgungszone 5 im Projektgebiet
5UW	Subzone ‚Upper West‘ der Versorgungszone 5 im Projektgebiet
ADB	Asian Development Bank
AMR	Automatische Zählerablesung (englisch: <i>Automatic Meter Reading</i>)
AOL	Leitungsnetz ‚Anna Nagar Overflow Line‘ im Projektgebiet
AWWA	American Water Works Association
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DMA	District Metered Area
DORSCH	Dorsch International Consultants GmbH
DP	Systembetriebsdruck (englisch: <i>Design Pressure</i>)
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DN	Nenndurchmesser (englisch: <i>Diameter Nominal</i>)
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
EZ	Entwicklungszusammenarbeit
ELL	Economic Level of Leakage
ELAL	Economic Level of Apparent Losses
GIS	Geoinformationssystem
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH
GWFA	Global Water Franchise Agency GmbH
ID	Innendurchmesser (englisch: <i>Inner Diameter</i>)
IDM	Magnetisch-induktives Durchflussmessgerät
IEEM	Institut für Umwelttechnik und Management an der Universität Witten/Herdecke gGmbH
INR	Indische Rupie, Landeswährung
IWA	International Water Association
IWG	Institut für Wasser und Gewässerentwicklung des KIT
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
lpcd	Liter pro Kopf und Tag (englisch: <i>liters per capita per day</i>)
MDP	höchster Systembetriebsdruck (englisch: <i>Maximum Design Pressure</i>)
MID	Europäische Messgeräte-richtlinie (englisch: <i>Measuring Instruments Directive</i>)
mÜNN	Meter über Normalnull

NRW	nicht in Rechnung gestellte Wassermenge (englisch: <i>Non-revenue Water</i>)
OD	Außendurchmesser (englisch: <i>Outer Diameter</i>)
PE	Polyethylen (Rohrleitungswerkstoff)
PVC	Polyvinylchlorid (Rohrleitungswerkstoff)
SebaKMT	Seba Dynatronic Mess- und Ortungstechnik GmbH
SP	Versorgungsdruck (englisch: <i>Service Pressure</i>)
THESR	Wasserturm ‚Thamarai Nagar Elevated Storage Reservoir‘ im Projektgebiet
TNUDF	Tamil Nadu Urban Development Fund
TWAD	Tamil Nadu Water Supply and Drainage
UFR	Vorrichtung zur Reduktion ungemessener Durchflüsse (englisch: <i>Unmeasured Flow Reducer</i>)
UN	Vereinte Nationen (englisch: <i>United Nations</i>)
UNICEF	UN Kinderhilfswerk (englisch: <i>United Nations International Children’s Emergency Fund</i>)
ULB	lokale Administrationsbehörden in indischen Städten (englisch: <i>Urban Local Bodies</i>)
USD	Ultraschall-Durchflussmessgerät
WaLUE	Akronym des vom BMBF geförderten Verbundprojekts <i>Water Losses in Urban Environment</i> : Entwicklung und Demonstration eines Technologie-basierten Geschäftsmodells zum nachhaltigen Management der Wasserverluste im urbanen Umfeld am Beispiel der EZ-finanzierten Wasserbetriebe Stadt Tiruvannamalai
WHO	Weltgesundheitsorganisation (<i>englisch: World Health Organization</i>)
WILO	WILO SE (Pumpenhersteller)
WS	Wassersäule
WZ	Wasserzähler

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	$[m^2]$	Querschnittsfläche
ALI	$[-]$	<i>Apparent Losses Index</i>
c	$[-]$	Dimensionsloser Leckagekoeffizient
$CAAL$	$[\%]$	<i>Current Annual Apparent Losses</i>
$CARL$	$[l/AL/d]$	<i>Current Annual Real Losses</i>
E_{Air}	$[l]$	Messabweichung eines Wasserzählers durch Luftströmung
$Fi46$	$[\%]$	Nicht in Rechnung gestellte Wassermenge
$Fi47$	$[\%]$	Kosten der nicht in Rechnung gestellten Wassermenge
g	$[m/s^2]$	Erdbeschleunigung
h	$[m]$	Druckhöhe/Druckdifferenz
$h_{v,k}$	$[m]$	Kontinuierliche Verlusthöhe
$h_{v,\ddot{o}}$	$[m]$	Örtliche Verlusthöhe
ILI	$[-]$	<i>Infrastructure Leakage Index (Op 29)</i>
L	$[m]$	Länge
N	$[-]$	Grundgesamtheit
n	$[-]$	Stichprobenumfang
$Op25$	$[l/AL/d]$	Scheinbare Wasserverluste je Anschlussleitung
$Op26$	$[l/km/d]$	Scheinbare Wasserverluste je Leitungslänge
$Op27$	$[l/AL/d]$	Reale Wasserverluste je Anschlussleitung
$Op28$	$[l/km/d]$	Reale Wasserverluste je Leitungslänge
p	$[bar]$	Druck
q	$[m^3/s]$	Leckrate
q_{VR}	$[m^3/km/h]$	Spezifische reale Wasserverluste
Q	$[m^3/h]$	Durchfluss
Q_{AL}	$[m^3/a]$	<i>Apparent Losses</i>
Q_{ALC}	$[m^3/a]$	<i>Unauthorised Consumption</i>
Q_{BNRW}	$[m^3/a]$	<i>Billed Non-Revenue Water</i>
Q_{BS}	$[m^3/a]$	<i>Flat-Rate Billed Authorised Supply</i>
Q_{BSC}	$[m^3/a]$	<i>Consumption</i>
Q_{BSW}	$[m^3/a]$	<i>Wastage</i>
Q_{ERW}	$[m^3/a]$	<i>Excess Revenue Water</i>
Q_{GTC}	$[m^3/a]$	<i>Ground Tank Consumption</i>
Q_L	$[m^3/a]$	<i>Water Losses</i>

Q_{NMV}	$[m^3/h]$	Nachtmindestverbrauchsmenge
Q_{NRW}	$[m^3/a]$	<i>Non-Revenue Water</i>
Q_{Rest}	$[m^3/h]$	Restverbrauchsmenge bei Nachtmindestverbrauch
Q_{RL}	$[m^3/a]$	<i>Real Losses</i>
Q_{RLC}	$[m^3/a]$	<i>Leakage on Service Connections up to the point of Customer Metering</i>
Q_{RLM}	$[m^3/a]$	<i>Leakage on Transmission and Distribution Mains</i>
Q_{RLT}	$[m^3/a]$	<i>Leakage and Overflows at Storage Tanks</i>
Q_{RTC}	$[m^3/a]$	<i>Roof Tank Consumption</i>
Q_{RW}	$[m^3/a]$	<i>Revenue Water</i>
Q_{SIV}	$[m^3/a]$	<i>System Input Volume</i>
$Q_{VR,max}$	$[m^3/h]$	Maximale reale Wasserverlustmenge bei Nachtmindestverbrauch
$RAAL$	$[\%]$	<i>Reference Annual Apparent Losses</i>
s^2	$[-]$	Stichprobenvarianz
SP_m	$[m]$	Mittlerer Versorgungsdruck
SP_{NMV}	$[m]$	Versorgungsdruck bei Nachtmindestverbrauch
t	$[s]$	Zeitpunkt
$UARL$	$[l/AL/d]$	<i>Unavoidable Annual Real Losses</i>
v	$[m/s]$	Fließgeschwindigkeit
V	$[l]$	Volumen
X	$[-]$	Zufallsvariable
x_i	$[-]$	Realisierung eines Merkmalsträgers
X_i	$[-]$	Merkmalsträger
z	$[m]$	Geodätische Höhe
α	$[-]$	Dimensionsloser Leckageexponent
ζ	$[-]$	Dimensionsloser, örtlicher Verlustbeiwert
λ	$[-]$	Dimensionslose Rohrreibungszahl
μ	$[-]$	Mittelwert
μ_A	$[-]$	Dimensionsloser Austrittskoeffizient
ρ	$[kg/m^3]$	Dichte
σ	$[-]$	Standardabweichung
σ^2	$[-]$	Varianz

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Die Versorgung mit Trinkwasser in ausreichender Menge und einwandfreier Qualität zu jeder Zeit in den eigenen vier Wänden oder am Arbeitsplatz ist für viele Menschen, gerade in entwickelten Ländern, eine Selbstverständlichkeit. Dabei wird oft übersehen, welche Bedingungen und ein enormer Aufwand gegeben sein müssen, um diese Qualität und Quantität der Versorgung zu gewährleisten und dauerhaft aufrecht zu halten. Neben der ausreichenden Verfügbarkeit nutzbarer Wasservorkommen sind in Deutschland beispielsweise der institutionelle Rahmen mit klar definierten Gesetzen und Verordnungen, die wirtschaftlichen Bedingungen u.a. durch das Prinzip der Kostendeckung sowie hohe technische Standards und Regeln für eine nachhaltige und flächendeckende Wasserversorgung gegeben (ATT u. a., 2015). Sind dagegen aus verschiedensten Gründen die Bedingungen nicht gegeben und der technische Aufwand nicht leistbar, ist oft eine mangelhafte Wasserversorgung mit zum Teil gravierenden Auswirkungen auf die betroffene Bevölkerung die Folge. Laut dem jüngsten Bericht des weltweiten Monitoring-Programms der Weltgesundheitsorganisation WHO und dem Kinderhilfswerk der Vereinten Nationen UNICEF haben immer noch ca. 785 Millionen Menschen keinen gesicherten Zugang zu einer Grundversorgung mit sauberem Trinkwasser (UNICEF und WHO, 2019). Damit ist das von der UN Vollversammlung im Jahr 2010 als Menschenrecht bestätigte „Recht auf einwandfreies und sauberes Trinkwasser und Sanitärversorgung“ für knapp 10 % der Weltbevölkerung nach wie vor nicht sichergestellt (UN, 2010).

Ein entscheidender Mangel ist die intermittierende Betriebsweise von Wasserverteilungssystemen, die vor allem Schwellen- und Entwicklungsländer betrifft. Dabei werden die für eine kontinuierliche Betriebsweise ausgelegten Verteilungssysteme lediglich in begrenzten Zeitabständen mit Wasser beschickt. Die Gründe für diese Betriebsweise sind vielfältig und stehen untereinander oft in Wechselwirkung (Klingel, 2010). Zunächst sind die erschließbaren Wasserressourcen limitiert und naturräumlich ungleich verteilt. Die Limitation wird durch den Klimawandel sowie anthropogene Eingriffe wie Gewässerverschmutzung und Wasserverschwendung noch verstärkt. Der aktuelle Risikobericht des Weltwirtschaftsforums zählt die zunehmende Wasserknappheit zu den gravierendsten Gefahren der Weltgemeinschaft (WEF, 2019). Weitere Faktoren sind das hohe Bevölkerungswachstum sowie die zunehmende Urbanisierung. Mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung lebt derzeit in städtischen Gebieten. Allein in Indien wird sich bis zum Jahr 2050 die urbane Bevölkerung von derzeit ca. 410 auf 814 Millionen Menschen nahezu verdoppeln (UN, 2014). Die-

1 Einleitung

ser Trend stellt die Wasserversorgung aufgrund des enormen Anstiegs des Wasserbedarfs und gleichzeitig limitierten Wasserdargebots vor große Herausforderungen. Sind dann die institutionellen, technischen und wirtschaftlichen sowie soziokulturellen Voraussetzungen zur Bewältigung dieser Herausforderungen nicht gegeben, sind oft eine ungeplante und defizitäre Infrastruktur gepaart mit fehlendem technischen und kaufmännischen (Fach-)Wissen und somit eine intermittierende Wasserversorgung die Folge (Schlüter, 2006; Van der Bruggen u. a., 2009).

Hohe Wasserverluste sind ein Indikator und zugleich Ursache und Auswirkung einer intermittierenden Wasserversorgung. Laut einer Schätzung der Weltbank gehen weltweit allein in den Entwicklungsländern täglich 45 Millionen Kubikmeter Trinkwasser aufgrund von Leckagen in den Versorgungssystemen verloren (Kingdom u. a., 2006). Damit könnte mindestens die Hälfte der oben genannten Bevölkerungsgruppe, die derzeit keinen gesicherten Zugang zu sauberem Trinkwasser hat, mit der von der WHO empfohlenen Mindestmenge von 50 bis 100 Litern pro Kopf und Tag (englisch: *liter per capita per day*, lpcd) zur Erfüllung der menschlichen Grundbedürfnisse versorgt werden (Howard und Bartram, 2003). Doch zu der Gesamtmenge der Wasserverluste zählen nicht nur die Verluste durch Leckagen, sondern auch die zu den Verbrauchern gelieferten Wassermengen, die aufgrund von fehlenden oder fehlerbehafteten Messeinrichtungen, illegalen Anschlüssen und Korruption nicht vom Wasserversorger abgerechnet werden können und somit zu weiteren finanziellen Verlusten führen. Die Weltbank schätzt diese Verlustmenge in Entwicklungsländern auf ca. 29 Millionen Kubikmeter pro Tag (Kingdom u. a., 2006).

Die hohen Wasserverluste führen zu geringeren Einnahmen des Versorgers, gleichzeitig wird zur Deckung des Wasserbedarfs oftmals in zusätzliche Wassergewinnungs- und Verteilungsanlagen mit hohen Kapital- und Betriebskosten investiert, sodass wiederum keine finanziellen Mittel zur Bekämpfung des Kerns des Problems, den hohen Wasserverlusten, vorhanden sind (Frauendorfer und Liemberger, 2010). Obwohl die Einführung eines effizienten und nachhaltigen Wasserverlustmanagements als Grundvoraussetzung zur Durchbrechung des beschriebenen „Teufelskreises“ anerkannt ist, sind viele Wasserversorger weiterhin darin gefangen. Die Gründe hierfür sind u.a. das fehlende Bewusstsein für das Potential der aktiven Wasserverlustreduktion sowie das Unterschätzen der technischen Herausforderungen und die Komplexität eines nachhaltigen Wasserverlustmanagements (Frauendorfer und Liemberger, 2010). Oftmals fehlen aber auch schlicht die politischen, institutionellen, wirtschaftlichen und technischen Voraussetzungen zur Umsetzung der etablierten Methoden des Wasserverlustmanagements, die für die in Industrienationen gegebenen Randbedingungen konzipiert wurden und daher zum Teil nur bedingt direkt anwendbar für viele Wasserversorgungssysteme in Entwicklungs- und Schwellenländern sind.

Beispielhaft für diese Methoden steht die Wasserverlustbilanzierung als Grundlage der Wasserverlustanalyse. Diese Analyse ist „der entscheidende erste Schritt“ für ein an die spezifischen Charakteristika und Bedürfnisse eines Versorgungsunternehmens angepasstes Wasserverlustmanagement (EPA, 2010). Hauptziel ist dabei die möglichst genaue Quantifizierung der Wasserverlustmengen sowie die Analyse der Ursachen und Auswirkungen der Verluste. Dazu werden im Rahmen der Wasser-

verlustbilanzierung alle Wassermengen, die bei einem Versorgungssystem in einem definierten Betrachtungszeitraum eingespeist oder entnommen werden, in einer Wasserbilanz in tabellarischer Form dargestellt.

Die von der International Water Association (IWA) im Jahr 2000 erarbeitete standardisierte Bilanz ist in weiten Teilen der Welt anerkannt und wird von internationalen Organisationen wie der Weltbank, Asian Development Bank (ADB) oder der Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) empfohlen und aktiv gefördert (Kingdom u. a., 2006; Frauendorfer und Liemberger, 2010; GIZ, 2011). Jedoch ist in zahlreichen Wasserverteilungssystemen, vor allem in Entwicklungs- und Schwellenländern, die schlüssige Anwendung der IWA-Methodik aufgrund limitierender Randbedingungen wie einer intermittierenden Betriebsweise nicht möglich. Zudem adressiert die IWA-Bilanz nicht oder nur bedingt zusätzliche Komponenten der Wasserverluste in derartigen Verteilungssystemen, wie z.B. die Wasserverschwendung im häuslichen Bereich.

1.2 Zielsetzung und Ansatz

Unabhängig von den gegebenen Randbedingungen sollte ein effektives Wasserverlustmanagement integraler Bestandteil des Betriebs eines jeden Wasserversorgungssystems sein. Daher lässt sich anhand der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Ausgangssituation die Zielsetzung dieser Arbeit durch folgende Forschungsfrage formulieren:

Wie kann die international etablierte Methodik der Wasserverlustbilanzierung für die schlüssige Anwendung in intermittierend betriebenen Verteilungssystemen angepasst werden, um die Versorgungsunternehmen bei der Analyse der Wasserverlustsituation in diesen Systemen zu unterstützen?

Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung einer angepassten Wasserverlustbilanzierung, wobei das grundlegende Prinzip und die Ausgestaltung der IWA-Wasserbilanz aufgrund der standardisierten und klaren Form sowie der internationalen Akzeptanz beibehalten werden soll. Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass einerseits die Anwender die Wasserverlustbilanzierung zielführend durchführen und die Verlustkomponenten, die in intermittierend betriebenen Verteilungssystemen typisch sind, ermitteln und bewerten können. Andererseits werden die Anwender mit dem Konzept der international etablierten Methodik der IWA vertraut. Dies ist insbesondere wichtig, da auf langfristige Sicht das Ziel jedes Versorgungsunternehmens sein sollte, eine kontinuierliche Versorgung einzuführen. Ist dieses Ziel erreicht, kann die für diese Betriebsweise entwickelte IWA-Wasserbilanz schlüssig angewandt werden.

Angesichts der weltweiten Verbreitung der intermittierenden Versorgung, von der nach jüngsten Schätzungen ca. 1,3 Milliarden Menschen betroffen sind, ist jedoch ein hoher Bedarf angepasster Lösungen gegeben (Charalambous und Lapidou, 2017). Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte, angepasste Wasserverlustbilanzierung soll

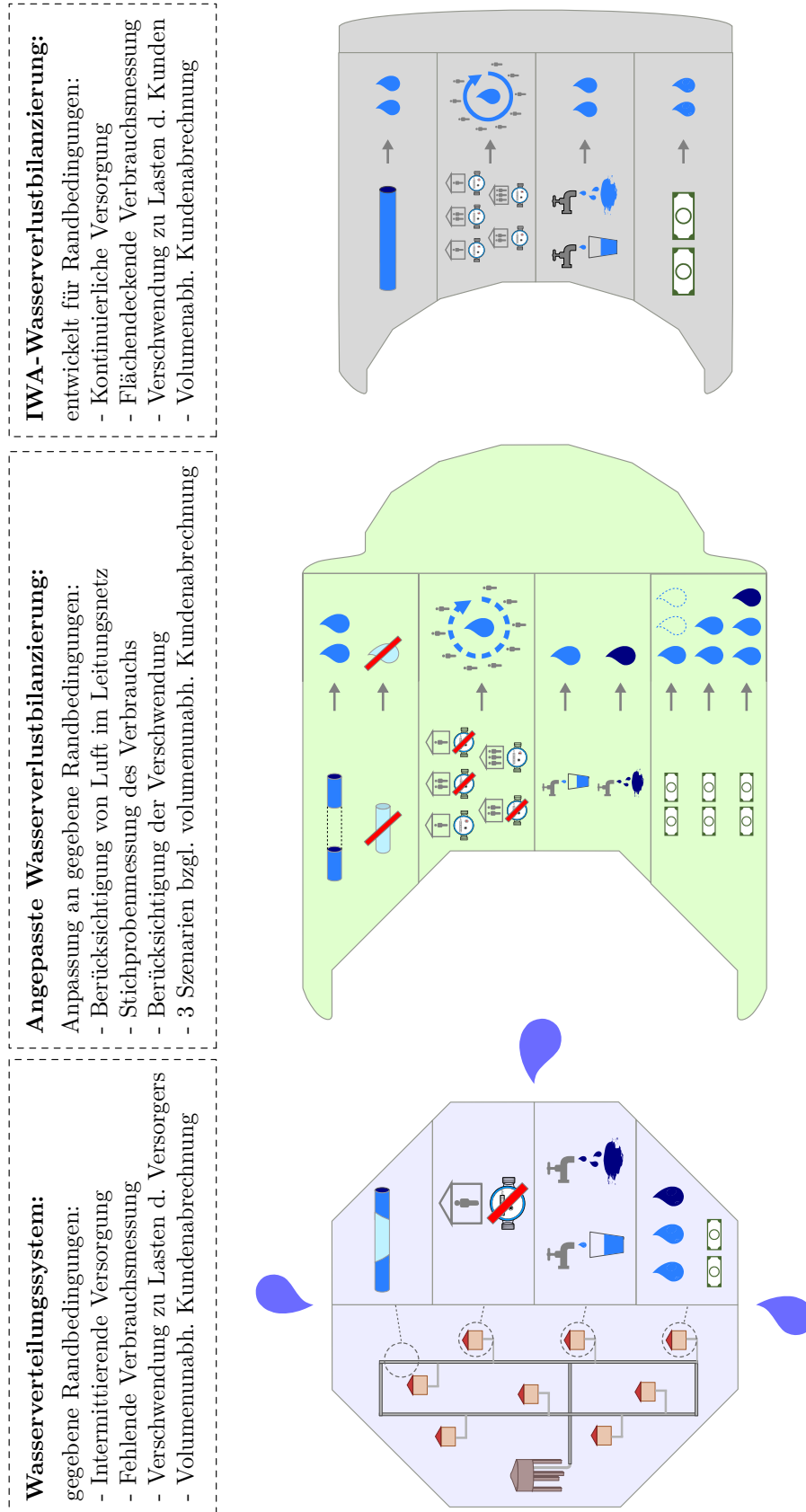


Abbildung 1.1: Veranlassung und Ansatz der angepassten Methodik zur Wasserverlustbilanzierung

als Bindeglied zwischen intermittierend betriebenen Verteilungssystemen mit den typischen Randbedingungen auf der einen Seite und der für die kontinuierliche Versorgung entwickelten IWA-Methodik fungieren. Dies wird in Abbildung 1.1 veranschaulicht.

Um die Anwendbarkeit der entwickelten Methodik in der Praxis zu testen, erfolgt deren pilothafte Umsetzung im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekts *WaLUE* (Water Losses in Urban Environment), das in der Stadt Tiruvannamalai im Süden Indiens umgesetzt wurde (siehe Abschnitt 1.3). Das intermittierend betriebene Wasserverteilungssystem dieser mittelgroßen Stadt (ca. 150.000 Einwohner) weist die typischen Randbedingungen in Entwicklungs- und Schwellenländern auf, aufgrund derer die zielführende Anwendbarkeit der IWA-Wasserbilanz nicht gegeben ist. Die Ergebnisse der pilothaften Umsetzung werden in dieser Arbeit analysiert und hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf andere intermittierend betriebene Wasserverteilungssysteme diskutiert und bewertet.

Zusammenfassend beinhaltet der im Rahmen dieser Arbeit gewählte Lösungsansatz zur Entwicklung einer angepassten Wasserverlustbilanzierung in intermittierend betriebenen Wasserverteilungssystemen die folgenden Aspekte:

- *Identifikation der Randbedingungen* intermittierend betriebener Wasserverteilungssysteme, deren limitierender Einfluss die schlüssige Anwendbarkeit der IWA-Wasserbilanz verhindert
- *Anpassung der IWA-Wasserbilanz* unter Berücksichtigung der limitierenden Randbedingungen und der relevanten Wasserverlustkomponenten in intermittierend betriebenen Verteilungssystemen
- *Entwicklung und Anpassung von Verfahren* zur Ermittlung der einzelnen Bilanzkomponenten
- *Pilothafte Umsetzung der entwickelten Methodik* im Rahmen des Verbundprojekts *WaLUE* in der indischen Stadt Tiruvannamalai

1.3 Das WaLUE-Verbundprojekt

Das Verbundprojekt (Förderkennzeichen: 02WCL1300) wurde basierend auf den Ergebnissen einer vorgeschalteten Bedarfsanalyse initiiert, bei der die Gründe einer unzureichenden Wasserversorgung in vielen indischen Städten, insbesondere im südindischen Bundesstaat Tamil Nadu, identifiziert wurden. Dazu zählen das vor allem im urbanen Raum starke Bevölkerungswachstum sowie das wirtschaftliche Wachstum und ein verbesserter Lebensstandard, die einen signifikanten Anstieg des Wasserbedarfs zur Folge haben. Dieser gesteigerten Wassernachfrage stehen fehlende Investitionen, die schleppende Umsetzung von Infrastrukturprojekten in der Wasserversorgung, ein mangelhafter Betrieb und Wartung der Versorgungssysteme

1 Einleitung

sowie eine zunehmende Kontamination der regionalen Wasserressourcen gegenüber. Dies führt zu einem Engpass in der Wasserversorgung, den die indische Regierung durch die Schaffung einer nachhaltigen Wasserversorgungsinfrastruktur beseitigen möchte. Ein wichtiges Ziel dabei ist die Reduktion der hohen Wasserverluste in der bestehenden Netzinfrastruktur.

Das Ziel des *WaLUE*-Projekts war daher die Entwicklung eines geschlossenen Lösungskonzepts zur Wasserverlustreduzierung für städtische Versorgungsbetriebe in Indien. Dazu sollten die etablierten Methoden und Technologien des Wasserverlustmanagements an die in diesen Versorgungssystemen vorherrschenden Randbedingungen angepasst werden. Des Weiteren sollte ein Geschäftsmodell zur nachhaltigen Sicherung eines zuverlässigen Betriebs für die Rentabilität und Finanzierbarkeit des entwickelten Wasserverlustmanagements ausgearbeitet werden. Für die pilothafte Implementierung und Demonstration des entwickelten Konzepts in der Praxis wurde die Stadt Tiruvannamalai (ca. 150.000 Einwohner) im Bundesstaat Tamil Nadu ausgewählt (Rudolph u. a., 2019).

Das *Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG)* des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) war mit seiner Abteilung Wasserversorgungsnetze für die Entwicklung und Demonstration einer Methodik zur Erhebung und Bewertung von Wasserverlusten unter Berücksichtigung der für indische Städte relevanten Randbedingungen zuständig. Die entwickelte Methodik, die Gegenstand dieser Arbeit ist, war Teil der Arbeitspakete zur Bestandsaufnahme und Ist-Analyse der aktuellen Wasserverlustsituation in Tiruvannamalai im Rahmen des Verbundprojekts. Die Laufzeit des *IWG*-Teilprojekts war von Juni 2013 bis Mai 2017.

Neben dem *IWG* waren zahlreiche Wissenschafts- und Industriepartner aus Deutschland und Indien an dem Verbundprojekt beteiligt. Das *Institut für Umwelttechnik und Management (IEEM)* an der Universität Witten/Herdecke gGmbH als Projektinitiator und -koordinator war für die Entwicklung des Betriebsmodells als Teil des Geschäftsmodells zum nachhaltigen Wasserverlustmanagement zuständig. Das zugehörige Finanzmodell wurde vom Industriepartner *Global Water Franchise Agency GmbH (GWFA)* entwickelt. Die involvierten Industriepartner für die Anpassung von Methoden und Technologien zur Wasserverlustreduktion waren der Planungs- und Beratungskonzern *Dorsch International Consultants GmbH (DORSCH)*, der Mess- und Leckortungstechnik-Hersteller *Seba Dynatronie Mess- und Ortungstechnik GmbH (SebaKMT)* sowie der Pumpenhersteller *WILO SE (WILO)*. *DORSCH* war für die Entwicklung einer Wasserverlustreduktionsstrategie und eines angepassten Infrastrukturmanagements zuständig, während *SebaKMT* an der Entwicklung und pilothaften Umsetzung einer angepassten Vorgehensweise zur Leckortung und *WILO* an der Optimierung des Betriebs einer Pumpanlage hinsichtlich der Energieeffizienz und Wasserverlustreduktion arbeitete. Die Ergebnisse der jeweiligen Teilprojekte der Verbundpartner können den entsprechenden Abschlussberichten entnommen werden (Rudolph u. a., 2019; Kalinowski-Gausepohl und Block, 2017; Scheday und Kugler, 2018; Noß und Schuberth, 2017; Sheel u. a., 2017).

Aufgrund des Bedarfs an Messtechnik für die Umsetzung des vom IWG entwickelten Monitoringsystems zur angepassten Wasserverlustermittlung sowie der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Studie zum Messverhalten von Wasserzählern in der intermittierenden Wasserversorgung ergab sich darüber hinaus eine Zusammenarbeit mit dem Zählerhersteller *ZENNER International GmbH & Co. KG*.

Auf indischer Seite waren die Stadtverwaltung (Municipality) der Projektstadt Tiruvannamalai, der *Tamil Nadu Urban Development Fund (TNUDF)* sowie das *Centre for Environmental Studies* der Anna University in Chennai, Tamil Nadu, am Verbundprojekt beteiligt.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist in sieben Kapitel unterteilt, die sich thematisch drei übergeordneten Teilen zuordnen lassen. Im ersten Teil werden zunächst die erforderlichen Grundlagen hinsichtlich Wasserverteilungssystemen und Wasserverlusten vermittelt, um anschließend einen Überblick über den Stand der Wissenschaft und Technik bezüglich dem Wasserverlustmanagement zu geben. Abschließend werden am Fallbeispiel der indischen Projektstadt die Ursachen und Auswirkungen einer intermittierenden Betriebsweise von Wasserverteilungssystemen beleuchtet, die die zielgerichtete Anwendbarkeit der etablierten Methoden und Technologien des Wasserverlustmanagements limitieren. Darauf aufbauend wird im zweiten Teil der Arbeit die Konzeption und Entwicklung der angepassten Wasserverlustbilanzierung für intermittierend betriebene Verteilungssysteme dargestellt. Der dritte Teil beinhaltet die pilothafte Umsetzung sowie die Diskussion der Ergebnisse und der Übertragbarkeit der entwickelten Methodik. Entsprechend dieser thematischen Gliederung ergibt sich der im Folgenden dargestellte Aufbau der Arbeit.

In Kapitel 2 wird zunächst das Thema Wasserversorgung zur Bereitstellung von Wasser als menschliches Grundbedürfnis und Recht beleuchtet, da die Versorgung der Menschen mit ausreichenden und einwandfreien Trinkwassermengen als oberstes Ziel auch bei allen technischen Aspekten der Versorgung berücksichtigt werden muss. Anschließend werden die wesentlichen Grundlagen in Bezug zu Aufbau und Systemkonzepten sowie dem technischen Betrieb von Wasserversorgungs- und Verteilungssystemen vermittelt. Die Kenntnis dieser Grundlagen dient dem Verständnis der Entstehung sowie der Ermittlung und Bewertung von Wasserverlusten in den betrachteten Systemkomponenten. Aufgrund der Relevanz für die entwickelte Methodik zur Wasserverlustermittlung und -bewertung werden abschließend die Themen Wassermengen- und Druckmessung sowie Wassertarife behandelt.

Kapitel 3 gibt einen umfassenden Überblick über das Thema Wasserverlustmanagement. Zunächst werden die unterschiedlichen Erscheinungsformen von Wasserverlusten sowie deren Ursachen und Auswirkungen erläutert. Anschließend werden die drei Komponenten Wasserverlustanalyse, Gegenmaßnahmen und Evaluation eines effizienten Wasserverlustmanagements vorgestellt. Dabei wird insbesondere auf das international etablierte Verfahren der IWA-Wasserbilanz eingegangen, die im

1 Einleitung

Rahmen dieser Arbeit für die Anwendung in intermittierend betriebenen Wasserverteilungssystemen angepasst wurde.

Um die Charakteristika intermittierend betriebener Verteilungssysteme besser zu verstehen, werden diese am Fallbeispiel der indischen Stadt Tiruvannamalai in Kapitel 4 vorgestellt. Dabei wird insbesondere auf die Ursachen und Auswirkungen der intermittierenden Betriebsweise sowie auf deren Wechselbeziehung mit den Wasserverlusten in derartigen Systemen eingegangen. Abschließend wird angesichts der weltweiten Verbreitung der intermittierenden Wasserverteilung der Bedarf angepasster Lösungen für einen verbesserten Betrieb und Instandhaltung dieser Systeme herausgestellt.

In Kapitel 5 wird die entwickelte Methodik der angepassten Wasserverlustbilanzierung erläutert. Dazu werden zunächst in Referenz zum vierten Kapitel die limitierenden Randbedingungen intermittierend betriebener Verteilungssysteme identifiziert, welche die schlüssige Anwendung der IWA-Wasserbilanz verhindern. Anschließend wird die Konzeption und Entwicklung der angepassten Wasserbilanz sowie der Verfahren zur Ermittlung der Bilanzkomponenten beschrieben, die diese Randbedingungen berücksichtigen und somit eine zielgerichtete Analyse der aktuellen Wasserverlustsituation unterstützen.

Um die Anwendbarkeit der entwickelten Methodik unter realen Bedingungen zu erproben, wurde diese in einem Versorgungsgebiet der Stadt Tiruvannamalai pilothaft umgesetzt. Kapitel 6 gibt diesbezüglich zunächst einen Überblick über das Pilotgebiet und beschreibt das vor Ort implementierte Monitoringsystem zur kontinuierlichen Datenerfassung. Anschließend werden die anhand der gewonnenen Daten ermittelten Ergebnisse der angepassten Wasserverlustbilanzierung für das Pilotgebiet dargestellt. Zum Abschluss werden die Ergebnisse sowie die Übertragbarkeit der angepassten Wasserverlustbilanzierung diskutiert.

Kapitel 7 enthält die Zusammenfassung der vorausgegangenen Kapitel sowie der wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit. Außerdem wird ein Ausblick auf künftige Forschungs- und Entwicklungsaufgaben gegeben.

Ein Teil der Ausführungen in den Kapiteln 5 und 6 wurde bereits im *IWG-Schlussbericht* für das *WaLUE*-Projekt (Nestmann u. a., 2017) sowie in den folgenden Veröffentlichungen publiziert:

- Mastaller, M. und Nestmann, F. (2020): Angepasstes Wasserverlustmonitoring in der intermittierenden Wasserversorgung. In: *Interdisziplinärer Wasserbau im digitalen Wandel. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen* 63, 275-284.
- Mastaller, M. und Klingel, P. (2018): Application of a water balance adapted to intermittent water supply and flat-rate tariffs without customer metering in Tiruvannamalai, India. In: *Water Science and Technology: Water Supply* 18(1), 347-356.

- Mastaller, M. und Klingel, P. (2017): Adapting the IWA water balance to intermittent water supply and flat-rate tariffs without customer metering. In: *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development* 7(3), 396-405.
- Walter, D., Mastaller, M. und Klingel, P. (2016): Genauigkeit von Einstrahl-Flügelradzählern bei Füllung des Rohrnetzes in der intermittierenden Wasserversorgung. In: *gwf-Wasser/Abwasser* 157(12), 1125-1134.

2 Wasserverteilungssysteme

2.1 Überblick

In diesem Kapitel wird zunächst das Thema Wasserversorgung zur Bereitstellung ausreichender und einwandfreier Trinkwassermengen als Grundbedürfnis und Recht der Menschen in Abschnitt 2.2 beleuchtet. Diese essentielle Aufgabe ist auch stets bei allen technischen Aspekten der Wasserversorgung wie der Planung und dem Betrieb von Versorgungssystemen zu berücksichtigen. Die technischen Aspekte werden in den darauffolgenden Abschnitten behandelt, beginnend mit den Grundlagen bezüglich den Komponenten und Konzepten von Wasserversorgungs- und verteilungssystemen in den Abschnitten 2.3 und 2.4. Die Kenntnis von Aufbau und Funktionsweisen der Systeme ist für das Verständnis der Entstehung und Zusammensetzung der Wasserverluste sowie deren Ermittlung und Bewertung innerhalb eindeutig festgelegter Systemgrenzen unerlässlich. Abschnitt 2.5 gibt anschließend einen Überblick über die Aufgaben des technischen Betriebs sowie die Betriebsweise von Wasserverteilungssystemen. Eine der Hauptaufgaben des technischen Betriebs ist die Minimierung von Wasserverlusten, auf deren Höhe u.a. die Betriebsweise der Verteilungssysteme entscheidenden Einfluss hat. Abschließend werden in den Abschnitten 2.6 und 2.7 die Themen Wassermengen- und Druckmessung sowie Wassertarife aufgrund ihrer Relevanz für die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methodik zur Wasserverlustermittlung und -bewertung behandelt.

2.2 Wasserversorgung: Bereitstellung von Wasser als menschliches Grundbedürfnis und Recht

Die Versorgung mit sauberem Trinkwasser wird heutzutage in vielen Teilen der Welt als Selbstverständlichkeit angesehen. Unbestritten ist das Medium Wasser wie das Medium Luft von existentieller Bedeutung und die Grundlage für das menschliche Leben. Bis in die jüngste Vergangenheit wurde die Verfügbarkeit und Zugänglichkeit von Wasser zur Befriedigung des Grundbedürfnisses aller Menschen als gegeben erachtet (Winkler, 2012). Erst ab den 1970er Jahren wuchs das Bewusstsein einer globalen Wasserkrise, in der immer mehr Menschen keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser hatten. Dabei wurden die Stimmen lauter, Wasser nicht nur als menschliches Grundbedürfnis, sondern eben auch als Menschenrecht anzuerkennen. Mit dieser Anerkennung hätte jeder Mensch das Recht auf eine angemessene Versorgung und den Zugang zu sauberem Trinkwasser und könnte die Erfüllung die-

ses Rechts fordern. Doch obwohl die internationale Gemeinschaft grundsätzlich die Notwendigkeit eines Menschenrechts auf Wasser erkannt hat, ist dieses nach wie vor nicht explizit in den allgemeinen, rechtlich bindenden Menschenrechtsabkommen der internationalen Gemeinschaft formuliert (Murthy, 2013).

Grund dafür ist die seit Jahrzehnten andauernde Diskussion in der globalen (Wasser-)Politik über die Herleitung, inhaltliche Ausgestaltung und Implementierung eines solchen Menschenrechts. Ein Gegenstand der Diskussionen waren zunächst die unterschiedlichen Betrachtungsweisen des Mediums Wasser: Einerseits das öffentliche und soziale Gut Wasser, das für alle Menschen in ausreichender Menge und angemessener Qualität verfügbar sein sollte, andererseits das limitierte und ökonomische Gut Wasser mit einem entsprechenden Preis. So stellen internationale Organisationen wie die Vereinten Nationen (UN) und Zivilgesellschaften die soziale Betrachtungsweise in den Vordergrund, während sich internationale und nationale Unternehmen, aber auch Organisationen wie die Weltbank, für die Kommerzialisierung und Privatisierung des Wassersektors einsetzen (Siebert, 2014). Jedoch kam die vom UN-Menschenrechtsrat berufene unabhängige Expertin für Menschenrechtsverpflichtungen beim Zugang zu sauberem Trinkwasser und Sanitärversorgung im Jahr 2010 zu dem Schluss, dass sich die Umsetzung des Menschenrechts auf Wasser und die Beteiligung des Privatsektors und anderer nicht-staatlicher Akteure in der Wasserversorgung nicht ausschließen. Sie betonte, dass ein Menschenrecht auf Wasser nicht mit einer kostenlosen Wasserversorgung verbunden ist. Die Wassertarife müssten jedoch so gestaltet sein, dass einerseits alle Menschen unabhängig von ihrem Lebensstandard und Einkommen ausreichend Wasser erhalten und andererseits die erforderlichen finanziellen Mittel für die Gewährleistung einer einwandfreien Wasserversorgung vorhanden sind. Zudem wird bekräftigt, dass die Beteiligung Dritter, auch aus dem Privatsektor, zu einer verbesserten Wasserversorgung führen kann. Jedoch muss gewährleistet sein, dass die menschenrechtlichen Rahmenbedingungen vom jeweiligen Staat gesetzt sind und diese von allen an der Wasserversorgung beteiligten Akteuren eingehalten werden (UNHRC, 2010a).

Das Jahr 2010 stellt einen Meilenstein in Bezug auf das Menschenrecht auf Wasser dar. Damals wurde das „Recht auf einwandfreies und sauberes Trinkwasser und Sanitärversorgung“ als Menschenrecht von der UN Vollversammlung in der Resolution 64/292 zum ersten Mal anerkannt (UN, 2010). Durch die Resolution wurde kein neues Menschenrecht geschaffen, sondern vielmehr die Existenz des Menschenrechts auf Wasser in bestehenden internationalen Verträgen anerkannt. Im gleichen Jahr bekräftigte der UN-Menschenrechtsrat in seiner Resolution 15/9, dass sich dieses Recht aus dem Kontext bestehender Menschenrechtsabkommen wie dem Internationalen Pakt über wirtschaftliche, soziale und kulturelle Rechte (UN-Sozialpakt) ableitet und explizit z.B. in der Kinderrechtskonvention formuliert ist (UNHRC, 2010b). Allerdings ist das Menschenrecht auf Wasser, das als soziales und nicht als bürgerliches und politisches Recht definiert ist, völkerrechtlich nicht bindend. Es kann daher nicht unmittelbar eingeklagt werden, sofern es nicht explizit in der jeweiligen nationalen Verfassung verankert ist (Siebert, 2014). Jedoch bekräftigt die Resolution 15/9, dass die Staaten die Hauptverantwortung zur vollständigen Umsetzung der

Menschenrechte tragen und die erforderlichen Schritte unternehmen müssen, „um schrittweise die vollständige Umsetzung des Rechts auf sauberes Trinkwasser und Sanitärversorgung mit allen geeigneten Mitteln“ zu erreichen (UNHRC, 2010b).

Um die inhaltliche Ausgestaltung zu konkretisieren, wurden normative Kriterien aus bestehenden Menschenrechtsabkommen abgeleitet und in verschiedenen Beschlüssen und Berichten der internationalen Gemeinschaft zur Umsetzung des Menschenrechts auf Wasser formuliert und ratifiziert. Diese Kriterien sollen als Grundlage dienen, um den Rahmen zur Umsetzung des Rechts sowie dessen Bewertung zu schaffen (CESCR, 2003; UNHRC, 2010c, 2011):

Verfügbarkeit: Wasser muss für alle Menschen in ausreichendem Maße und kontinuierlich für den persönlichen und sonstigen häuslichen Gebrauch wie z.B. Trinken, Hygiene, Kochen und Waschen verfügbar sein. Eine pauschale Bestimmung der exakten Menge und der Kontinuität ist nicht möglich, sondern muss unter Berücksichtigung der jeweiligen Bedürfnisse sowie geographischen und klimatischen Verhältnisse ermittelt werden. Es sollten aber auf jeden Fall die empfohlenen Mindestmengen berücksichtigt werden, die zum Beispiel den Richtlinien der WHO entnommen werden können (Howard und Bartram, 2003).

Qualität: Wasser muss sauber und die einwandfreie Qualität sichergestellt sein, um keine Gefahr für die menschliche Gesundheit darzustellen. Zur Sicherstellung sollten Standards und Grenzwerte für gesundheitsschädliche Stoffe im Wasser festgelegt werden, z. B. in Anlehnung an die Richtlinien der WHO (2017).

Annehmbarkeit: Wasser muss von den Verbrauchern akzeptiert werden, d.h. dass Farbe, Geruch und Geschmack des Wassers annehmbar sind. Darüber hinaus müssen bei der Art und Weise der Wassergewinnung und -übergabe an den Verbraucher die kulturellen und sozialen Anforderungen der betroffenen Bevölkerungsgruppen berücksichtigt werden.

Zugänglichkeit: Wasser muss für alle Menschen, unabhängig von Rasse, Geschlecht, Alter, Religion, politischer Gesinnung und physischer oder mentaler Verfassung, in angemessener Reichweite und sicher zugänglich sein. Dies bedeutet die kontinuierliche Verfügbarkeit von ausreichend Wasser innerhalb oder unmittelbarer Nähe eines jeden Haushalts, schulischen Einrichtungen und Arbeitsplätzen.

Bezahlbarkeit: Die Versorgung mit Wasser muss für alle Menschen bezahlbar sein. Eine kostenfreie Wasserversorgung ist nicht zwingend erforderlich, jedoch muss gewährleistet sein, dass unabhängig von den jeweiligen Einkommensverhältnissen alle Menschen den Zugang zu ausreichend und sauberem Wasser haben. In Situationen, in denen sich Menschen mit eigenen Mitteln den Zugang zu Wasser nicht mehr leisten können, müssen die Staaten geeignete Lösungen finden, den Zugang für alle Bürger zu gewährleisten.

Für die Umsetzung des Menschenrechts auf Wasser anhand der beschriebenen Kriterien sind die einzelnen Staaten zuständig. Dazu müssen diese u.a. einen wirksamen gesetzlichen Rahmen für alle an der Wasserversorgung beteiligten Akteure schaffen. Die Einhaltung des gesetzlichen Rahmens ist durch nationale Einrichtungen zu überwachen und einzufordern (UNHRC, 2010b).

In Deutschland ist das Menschenrecht auf Wasser nicht explizit im Grundgesetz genannt, kann jedoch u.a. aus dem Recht auf Leben und körperliche Unversehrtheit (Art. 2 Abs. 2) hergeleitet werden (Laskowski, 2010). Des Weiteren hat Deutschland den UN-Sozialpakt ratifiziert, aus dem das bestehende Recht auf Wasser abgeleitet wird und somit in Deutschland zu gewährleisten ist. Den gesetzlichen Rahmen der Wasserversorgung bilden neben dem Wasserhaushaltsgesetz, das u.a. die Rechte und Pflichten der öffentlichen Wasserversorgung umfasst, die Landeswassergesetze der Bundesländer sowie die kommunalen Selbstverwaltungsrechte. Demnach haben die Kommunen das Recht aber auch die Pflicht die öffentliche Wasserversorgung zu erfüllen. Dabei können die Kommunen die Organisations- und Betriebsform der Wasserversorgung, ob öffentlich-rechtlich oder privatrechtlich, selbst wählen (ATT u. a., 2015). Die Versorgung mit Wasser muss auf jeden Fall den gesetzlichen Anforderungen entsprechen. Diese sind in Bezug auf die Qualität, Menge und Druck des Trinkwassers in Rechtsverordnungen wie der Trinkwasserverordnung (TrinkwV) oder der Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Versorgung mit Wasser (AVBWasserV) geregelt (BGBl, 2014, 2016). Neben den relevanten Gesetzen und Verordnungen erfolgt die Wasserversorgung unter Beachtung und Einhaltung der technischen Regelwerke von Fachverbänden wie dem Deutschen Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) sowie den Normen des Deutschen Instituts für Normung e.V. (DIN). Für die Gebührenbildung in der Wasserversorgung existiert ein gesetzlicher Rahmen, der dem Äquivalenzprinzip, d.h. es muss eine Verhältnismäßigkeit zwischen den erhobenen Gebühren sowie der erbrachten Gegenleistung bestehen, sowie dem Kostendeckungsprinzip folgt. Die erhobenen Wasserentgelte unterliegen der behördlichen und gerichtlichen sowie kartellrechtlichen Kontrolle (ATT u. a., 2015).

Im Hinblick auf die Umsetzung des Menschenrechts auf Wasser sind in Deutschland die naturräumlichen Rahmenbedingungen als sehr gut einzustufen, da die verfügbaren Süßwasservorkommen den Bedarf der Bevölkerung bei Weitem übersteigen. Hinsichtlich der Zugänglichkeit waren im Jahr 2014 in Deutschland 99 % der Bevölkerung an die öffentliche Wasserversorgung angeschlossen und der durchschnittliche Pro-Kopf-Verbrauch lag bei 122 Litern pro Tag. Die Kontinuität der Versorgung war nahezu durchgehend gewährleistet, im Schnitt war die Versorgung der Haushalte aufgrund betrieblicher Störungen für maximal 15 Minuten pro Jahr unterbrochen. Bei der Trinkwasserqualität wurden die gesetzlichen Anforderungen in über 99 % der durchgeführten Trinkwasseranalysen eingehalten (ATT u. a., 2015; BDEW, 2015b). In Bezug auf die Bezahlbarkeit ist der Wasserpreis in Deutschland im internationalen Vergleich relativ hoch, was in vereinzelt Fällen zu einer Einstellung der Wasserversorgung an Haushalte geführt hat, die die Wasserrechnungen nicht mehr bezahlen konnten. Jedoch wurde in einem konkreten Fall im Jahr 2007 per Gerichtsurteil entschieden, dass in solchen Fällen der Staat die Rechnungen begleichen muss

und die Wasserversorgung des Haushalts umgehend wieder zu erfolgen hat (Laskowski, 2012). Somit lässt sich in Deutschland von einer flächendeckenden Umsetzung des Menschenrechts auf Wasser sprechen.

In Indien ist das Recht auf Trinkwasserversorgung ebenfalls nicht explizit in der nationalen Gesetzgebung verankert, als Unterzeichnerstaat des UN-Sozialpaktes hat Indien jedoch ebenso wie Deutschland das Recht auf Wasser umzusetzen (Osterhaus, 2009). Auch die obersten Gerichte Indiens haben in der Vergangenheit mehrfach das Recht auf Wasser aus Artikel 21 der indischen Verfassung abgeleitet, der das Recht auf Leben beinhaltet (Boussard u. a., 2014). Jedoch fehlt der gesetzliche Rahmen, der die Pflichten und Anforderungen der an der Wasserversorgung beteiligten Akteure zur Umsetzung des Rechts auf Wasser definiert (Cullet, 2013). Auf nationaler Ebene existiert lediglich die gesetzlich nicht bindende Rahmenrichtlinie *National Water Policy 2012*, in der ein gesicherter Zugang zu einer Mindestmenge an Trinkwasser für die gesamte Bevölkerung gefordert wird (MOWR, 2012). Des Weiteren wurden auf nationaler Ebene technische Leitfäden erarbeitet, z.B. zur Wasserversorgung und -aufbereitung (CPHEEO, 1999), den Betrieb und Instandhaltung von Wasserversorgungssystemen (CPHEEO, 2005) sowie zur Trinkwasserqualität und deren Überwachung (BIS, 2012; MDWS, 2013). Diese sollen als Normen bzw. technischer Standard in der Wasserversorgung gelten. Die Einhaltung dieser Normen und Standards ist jedoch gesetzlich nicht vorgeschrieben und wird vom Staat nicht überwacht.

Gemäß der indischen Nationalverfassung sind jeweils die einzelnen Bundesstaaten für die gesetzliche Regelung und Verwaltung der Trinkwasserversorgung zuständig. Die Verantwortung zur Umsetzung der Wasserversorgung soll laut Verfassung an die lokalen Behörden und Gemeinden innerhalb der Bundesstaaten übergeben werden. Dabei verbleibt die Planung und Implementierung der Wasserversorgungssysteme sowie die Überwachung der Trinkwasserqualität oftmals in der Verantwortung von halbstaatlichen Einrichtungen. Nach Abschluss der Implementierung sind dann die lokalen Behörden, wie die Urban Local Bodies (ULBs) oder Village Panchayats, für Betrieb und Instandhaltung der Versorgungssysteme zuständig (Panickar, 2007; Tiwari und Nair, 2011).

Bezüglich der Umsetzung des Menschenrechts auf Wasser in Indien sind die naturräumlichen Bedingungen nicht so günstig wie in Deutschland. Indiens Anteil am globalen Süßwasservorkommen macht ca. 4 % aus, während der Anteil an der globalen Bevölkerung ca. 18 % beträgt (MOWR, 2014). Hinsichtlich der Zugänglichkeit hatten im Jahr 2015 ca. 94 % der indischen Bevölkerung Zugang zu verbesserten Trinkwasserquellen. Hierbei verfügten jedoch nur 28 % über einen Wasseranschluss auf dem eigenen Grundstück, während 66 % ihr Wasser von anderen Quellen wie öffentlichen Zapfstellen, Brunnen oder geschützten Quellen bezogen (WHO und UNICEF, 2015). Belastbare Zahlen hinsichtlich der Quantität der versorgten Trinkwassermenge in Indien sind nicht vorhanden, vor allem für den ländlichen Bereich. Für städtische Gebiete wurden diverse stichprobenartige Erhebungen durchgeführt, wonach die städtische Bevölkerung täglich mit ca. 120 bis 130 *lpcd* versorgt wird (NIUA, 2005; ADB, 2007; MoUD, 2010). Jedoch spiegeln die Zahlenwerte hinsichtlich der

Zugänglichkeit und Verfügbarkeit nicht die Realität der Wasserversorgung in Indien wider. Der Zugang zu verbesserten Trinkwasserquellen ist nicht gleichbedeutend mit dem Zugang zu sauberem und ausreichend Trinkwasser. Ungenügender Schutz und zunehmende Verschmutzung der Wasserquellen, gepaart mit zum Teil nicht angemessener Wasseraufbereitung sowie maroder Infrastruktur und mangelhaftem Betrieb und Wartung der Versorgungssysteme haben einen negativen Einfluss auf die Qualität und Quantität des Trinkwassers in Indien (HPEC, 2011; Ercumen u. a., 2015). Die durchschnittlichen Angaben bezüglich des Pro-Kopf-Verbrauchs besitzen keine Aussagekraft, ob diese Mengen auch tatsächlich jeder Haushalt im Versorgungsgebiet erhält. Bedingt durch Wasserknappheit, aber auch den mangelhaften Betrieb und Instandhaltung der Versorgungssysteme mit zum Teil erheblichen Wasserverlusten erfolgt keine kontinuierliche Versorgung. Aufgrund dieser intermittierenden Betriebsweise, bei der im Schnitt lediglich 4,5 Stunden am Tag versorgt wird, gibt es starke Unterschiede in der Quantität der versorgten Menge je nach Lage der Haushalte in den Versorgungsgebieten (Totsuka u. a., 2004; MoUD, 2010).

Im Hinblick auf die Bezahlbarkeit sind die Wassertarife für ein bestimmtes Volumen an Wasser in Indien relativ günstig bis sehr günstig einzustufen. Die Kehrseite der günstigen Tarife sind jedoch fehlende Einnahmen auf Seiten der Wasserversorger, um die erforderlichen Investitionen für die Gewährleistung eines ordnungsgemäßen Betriebs und Instandhaltung der Versorgungssysteme zu tätigen. Daher sind im Endeffekt die Gesamtkosten der Haushalte, um eine ausreichende Menge an sauberem Trinkwasser zu erhalten, enorm hoch. Aufgrund der intermittierenden und oftmals unzuverlässigen Wasserversorgung investieren Haushalte in private Speichertanks und Bohrbrunnen, um eine bestimmte Menge an Wasser rund um die Uhr zur Verfügung zu haben. Angesichts der oft ungenügenden Qualität des vom Versorger gelieferten Wassers müssen viele Haushalte darüber hinaus ihr Trinkwasser von privaten und informellen Wasserverkäufern zu hohen Preisen beziehen. Diese zusätzlichen Kosten gehen vor allem zu Lasten der ärmeren Bevölkerungsgruppen, die sich oftmals die hohen Gebühren für den Anschluss an die öffentliche Wasserversorgung sowie die Kosten für Trinkwasser von privaten Verkäufern nicht leisten können. Daher müssen diese Menschen einen hohen physischen und zeitlichen Aufwand betreiben, um ausreichend Wasser von entfernten Zapfstellen oder Brunnen zu sammeln (Singh u. a., 2005; Jha, 2010). Schätzungen gehen davon aus, dass 76 Millionen Menschen in Indien und somit weltweit die meisten Menschen in einem Staat keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser haben (Burgess, 2016). Somit ist Indien von einer flächendeckenden Umsetzung des Menschenrechts auf Wasser noch weit entfernt.

Zusammengefasst besteht heutzutage ein gesellschaftlicher Konsens, das menschliche Grundbedürfnis Wasser nicht mehr als ein gegebenes und allseits verfügbares sondern limitiertes Gut zu betrachten und das Menschenrecht auf Wasser anzuerkennen. Jedoch ist die Umsetzung dieses Menschenrechts, d.h. die Versorgung mit ausreichend und sauberem Trinkwasser, für einen Teil der Menschheit nach wie vor nicht realisiert, besonders in Entwicklungs- und Schwellenländern. Zuständig sind

die einzelnen Staaten, die anhand der normativen Kriterien Verfügbarkeit, Qualität, Annehmbarkeit, Zugänglichkeit und Bezahlbarkeit die Rahmenbedingungen zur Umsetzung des Rechts schaffen sollen. Dabei zeigt sich an den Beispielen Deutschland und Indien, das u.a. die Festlegung des gesetzlichen Rahmens, der alle Pflichten der an der Wasserversorgung beteiligten Akteure sowie die Anforderungen an Technik und Betrieb der Versorgungsanlagen definiert, zwingend erforderlich ist. Die Umsetzung des Rechts auf Wasser ist zwar vor allem eine (wasser-)politische, institutionelle und wirtschaftliche und weniger eine technische Herausforderung. Werden diese Herausforderungen jedoch gemeistert, müssen schlussendlich auch die technischen Anlagen der Wasserversorgungssysteme gemäß dem Stand der Technik und ohne Mängel konzipiert, betrieben und instand gehalten werden, um für die Menschen den sicheren und kontinuierlichen Zugang zu sauberem Trinkwasser in ausreichender Menge und somit das Menschenrecht auf Wasser zu realisieren. Einen wesentlichen Beitrag dazu leistet ein effektives Wasserverlustmanagement, da Wasserverluste in einem Versorgungssystem unmittelbaren Einfluss auf die Quantität und Qualität des Wassers sowie die Gewährleistung einer kontinuierlichen Versorgung haben.

2.3 Wasserversorgungssysteme

2.3.1 Aufgaben

Wasserversorgungssysteme dienen der Bereitstellung von Trinkwasser „in hygienisch einwandfreier Qualität, in der erforderlichen Menge, mit ausreichend Druck und mit hoher Versorgungssicherheit“ (DVGW, 2015). Daher müssen Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung der Wasserversorgungsanlagen unter Einhaltung der gesetzlichen Vorschriften und anerkannten Regeln der Technik erfolgen, um diese Anforderung sicherzustellen (DIN, 2017). Auch in Indien wird die grundlegende Aufgabe eines öffentlichen Wasserversorgungssystems als die „Bereitstellung von sicherem und sauberem Wasser in angemessener Menge, zweckdienlich und so wirtschaftlich wie möglich“ definiert (CPHEEO, 1999).

2.3.2 Anlagenkomponenten

Die technischen Anlagen eines zentralen Versorgungssystems dienen der Gewinnung, Aufbereitung, Förderung, Speicherung, Fortleitung und Verteilung des Trinkwassers (Abbildung 2.1). Dabei ist die Zusammensetzung dieser Komponenten unter anderem abhängig von den örtlichen Gegebenheiten, dem Wasservorkommen und seiner Beschaffenheit sowie dem Verbrauchsverhalten der Konsumenten (Karger und Hoffmann, 2013).

Hinsichtlich eines effektiven Wasserverlustmanagements ist die genaue Kenntnis des Aufbaus und Funktionsweise eines Versorgungssystems sowie der Systemgrenzen erforderlich, um die Wasserverlustmengen in den verschiedenen Anlagenkomponenten möglichst genau quantifizieren und analysieren zu können.

Wassergewinnung: Die Gewinnung von Rohwasser kann grundsätzlich aus den drei unterschiedlichen Vorkommen Grundwasser, Oberflächenwasser und Quellwasser erfolgen. Der Anteil der Vorkommen an der Wassergewinnung variiert länderspezifisch sowie örtlich stark und ist abhängig von der Verfügbarkeit und dem zu deckenden Wasserbedarf (Mutschmann u. a., 2014). Grund- und Quellwasser werden in der Regel durch Brunnen oder Quelfassungen entnommen. Die Gewinnung von Oberflächenwasser kann durch Fluss- oder Seewasserfassungen, Talsperren oder Meerwasserentsalzungsanlagen und zum Teil auch durch das Auffangen von Niederschlagswasser in Zisternen erfolgen. Da die Gefahr von Verunreinigung des Oberflächenwassers, z.B. durch Einleitung von Abwasser in Flusswasser, grundsätzlich höher ist als bei Grund- und Quellwasser, ist meist eine aufwendige Aufbereitung des gewonnenen Oberflächenwassers erforderlich (Karger und Hoffmann, 2013). Die Wassergewinnung umfasst neben der Gewinnungsanlage auch die Leitungen, über die das Rohwasser zur Aufbereitungsanlage oder direkt zum Wasserverteilungssystem transportiert wird.

Wasseraufbereitung: Ziel der Wasseraufbereitung ist die Herstellung von Trinkwasser, das der gesetzlich geforderten Güte entspricht und gleichzeitig den optimalen Betrieb des Versorgungssystems gewährleistet. Je nach Beschaffenheit des Rohwassers und der geforderten Trinkwasserqualität werden die in Tabelle 2.1 gelisteten physikalischen, chemischen und biologischen Verfahren eingesetzt. Die Verfahren dienen dazu, manche Stoffe im Trinkwasser möglichst vollständig zu entfernen, unter eine vorgegebene Konzentration zu verringern, auf eine vorgegebene Konzentration genau einzustellen oder möglichst bis zur Sättigung zuzugeben (Karger und Hoffmann, 2013; Grombach u. a., 2000).

Tabelle 2.1: Verfahren der Trinkwasseraufbereitung nach Karger und Hoffmann (2013)

Physikalisch	Chemisch	Biologisch
Sedimentation	Oxidation/Reduktion	Entmanganung
Siebung/Rechen	Flockung	Denitrifikation
Filtration	Fällung	
Membranverfahren	Enteisenung/Entmanganung	
Gasaustausch	Entsäuerung	
	Ionenaustausch	

Wasserförderung: Der Wassertransport von der Rohwasserfassung bis zu den Verbrauchern erfolgt mittels Förderanlagen. Dabei wird dem Wasser durch Pumpwerke die Energie zugeführt, die zur Überwindung der geodätischen Höhenunterschiede und aller Verlusthöhen entlang des Transportwegs sowie zur Einhaltung des

erforderlichen Drucks und Volumenstroms erforderlich ist (DVGW, 1981).

Wasserspeicherung: Vorrangiges Ziel der Wasserspeicherung ist die Bereitstellung eines Mengenspeichers zum Ausgleich des Unterschieds zwischen Wasserdargebot und Wasserbedarf in einem Versorgungssystem. Weitere Aufgaben sind u.a. die Einhaltung der erforderlichen Druckbereiche und das Bereithalten von Löschwasser- und Betriebsreserven (DIN, 1998).

Wasserverteilung: Die Aufgabe der Wasserverteilung ist der Transport des Trinkwassers zu den Verbrauchern. Das Verteilungssystem „beginnt nach der Wasseraufbereitungsanlage oder, wenn keine Aufbereitung erfolgt, nach der Wassergewinnung und endet an der Übergabestelle zum Verbraucher“ (DIN, 2000), wie in Abbildung 2.1 schematisch dargestellt. Die Bestandteile von Wasserverteilungssystemen sind im folgenden Kapitel beschrieben.

2.4 Wasserverteilungssysteme als finale Komponente der Wasserversorgung

2.4.1 Allgemeines

Das Wasserverteilungssystem ist nach Definition der DIN (2000) der „Teil eines Wasserversorgungssystems mit Rohrleitungen, Trinkwasserbehältern, Förderanlagen und sonstigen Einrichtungen zum Zweck der Verteilung von Wasser an die Verbraucher“. Die Anlagen der Wasserverteilung machen nach Mutschmann u. a. (2014) ca. 60 bis 80 % des Anlagenvermögens einer Wasserversorgung aus. Den größten Bestandteil der Wasserverteilungsanlagen stellt das überwiegend unterirdisch verlegte Leitungsnetz aus, in dem auch der Großteil der gesamten Wasserverlustmenge in einem Versorgungssystem zu verzeichnen ist. Dies zeigt sich auch bei den Investitionen. Von den im Jahr 2017 insgesamt in die öffentliche Wasserversorgung investierten 2,7 Milliarden Euro flossen über die Hälfte in die Erhaltung, Modernisierung sowie den Ausbau des Rohrnetzes (BDEW, 2019). Die Gesamtlänge des Trinkwassernetzes wird in Deutschland auf ca. 530.000 *km* geschätzt (UBA, 2014).

2.4.2 Bestandteile

2.4.2.1 Förderanlagen

In der Wasserversorgung werden neben Verdrängerpumpen (z.B. Kolben- oder Membranpumpen) vorrangig Kreiselpumpen zur Wasserförderung eingesetzt. Bei Kreiselpumpen tritt das Wasser axial in das Laufrad ein und wird durch Laufradschaufeln umgelenkt. Dadurch wird Druckenergie auf den Förderstrom übertragen (Karger und Hoffmann, 2013). Hinsichtlich der Funktion werden drei Anlagentypen unterschieden. Das Hauptpumpwerk, nach der Wassergewinnung oder Wasseraufbereitungs-

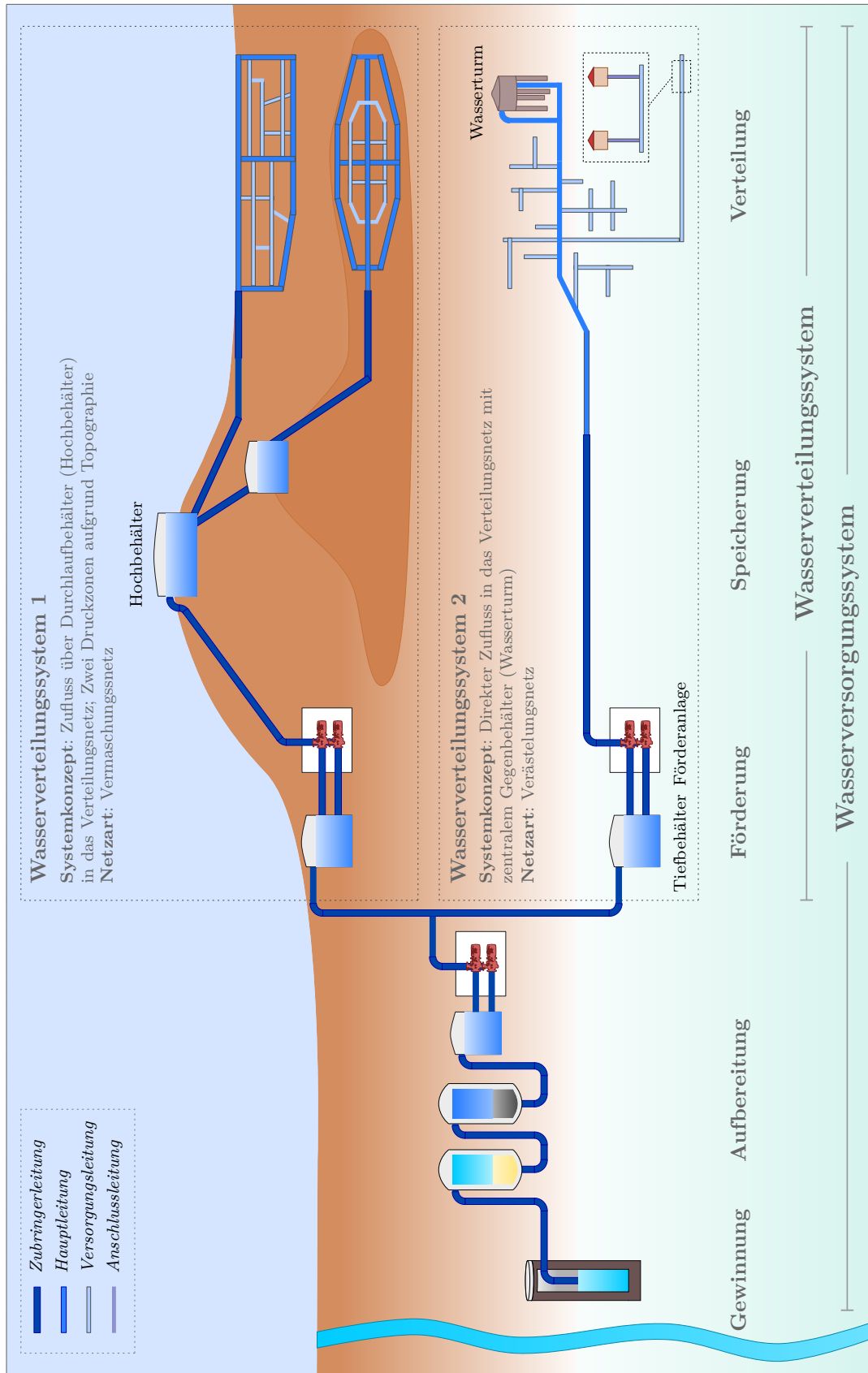


Abbildung 2.1: Wasserversorgungs- und Wasserverteilungssystem

anlage angeordnet, sichert den Wassertransport. Die Förderung des Wassers zu den Behältern oder Versorgungsgebieten erfolgt über Zwischenpumpwerke. Druckerhöhungsanlagen transportieren das Wasser innerhalb von Versorgungsgebieten ohne Speicherung (DIN, 2000). In Abbildung 2.1 sind beispielhaft ein Hauptpumpwerk unmittelbar nach der Aufbereitungsanlage, ein Zwischenpumpwerk zur Förderung in einen Hochbehälter (Wasserverteilungssystem 1) sowie eine Druckerhöhungsanlage mit direkter Förderung in das Versorgungsgebiet (Wasserverteilungssystem 2) dargestellt.

2.4.2.2 Trinkwasserbehälter

Die Anlagen der Wasserspeicherung lassen sich in Hochbehälter, Wassertürme und Tiefbehälter unterscheiden (Abbildung 2.1). Hochbehälter werden in höher gelegenen Gelände errichtet. Ist keine geeignete Geländehöhe vorhanden, erfolgt die Speicherung in Wassertürmen. Beide Behältertypen bieten eine hohe Versorgungssicherheit mit gleichmäßigem Versorgungsdruck und ermöglichen einen gleichmäßigen Pumpbetrieb mit wirtschaftlicher Auslastung. Tiefbehälter müssen mit einem Pumpwerk kombiniert werden, da der Wasserspiegel im Behälter tiefer als das Niveau des Versorgungsdrucks liegt. Aufgrund der Störanfälligkeit bei Pumpenausfall ist daher die Versorgungssicherheit niedriger einzustufen (Mutschmann u. a., 2014). Je nach Anordnung im Verteilungssystem und Betriebsweise lassen sich die Behälter gemäß DVGW (2015) unterscheiden in:

Durchlaufbehälter: Ein Durchlaufbehälter ist zwischen Zubringersystem und Versorgungsgebiet angeordnet. Somit wird das gesamte in das Versorgungsgebiet eingespeiste Volumen zunächst durch den Behälter geleitet (Abbildung 2.1, System 1). Vorteile dieser Anordnung sind die eindeutigen Fließrichtungen, die stetige Wassererneuerung im Behälter sowie die hydraulische Trennung von Zubringer- und Verteilungssystem. Dadurch ist zum einen eine gleichbleibende Förderhöhe zur optimalen Auslegung der Pumpen gewährleistet und zum anderen die Möglichkeit des Ausgleichs von Bedarfsschwankungen im Versorgungsgebiet durch das Speichervolumen des Behälters gegeben. Nachteilig kann die geringe Versorgungssicherheit sein, wenn nur eine Leitung vom Behälter zur Einspeisung in das Versorgungsgebiet dient.

Gegenbehälter: Ein Gegenbehälter ist an das Verteilungsnetz angeschlossen und speichert das von den Förderpumpen eingespeiste Wasservolumen, das in Zeiten geringen Bedarfs nicht unmittelbar von den Verbrauchern konsumiert wird (Abbildung 2.1, System 2). Dadurch wird eine relativ konstante direkte Förderung in das Versorgungsgebiet mit optimaler Pumpenauslegung ermöglicht. Bei größerem Bedarf der Verbraucher dient der Behälter der Deckung von Verbrauchsspitzen und erhöht die Versorgungssicherheit durch die zweiseitige Einspeisung in das Verteilungsnetz. Nachteile können Stagnation bzw. der erhöhte steuerungstechnische Aufwand zur Vermeidung von langen Verweilzeiten des Wassers im Behälter sowie wechselnde Fließrichtungen und Druckverhältnisse im Netz sein.

Zentralbehälter: Ein Zentralbehälter liegt als Durchlauf- oder Gegenbehälter direkt im Versorgungsgebiet und wird in der Regel durch einen Wasserturm realisiert (Abbildung 2.1, System 2). Vorteile sind geringe Druckverluste und -schwankungen im Versorgungsnetz aufgrund der kurzen Fließwege sowie kleinere Rohrdurchmesser im Versorgungsnetz. Nachteilig sind die erhöhten Baukosten eines Wasserturms im Vergleich zu einem Hochbehälter.

2.4.2.3 Rohrleitungsnetz

Leistungsarten: Die Rohrleitungen werden entsprechend ihrer Funktion in Zubringer-, Haupt-, Versorgungs- und Anschlussleitungen unterschieden (Abbildung 2.1). Die Zubringerleitungen verbinden Wassergewinnung(en), Wasseraufbereitungsanlage(n), Wasserbehälter und die Versorgungsgebiete. Innerhalb der Versorgungsgebiete verteilen die Hauptleitungen das Wasser, üblicherweise ohne direkte Anbindung an die Verbraucher. Die Versorgungsleitungen verbinden die Hauptleitungen mit den Anschlussleitungen, über die das Wasser schließlich zu den Verbrauchern gelangt (DIN, 2000).

Rohreigenschaften: Die Rohrleitungen eines Verteilungssystems weisen je nach Einsatzzweck und den daraus resultierenden Beanspruchungen bei Bau, Prüfung, Inbetriebnahme und Betrieb unterschiedliche Eigenschaften auf:

- *Werkstoffe:* Als Werkstoffe für Rohrleitungen dienen vor allem Stahl, Gusseisen, Faserzement, Spann- und Stahlbeton und Kunststoffe wie Polyvinylchlorid (PVC) oder Polyethylen (PE). Asbestzement wird üblicherweise nicht mehr als Werkstoff verwendet, bereits verlegte Asbestzementrohre dürfen jedoch weiterhin betrieben und instand gehalten werden. Die Wahl der Werkstoffe ist unter anderem abhängig von der erforderlichen Festigkeit gegenüber dem Innendruck und äußerer Belastung, der Korrosionsbeständigkeit, der Verfügbarkeit des Werkstoffes sowie den Gesamtkosten für die Beschaffung, Verlegung und Wartung der Leitungen (Mutschmann u. a., 2014).
- *Durchmesser:* Die Rohrdurchmesser werden in der Regel als Nennweite DN (Diameter Nominal) angegeben, die eine alphanumerische Bezeichnung für den Durchmesser eines Rohrleitungsteils ist (DIN, 1995a). Die Nennweite DN wird zusammen mit einer ganzzahligen, numerischen Bezeichnung angegeben, die annähernd dem tatsächlichen Außendurchmesser OD (Outer Diameter) oder Innendurchmesser ID (Inner Diameter) in Millimetern (mm) entspricht (Merkl, 2008).
- *Druckstufen:* Rohrleitungen müssen dem zulässigen Bauteilbetriebsdruck (pression de fonctionnement admissible, PFA) im Dauerbetrieb standhalten, während der höchste zulässige Bauteilbetriebsdruck (pression maximale admis-

sible, PMA) definiert ist als „höchster zeitweise auftretender Druck inklusive Druckstoß, dem ein Rohrleitungsteil standhält“ (DIN, 2000).

Rohrverbindungen: Je nach Anforderungen und Rohrwerkstoffen werden verschiedene Arten von Verbindungen verwendet, um die einzelnen Rohrleitungen dauerhaft dicht und gegenüber statischen und dynamischen Belastungen standhaft miteinander zu verbinden. Bei den Anforderungen wird vor allem in lösbar und nicht lösbar sowie längskraftschlüssige und längsverschiebbare Rohrverbindungen unterschieden. Längskraftschlüssige Verbindungen verhindern ein Auseinanderdrücken oder -ziehen der Rohrleitungen aufgrund innerer oder äußerer Kräfte. Tabelle 2.2 fasst die gängigsten Rohrverbindungen und ihre Anforderungen zusammen.

Tabelle 2.2: Rohrverbindungen und ihre Anforderungen nach Karger und Hoffmann (2013)

Verbindungsart	Rohrwerkstoff	Lösbarkeit	Längskraftschlüssigkeit
Flanschverbindung	Alle	ja	ja
Steckverbindung	Stahl, Gusseisen, Faser-zement, Spann- und Stahlbeton, PVC, PE	ja	nein
Schraubverbindung	Stahl, Gusseisen, PVC, PE	ja	ja
Schweißverbindung	Stahl, PE	nein	ja
Klebeverbindung	PVC	nein	ja

Netzarten: Wasserverteilungsnetze werden hinsichtlich des Grades der Vermaschung unterschieden. Verästelungsnetze bestehen aus sich verzweigenden Leitungen, die keine weiteren Verbindungen miteinander haben. Daher gibt es nur eine definierte Fließrichtung des Wassers, was die Berechnung und Bemessung des Netzes sowie die Verlust- und Mengenermittlung einfacher macht. Jedoch kann es bei dieser Netzart zu erheblichen Störungen der Versorgung im Falle von Rohrbrüchen sowie zu Stagnation in Leitungsenden kommen. Vermaschte Netze, auch als Ringnetze bezeichnet, ermöglichen die Versorgung aus mindestens zwei Richtungen. Dadurch erhöht sich die Versorgungssicherheit und verbessern sich die Löschwasserbereitstellung sowie die Druckverhältnisse im Netz. In diesem Fall sind allerdings die hydraulische Berechnung und Bemessung sowie die Verlust- und Mengenermittlung aufwändiger und die Kosten höher. Aufgrund der genannten Aspekte werden in der Regel Zubringerleitungen verästelt und Verteilungsnetze mit Haupt- und Versorgungsleitungen vermascht ausgelegt (DIN, 1983; Karger und Hoffmann, 2013). Abbildung 2.1 zeigt Beispiele eines verästelten sowie vermaschten Netzes.

2.4.2.4 Armaturen

Aufgaben: Armaturen dienen hauptsächlich der Absperrung, Regelung, Be- und Entlüftung, Rückflussverhinderung und Entnahme in Leitungsnetzen. Dabei können Armaturen gleicher Bauart unterschiedliche Aufgaben erfüllen. Die Steuerung erfolgt handbedient, fernbedient, automatisch oder kombiniert (Grombach u. a., 2000).

Bauarten: Armaturen lassen sich anhand ihrer Grundbauarten durch die Arbeitsbewegung des Abschlusskörpers (geradlinig oder drehend) sowie der Strömungsrichtung in Bezug zum Abschlusskörper der Armatur unterscheiden (DIN, 2018):

- *Schieber:* Abschlusskörperbewegung ist geradlinig und im Abschlussbereich quer zur Strömungsrichtung.
- *Ventil:* Abschlusskörperbewegung ist geradlinig und im Abschlussbereich in Strömungsrichtung.
- *Hahn:* Abschlusskörper dreht sich quer zur Strömung um eine Achse und wird in Offenstellung durchströmt.
- *Klappe:* Abschlusskörper dreht sich quer zur Strömung um eine Achse und wird in Offenstellung umströmt.
- *Membranarmatur:* Abschlusskörper (flexibel) wird deformiert und verändert den Durchflusskanal.

2.4.3 Systemkonzepte

Die Bestandteile eines Wasserverteilungssystems können je nach Systemkonzept unterschiedlich angeordnet sein. Dabei wird je nach Anordnung der Förder- und Druckerhöhungsanlagen, Behälter sowie der Zubringerleitungen und Verteilungsnetzen in folgende Systemkonzepte unterschieden, die beispielhaft in Abbildung 2.1 dargestellt sind (Merkl, 2008; Klingel, 2010):

Direkter Zufluss in das Verteilungsnetz: Das Wasser wird durch eine Pumpanlage oder Gravitation direkt über die Zubringerleitung in das Verteilungsnetz eingespeist. Bedarfsschwankungen müssen durch geeignete Regelungstechniken und ggf. einen Gegenbehälter ausgeglichen werden.

Zufluss über Durchlaufbehälter in das Verteilungsnetz: Die Zubringerleitung und das Verteilungsnetz sind durch den Durchlaufbehälter, der als Hochbehälter realisiert wird, hydraulisch getrennt. Dadurch ist, wie in Abschnitt 2.4.2.2 beschrieben, die Förderung in den Behälter unabhängig von den Bedarfsschwankungen im Verteilungsnetz, die durch das entsprechend dimensionierte Speichervolumen des Behälters ausgeglichen werden. Die Einspeisung aus dem Durchlaufbehälter in das Verteilungsnetz erfolgt gravitär und mit einem annähernd konstanten Versorgungsdruck.

Druckzonen: Bei entsprechenden topographischen Gegebenheiten mit großen Höhenunterschieden ist es sinnvoll, das Versorgungsgebiet in mehrere, voneinander hydraulisch getrennte Druckzonen zu gliedern. Dadurch wird unter anderem die Einhaltung der geforderten Versorgungsdrücke in den jeweiligen Verteilungsnetzen gewährleistet.

2.5 Technischer Betrieb von Wasserverteilungssystemen

2.5.1 Aufgaben

Der technische Bereich der Wasserverteilung umfasst neben der Planung und dem Bau der Verteilungssysteme die beiden Hauptaufgaben Betrieb und Instandhaltung (Mutschmann u. a., 2014). Übergeordnetes Ziel ist dabei die Lieferung des Trinkwassers an die Verbraucher in der erforderlichen Menge mit ausreichendem Druck sowie in einwandfreier Qualität. Die dazu erforderlichen Betriebszustände der Systeme bezüglich Menge, Druck und Wassergüte sind unter Beachtung der gesetzlichen Vorschriften und anerkannten Regeln der Technik herzustellen und einzuhalten.

Abbildung 2.2 gibt einen Überblick über die Aufgaben des technischen Betriebs eines Verteilungssystems. Grundaufgaben sind u.a. eine möglichst kontinuierliche Versorgung, die Gewährleistung eines stabilen Druckniveaus sowie die Minimierung von Wasserverlusten. Konkrete Einzelaufgaben sind das Bedienen, Steuern und Regeln, Beobachten, Überwachen, Kontrollieren und Dokumentieren der Verteilungsanlagen und deren Betriebs. Beispiele sind die Regelung und Überwachung der Förderhöhen und -mengen der Förderanlagen, der Wasserstände in den Speicherbehältern sowie des Drucks und Durchflusses im Rohrleitungsnetz (DVGW, 2006b).

Die Instandhaltung, die in dieser Arbeit dem technischen Betrieb zugeordnet wird, umfasst alle Maßnahmen, die dem Erhalt oder der Wiederherstellung des funktionsfähigen Zustands der Anlagenkomponenten dienen (DIN, 2012). Dabei wird gemäß DVGW (2006b) in die Bestandteile Inspektion, Wartung, Instandsetzung und Verbesserung unterschieden (Abbildung 2.3):

Inspektion: Maßnahmen, die der turnusmäßigen Kontrolle und Bewertung des Istzustands der Anlagenkomponenten dienen.

Wartung: Vorbeugende Maßnahmen, die dem Erhalt des Sollzustands der Anlagenkomponenten und deren Funktionstüchtigkeit dienen.

Instandsetzung und Verbesserung: Maßnahmen, die der Wiederherstellung bzw. Verbesserung des Sollzustandes der Anlagenkomponenten dienen. Dabei wird wiederum in die nicht planbare Reparatur und die Rehabilitation unterschieden. Erstere beinhaltet einzelne, nicht planbare Maßnahmen zur Schadensbehebung. Die Rehabilitation gliedert sich in die Reinigung, Sanierung sowie Erneuerung (Roscher,

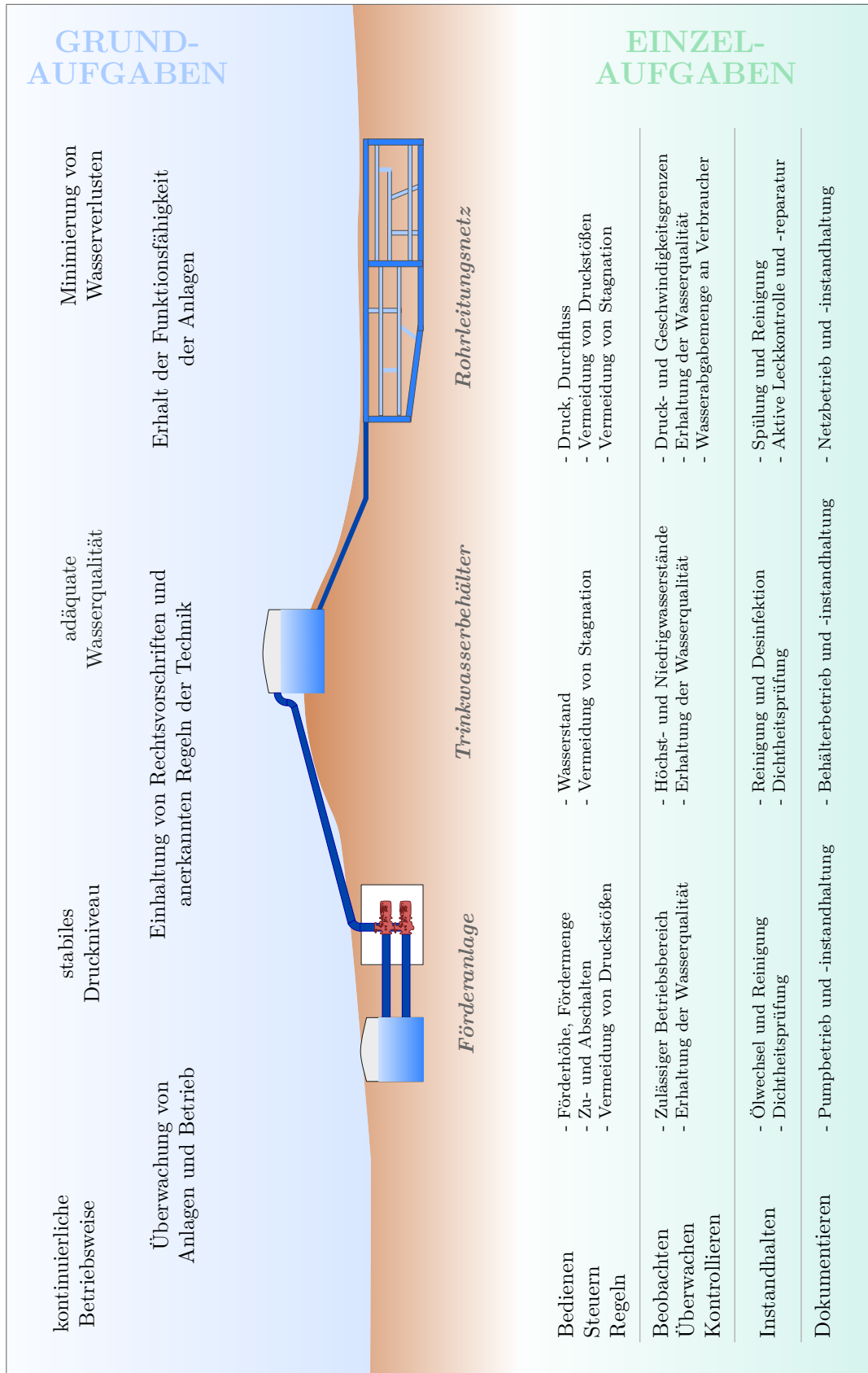


Abbildung 2.2: Aufgaben des technischen Betriebs von Wasserverteilungssystemen

2018). Bei Rohrleitungen beispielsweise dient die Reinigung der Entfernung von Ablagerungen und Inkrustationen. Im Zuge der Sanierung werden die Innenwände von Leitungen ausgekleidet oder neu beschichtet, um die Betriebssicherheit zu erhöhen und die Restnutzungsdauer zu verlängern. Bei der Erneuerung werden schadhafte Rohrleitungen durch neue Leitungen ersetzt (DVGW, 2006b).

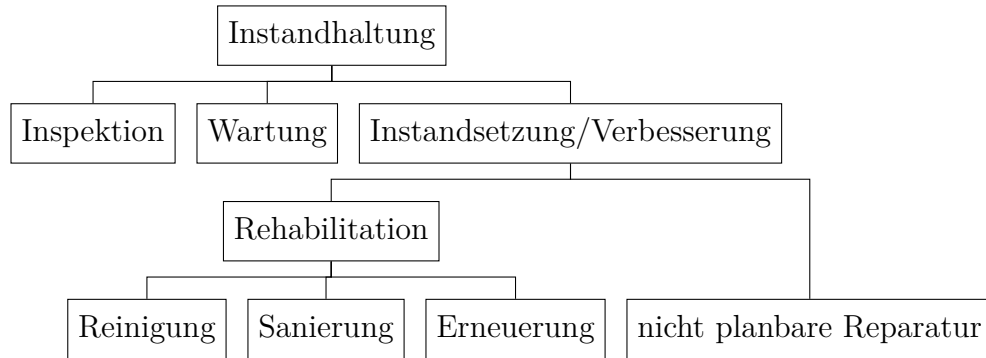


Abbildung 2.3: Bestandteile der Instandhaltung nach Roscher (2018)

2.5.2 Betriebsweise

Um zu jedem Zeitpunkt die erforderliche Wassermenge mit ausreichend Druck und einwandfreier Qualität zu liefern, sind die Leitungsnetze der Wasserverteilung in der Regel für eine kontinuierliche Wasserversorgung ausgelegt und dementsprechend zu betreiben. Dabei sind die Rohrleitungen ständig unter Druck, d.h. stets vollständig mit Wasser gefüllt zu halten. Große Druckschwankungen sowie ein Unterschreiten des erforderlichen Mindestdrucks sind auf ein Minimum zu reduzieren. Ebenso sind unnötig hohe Drücke zu vermeiden, da diese u.a. zu höheren Verlustmengen aus Leckagen führen (siehe Abschnitt 3.2.1). Beim Betrieb sind außerdem die zulässigen Grenzen der Fließgeschwindigkeiten sowie in Bezug zur Wasserqualität die Grenzen der Verweilzeiten des Wassers in den Rohrleitungen einzuhalten. Zur Gewährleistung dieser Forderungen an die Betriebsweise ist eine übergeordnete Betriebsstrategie erforderlich, bei der eine abgestimmte Bedienung der einzelnen Anlagenkomponenten unter kontinuierlicher Überwachung der Betriebsparameter erfolgt.

Richt- und Grenzwerte: In Deutschland sind bezüglich der Betriebsparameter Richt- und Grenzwerte zu beachten, die bei der Planung von Wasserversorgungssystemen maßgeblich sind. Diese sind im DVGW-Arbeitsblatt W 400-1 (2015) geregelt. Beim Druck wird zwischen dem höchsten Systembetriebsdruck *MDP* (Maximum Design Pressure), dem Systembetriebsdruck *DP* (Design Pressure) und dem Versorgungsdruck *SP* (Service Pressure) unterschieden. Der *MDP* und der *DP* sind die höchsten festgelegten Betriebsdrücke im System, wobei der *MDP* Drückstöße berücksichtigt und der *DP* nicht. Daher sollte der *DP* ca. 2,0 bar

niedriger als der *MDP* sein, der wiederum mindestens 10,0 bar betragen sollte. Der *SP* ist der Druck an der Übergabestelle zum Verbraucher während kein Durchfluss in der Anschlussleitung herrscht. Die geforderten Mindestwerte für den *SP* sind von der überwiegenden Geschosshöhe im jeweiligen Bebauungsgebiet abhängig und liegen zwischen 2,0 und 3,4 bar bei ebenerdigen Verhältnissen und zwischen 1,5 und 2,9 bar in ausgeprägten Hochlagen.

Die Fließgeschwindigkeiten im Leitungsnetz ergeben sich in Abhängigkeit der Durchflüsse. Da zu hohe Fließgeschwindigkeiten zu höheren Druckverlusten und zu geringe Geschwindigkeiten zu erhöhten Verweilzeiten und ungenügendem Wasseraustausch in den Leitungen führen, werden diesbezüglich ebenfalls Richtwerte vom DVGW gegeben. In Haupt- und Versorgungsleitungen sollten die Geschwindigkeiten nicht über 2 m/s, in Anschlussleitungen nicht über 1 m/s betragen. Bei Pumpenanlagen sollten die Geschwindigkeiten zwischen 0,5 und 1,5 m/s in den Saugleitungen und zwischen 1,0 und 2,0 m/s in den Druckleitungen liegen. In Fallleitungen unterstrom von Hochbehältern sollten diese zwischen 1,0 und 1,5 m/s betragen (DVGW, 2004a). Generell sollten bei mittlerem Durchfluss durch die Leitungen die Geschwindigkeiten nicht geringer als 0,005 m/s sein, um lange Verweilzeiten des Wassers zu vermeiden.

In Indischen Leitfäden werden hinsichtlich dem Versorgungsdruck die Mindestwerte 0,7, 1,2 und 1,7 bar für ein-, zwei- bzw. dreigeschossige Gebäude angegeben, wobei generell ein Wert von 2,2 bar nicht überschritten werden sollte (CPHEEO, 1999). Richtwerte für Fließgeschwindigkeiten werden nicht gegeben.

Rohrhydraulik: Um die Betriebsparameter ermitteln und somit das hydraulische Systemverhalten analysieren zu können, werden in der Regel Rohrnetzberechnungen basierend auf einem numerischen Modell des betrachteten Verteilungssystems durchgeführt. Eine ausführliche Beschreibung der Rohrnetzmodellierung findet sich in Klingel (2018). Im Folgenden werden kurz die erforderlichen Grundlagen der Rohrhydraulik erläutert, auf denen die Berechnung der Drücke und Fließgeschwindigkeiten zu einem bestimmten Zeitpunkt im Leitungsnetz basiert. Dazu wird der in Abbildung 2.4 dargestellte Rohrabschnitt zwischen zwei Bezugspunkten betrachtet, bei dem sich das Rohr in Fließrichtung nach der Länge L_1 vom Durchmesser D_1 auf den Durchmesser D_2 verengt. Gemäß der dargestellten, erweiterten Bernoulli-Gleichung zur Energieerhaltung ist für eine verlust- und rotationsfreie Strömung die Gesamtenergiehöhe konstant und somit in beiden Bezugspunkten gleich. Dies gilt für die Annahme eines inkompressiblen Fluids (d.h. mit konstanter Dichte) und eines stationären Fließzustands im Rohr (d.h. zeitunabhängiges Geschwindigkeitsfeld). Dabei entspricht gemäß dem Prinzip der Massenerhaltung der Durchfluss in Punkt 1 demjenigen in Punkt 2 ($q_1 = q_2$). Die Gesamtenergiehöhe in Punkt 1 setzt sich aus der potentiellen Energie, der Druckenergie sowie der kinetischen Energie zusammen. Diese können, wie in Abbildung 2.4 dargestellt, anschaulich als Energiehöhen mit der Einheit Meter Wassersäule als geodätische Höhe z , Druckhöhe $p/\rho g$ sowie Geschwindigkeitshöhe $v^2/2g$ angegeben werden, bezogen auf ein als Nullwert definiertes Bezugsniveau (Zanke, 2013).

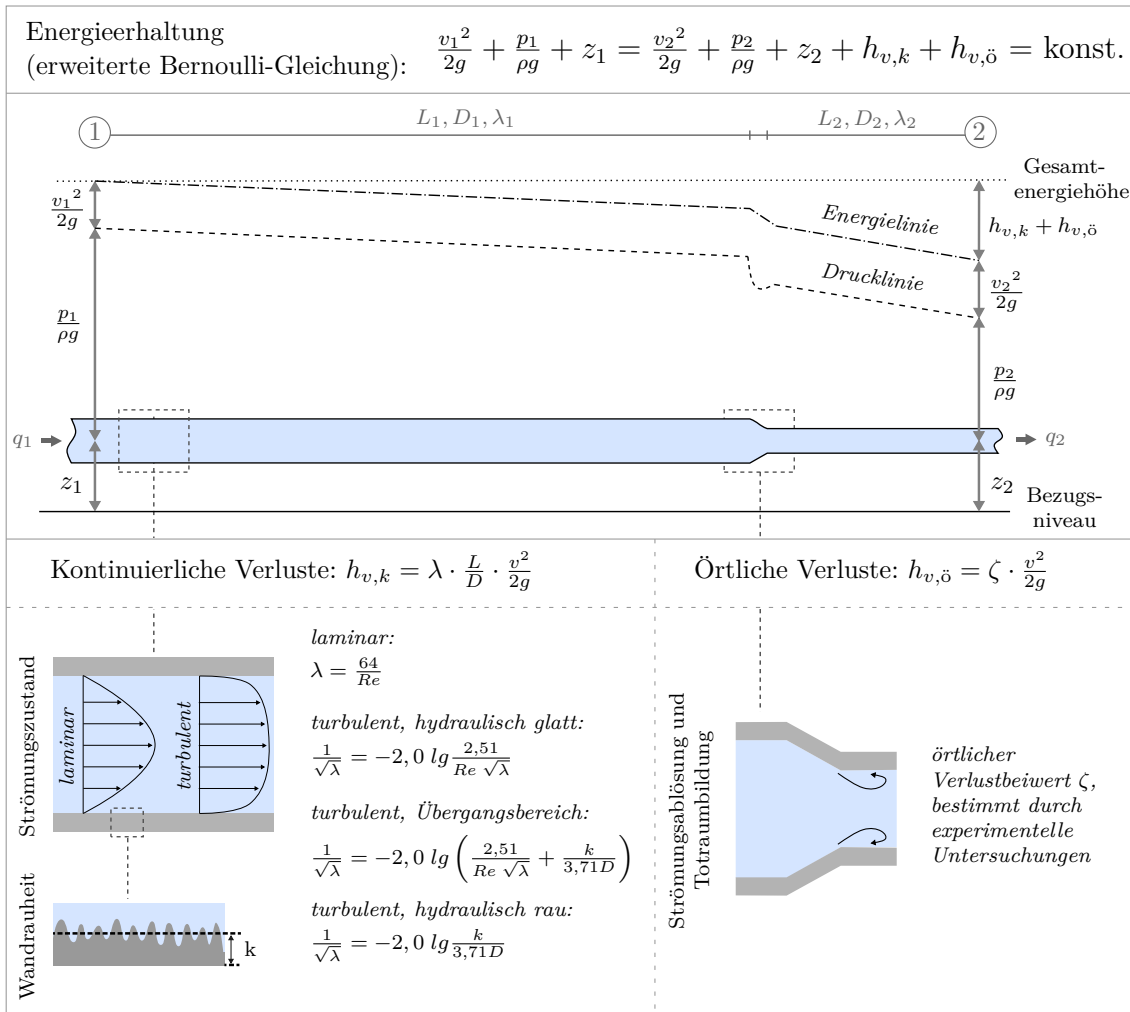


Abbildung 2.4: Prinzip der Energieerhaltung in einem Rohrleitungsabschnitt mit den entsprechenden Energiehöhen, dem Verlauf von Energie- und Drucklinie sowie Ansätzen zur Energieverlustermittlung

Mit der Rohrströmung von Punkt 1 zu Punkt 2 gehen Energieverluste einher, die in der Gesamtenergiehöhe im Punkt 2 als Summe der kontinuierlichen und örtlichen Verluste entlang der durchflossenen Rohrstrecke berücksichtigt sind ($h_{v,k} + h_{v,\delta}$). Die kontinuierliche Verlusthöhe $h_{v,k}$ kann gemäß dem Ansatz von Darcy-Weisbach mittels der in Abbildung 2.4 gegebenen Gleichung bestimmt werden (Rouse, 1946). In dieser ist λ die dimensionslose Rohrreibungszahl, L die Leitungslänge und D der Rohriinnendurchmesser der jeweiligen Leitungsabschnitte. Die Rohrreibungszahl λ hängt dabei zunächst vom Strömungszustand (laminar oder turbulent) ab, d.h. der Geschwindigkeitsverteilung im Rohrquerschnitt. Bei einer turbulenten Strömung kann darüber hinaus die Wandrauheit k einen Einfluss auf die Höhe von λ haben. Daher wird bei der turbulenten Strömung in einen hydraulisch glatten Bereich, einen Übergangsbereich sowie einen hydraulisch rauhen Bereich unterschieden. Die entspre-

chenden, empirisch abgeleiteten Gleichungen zur Bestimmung von λ sind ebenfalls in Abbildung 2.4 gegeben.

Da die Strömung in Wasserversorgungsleitungen vornehmlich turbulent ist, wird vom DVGW die Gleichung für den turbulenten Übergangsbereich zur Ermittlung von λ empfohlen (DVGW, 2006a). Ausführlichere Beschreibungen zur Bestimmung der kontinuierlichen Verlusthöhe finden sich in der allgemeinen Fachliteratur, beispielsweise in Rouse (1946) oder Zanke (2013).

Örtliche Verluste entstehen an Unstetigkeitsstellen im Rohrleitungsverlauf, beispielsweise an geometrischen Änderungen durch Formstücke oder Armaturen. An diesen Stellen erfolgt aufgrund von Strömungsablösungen und Totraumbildungen eine lokale Energiedissipation (Bollrich, 2013). Dies wird bei der Ermittlung der örtlichen Verlusthöhe $h_{v,\delta}$ durch den dimensionslosen, örtlichen Verlustbeiwert ζ in Bezug zur Geschwindigkeitshöhe berücksichtigt (Abbildung 2.4). Der Beiwert ζ ist für nahezu alle gängigen Geometrien in experimentellen Untersuchungen bestimmt worden und kann der Fachliteratur wie beispielsweise von Idelchik und Fried (1986) oder Zoehl und Kruschik (1978) entnommen werden.

Die Energieverluste werden in Abbildung 2.4 durch den in Fließrichtung fallenden Verlauf der Energielinie verdeutlicht, deren Abstand zur Gesamtenergiehöhe der Summe der Verlusthöhen entspricht. Der Gradient der Energielinie hängt von der vorherrschenden Fließgeschwindigkeit ab. Im zweiten Abschnitt unterstrom der Rohrverengung ergibt sich aufgrund des geringeren Rohrdurchmessers eine höhere Fließgeschwindigkeit und somit ein größerer Gradient. Die Drucklinie verläuft parallel zur Energielinie im Abstand der Geschwindigkeitshöhe, die wie erwähnt im zweiten Abschnitt größer als im ersten Abschnitt ist. Der Abstand der Drucklinie zur Rohrachse entspricht der Druckhöhe an der jeweiligen Stelle im Leitungsverlauf. Im Bereich örtlicher Energieverluste fällt die Drucklinie kurzzeitig überproportional ab, da sich in diesem Bereich die Fließgeschwindigkeit aufgrund einer Verringerung des Fließquerschnitts durch Strömungsablösungen und Rückströmungen erhöht.

2.6 Wassermengen- und Druckmessung

2.6.1 Allgemeines

Für einen ordnungsgemäßen Betrieb der Wasserverteilungssysteme ist die Messung der wichtigsten Betriebsparameter wie der geflossenen Wassermengen, der Drücke im Leitungsnetz sowie der Füllstände in den Wasserbehältern unabdingbar. Die Messungen dienen der Steuerung und Überwachung der Anlagenkomponenten sowie ihrer Betriebszustände und geben Auskunft über z.B. Spitzenverbräuche oder Minimal- und Maximaldrücke im Leitungsnetz. Darüber hinaus werden die Wassermengenmessungen für die Ermittlung und Abrechnung der an die Verbraucher gelieferten Mengen sowie zur Wasserverlustermittlung genutzt. Abbildung 2.5 gibt einen Überblick über die gängigen Verfahren und Bauformen der Geräte zur Wassermengen- und Durchflussmessung, die im Folgenden erläutert werden.

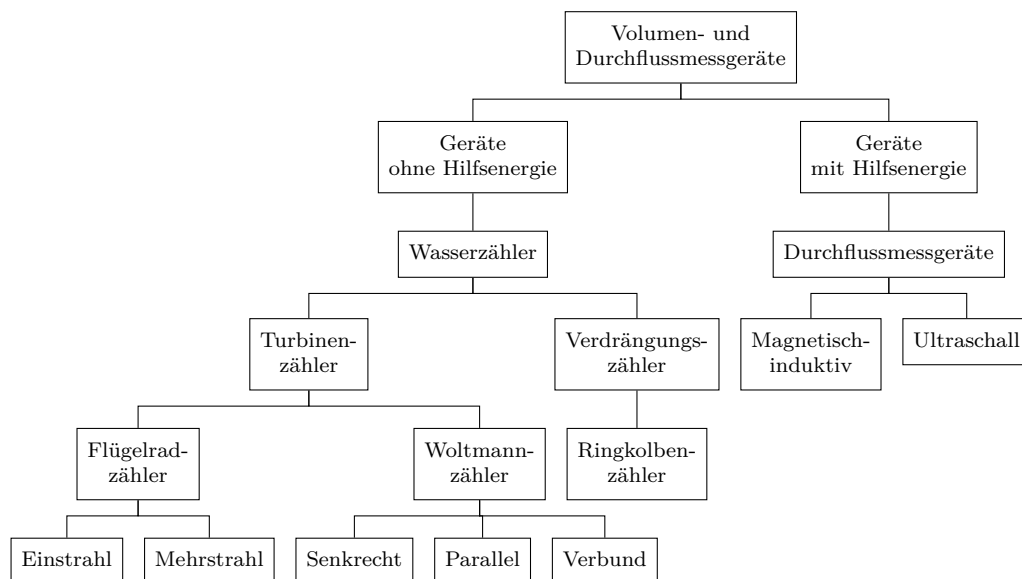


Abbildung 2.5: Volumen- und Durchflussmessgeräte nach Mutschmann u. a. (2014)

2.6.2 Volumenmessung

Die Volumenmessung dient der Erfassung einer Wassermenge, die innerhalb eines beliebigen Zeitabschnitts durch eine Rohrleitung geflossen ist. Ein entsprechendes Messgerät zählt fortlaufend die durch das Gerät fließende Menge und zeigt diese als akkumulierten Wert an. Daher werden diese Messgeräte auch Wasserzähler genannt. Die Zähler werden ausschließlich über die Dynamik des strömenden Wassers angetrieben und benötigen daher im Gegensatz zu den Durchflussmessgeräten keine externe Energiequelle. Die Geräte werden in Turbinen- und Verdrängungszähler unterschieden (Abbildung 2.5). Turbinenzähler ermitteln das durchgeflossene Volumen indirekt über die Messung der Fließgeschwindigkeit des Wassers, während bei Verdrängungszählern das Volumen direkt gemessen wird. Des Weiteren können Wasserzähler als Nass- oder Trockenläufer ausgeführt sein. Bei Nassläufern befinden sich die Messvorrichtung und die Messanzeige im Wasser, während bei den Trockenläufern nur die Messvorrichtung im nassen Bereich ist und über eine Magnetkopplung mit der Anzeige im trockenen Bereich verbunden ist (Mutschmann u. a., 2014).

Im Folgenden werden verschiedenen Bauformen und Messverfahren von Turbinen- und Verdrängungszählern vorgestellt und anschließend in Tabelle 2.3 die Vor- und Nachteile der gängigsten Bauformen zur Messung des Kundenverbrauchs gelistet.

Flügelradzähler: Diese Messgeräte sind den Turbinenzählern zuzuordnen. Die Energie der Wasserströmung wird auf ein rotierendes Flügelrad übertragen, das senkrecht zur Fließrichtung gelagert ist und tangential angeströmt wird. Bei Einstrahlzählern erfolgt die Anströmung des Flügelrads einseitig durch einen Kanal, während bei Mehrstrahlzählern das Rad durch mehrere Anströmkanäle beaufschlagt wird (Abbildung 2.6). Die mehrströmige Beaufschlagung bedingt eine

gleichmäßigere Belastung der Radachse und verbessert das Anlaufverhalten. Bei beiden Zählertypen ist das Messverfahren wie folgt: die Rotationsgeschwindigkeit des Flügelrades und somit die Anzahl der Umdrehungen ist direkt proportional zur Fließgeschwindigkeit des Wassers und damit zum Durchfluss. Über Zahnräder werden die Umdrehungen an ein Rollenzählwerk im Messgerät übertragen, von dem das durchflossene Volumen angezeigt wird. In der Regel werden Flügelradzähler als Wohnungs- und Hauswasserzähler bis zu einem Durchfluss von ca. $15 \text{ m}^3/h$ eingesetzt (Karger und Hoffmann, 2013).

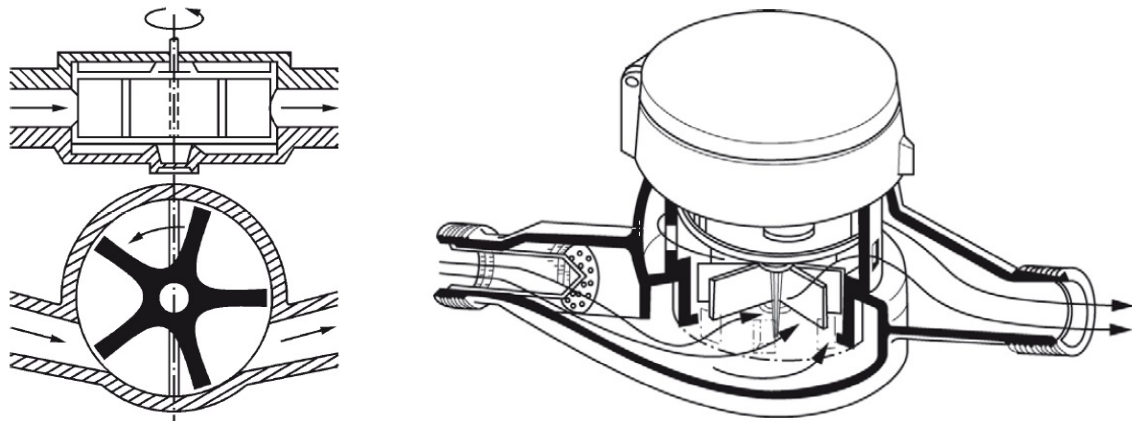


Abbildung 2.6: Aufbau und Messprinzip eines Einstrahl-Flügelradzählers (links) und Mehrstrahl-Flügelradzählers (rechts) (Karger und Hoffmann, 2013; Mutschmann u. a., 2014)

Woltmannzähler: Diese Messgeräte zählen zu den Großwasserzählern und sind ebenfalls den Turbinenzählern zuzuordnen. Bei diesem Zählertyp, der in der Regel bei Durchflüssen über $15 \text{ m}^3/h$ zum Einsatz kommt, wird ein schraubenflächenartiges Flügelrad axial durchströmt. Dadurch wird im Gegensatz zu Flügelradzählern der Fließquerschnitt nur unwesentlich verengt. Dies hat deutlich geringere Druckverluste im Messgerät zur Folge. Je nach Einbaulage wird in Woltmannzähler WP mit parallel zur Rohrachse gelagerter Flügelachse und in Woltmannzähler WS mit senkrecht gelagerter Achse unterschieden (Abbildung 6.7). Bei Ersteren sind die Druckverluste geringer, jedoch aufgrund der Achsenlagerung die Reibung und somit der Anlaufwiderstand höher. Bei Letzteren sind die Druckverluste aufgrund der größeren Strömungsumlenkung höher, allerdings ist das Anlaufverhalten durch die vertikal gelagerte Achse verbessert. Wird ein Woltmannzähler mit einem Flügelradzähler kombiniert, spricht man von einem Verbundwasserzähler. Durch die Kombination dieser beiden Zählertypen mit unterschiedlichen Nenndurchflüssen kann ein breiteres Spektrum an Durchflussmengen abgedeckt und möglichst genau erfasst werden. Bei eher kleinen Durchflüssen, die nicht oder nur ungenau vom Woltmannzähler registriert werden, erfolgt über eine Umschaltvorrichtung die Führung des Wassers durch den Flügelradzähler (Mutschmann u. a., 2014).

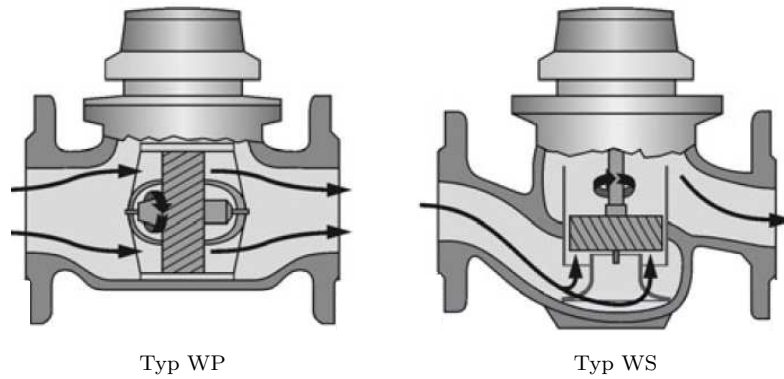


Abbildung 2.7: Aufbau und Messprinzip von Woltmannzählern nach Mutschmann u. a. (2014)

Ringkolbenzähler: Ringkolbenzähler gehören zu den Verdrängungszählern. Im Gegensatz zu den Turbinenzählern erfolgt hier die direkte Erfassung des durchflossenen Volumens in einem bestimmten Zeitabschnitt. Bei diesem Messverfahren rotiert ein ringförmiger Kolben in einer runden Messkammer auf einer exzentrischen Umlaufbahn. Dadurch wird abwechselnd die Ein- und Austrittsöffnung der Messkammer, deren Volumen bekannt ist, freigegeben und über die Anzahl der Füllungen das durchflossene Volumen aufsummiert (Mutschmann u. a., 2014).

Tabelle 2.3: Vor- und Nachteile verschiedener Bauformen von Wasserzählern (Karger und Hoffmann, 2013)

	Vorteile	Nachteile
Einstrahl-Flügelradzähler	unempfindlich gegen Partikel und Sand zuverlässig, einfacher Aufbau langzeitstabile Messgüte	hohe Genauigkeit nur bei horizontalem Einbau
Mehrstrahl-Flügelradzähler	toleriert Partikel im Wasser kostengünstig	empfindlich gegen Ablagerungen
Ringkolbenzähler	Messgenauigkeit bei kleinen Durchflüssen unabhängig von Einbaulage sehr geringe Anlaufwerte unempfindlich gegen hydraulische Störer einfache, kostengünstige Reparatur	empfindlich gegenüber groben Partikeln im Wasser

2.6.3 Durchflussmessung

Bei der Durchflussmessung erfolgt die Erfassung der Wassermenge, die in einem bestimmten Zeitabschnitt durch das Messgerät geflossen ist. Der Anzeigewert schwankt daher in Abhängigkeit des vorherrschenden Durchflusses. Einsatzbereiche von Durchflussmessgeräten sind das Überwachen von Systemkomponenten wie Wasseraufbereitungsanlagen oder die Anzeige von momentanen Durchflüssen im Netz. Dazu werden in der Regel Ultraschall-Durchflussmessgeräte (USD) oder magnetisch-induktive Durchflussmessgeräte (IDM) eingesetzt (Abbildung 2.5). Der Betrieb dieser Geräte ist auf externe Hilfsenergie (Strom) angewiesen (Mutschmann u. a., 2014).

Ultraschall-Durchflussmessgeräte: Bei diesen Geräten wird der Durchfluss durch Multiplikation der mittels Ultraschall gemessenen Fließgeschwindigkeit im Rohr mit dem bekannten Rohrquerschnitt bestimmt. Im Wesentlichen wird dabei zwischen zwei Messverfahren unterschieden, dem Ultraschall-Laufzeit-Verfahren und dem Ultraschall-Doppler-Verfahren. Bei dem ersten Verfahren wird die Fließgeschwindigkeit durch die Laufzeitmessung einer Schallwelle durch das Rohr bestimmt. Bei dem zweiten Verfahren wird die Frequenzänderung einer Schallwelle erfasst, die an Partikeln oder Luftblasen in der sich bewegenden Wassersäule reflektiert wird. In der Trinkwasserversorgung kommen aufgrund der höheren Genauigkeit sowie dem weitgehend homogenen Reinwassers ohne hohen Feststoff- oder Luftanteil vornehmlich USD mit Laufzeitverfahren zum Einsatz. Auch im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Gerät diesen Messprinzips eingesetzt (siehe Abschnitt 6.4.2), das im Folgenden näher erläutert wird.

Das Laufzeit-Verfahren nutzt die Tatsache, dass von einem festen Punkt beobachtet die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Schallwelle abhängig von der Fließrichtung des umgebenden Mediums sowie der Fließgeschwindigkeit ist. So breitet sich ein Schallimpuls in Fließrichtung des Wassers schneller aus als ein Impuls entgegen der Strömung. Durch Messung der Laufzeitdifferenz zwischen den beiden Impulsen kann auf die mittlere Strömungsgeschwindigkeit des Wassers im Rohrquerschnitt geschlossen werden. Dazu sollte ein möglichst rotationssymmetrisches Strömungsprofil im Rohr gegeben sein, bei dem die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit im Rohrquerschnitt ungestört ist. Für die Messung werden üblicherweise zwei Sensoren verwendet. Diese werden zum einen durch elektrische Impulse zur Emission von Ultraschallwellen angeregt (Schallgeber) und können zum anderen Ultraschallwellen empfangen (Schallempfänger) und in elektrische Impulse umwandeln. Die Sensoren sind über ein Kabel mit einem Messumformer verbunden, der die empfangenen Impulssignale verarbeitet und den entsprechenden Durchfluss ermittelt (Arregui u. a., 2006).

In Abbildung 2.8 (links) ist die grundlegende Anordnung der Sensoren sowie das Prinzip des Laufzeitverfahrens dargestellt. Um sowohl den Einfluss von Ablagerungen am Boden des Rohres als auch von möglichen Lufteinschlüssen am oberen Ende des Rohres auf die Messung zu vermeiden, werden die Sensoren möglichst mittig

auf Höhe der Rohrachse installiert. Bei einer Messung wird zunächst von Sensor $S1$ ein Ultraschallimpuls emittiert, der nach der Zeit t_1 am Sensor $S2$ registriert wird. Anschließend entsendet $S2$ einen Impuls, der in der Zeit t_2 den Sensor $S1$ erreicht. Aufgrund der Fließgeschwindigkeit des von $S1$ nach $S2$ strömenden Wassers, die sich auf die ausbreitenden Schallimpulse überträgt, ist t_1 kürzer als t_2 . Über die Differenz der beiden Laufzeiten sowie dem bekannten Innendurchmesser ID des Rohres und dem Einfallswinkel α kann die Fließgeschwindigkeit v und damit der Durchfluss Q im Rohrquerschnitt A gemäß Gleichung 2.1 ermittelt werden (Arregui u. a., 2006).

$$Q = v \cdot A = \frac{(t_2 - t_1) \cdot ID}{\sin(2\alpha) \cdot t_1 \cdot t_2} \cdot \frac{ID^2 \cdot \pi}{4} \quad (2.1)$$

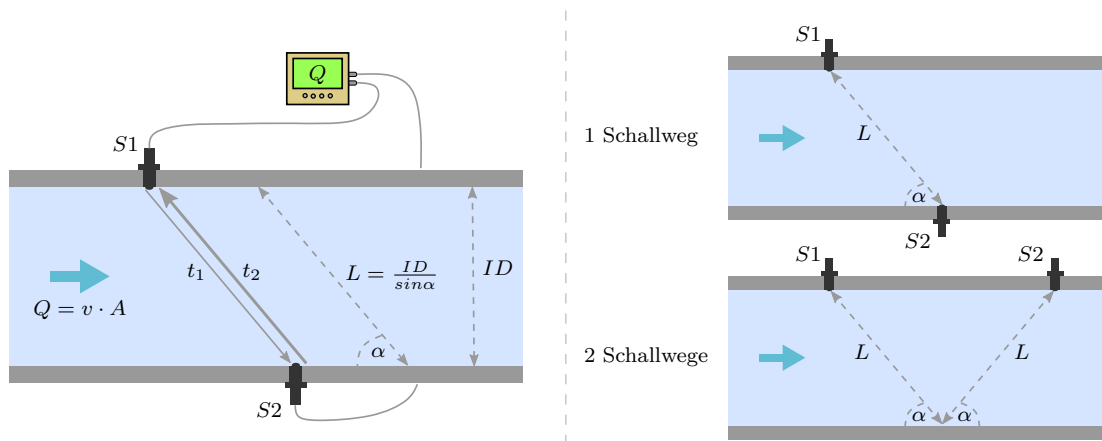


Abbildung 2.8: Laufzeitverfahren (links) und Varianten der Messanordnung (rechts) bei der Ultraschalldurchflussmessung nach Arregui u. a. (2006) und Brucker u. a. (2008)

Bei der Installationsweise der Sensoren am Rohr wird unterschieden in In-Line-Messgeräte und Clamp-On-Messgeräte. Bei Ersteren werden die Sensoren in einem kompakten Gehäuse in den Rohrleitungsstrang eingebaut. Dadurch sind die Sensoren in direktem Kontakt mit dem Wasser, wodurch eine hohe Messgenauigkeit erzielt werden kann. Bei der Clamp-On-Methode werden die Sensoren außen am Rohr angebracht und die Schallimpulse somit durch die Rohrwand gesendet und empfangen (Arregui u. a., 2006). Dazu müssen zur verbesserten Schallübertragung ein Koppelfett zwischen den Sensor-Kontaktflächen und der Rohraußenwand aufgetragen werden und das Rohrmaterial, der Durchmesser sowie die Rohrwandstärke möglichst exakt bestimmt und als Eingangsparameter in das Messgerät (Umformer) eingegeben werden. Die Vorteile sind der mobile Einsatz der Messgeräte sowie deren Anwendung ohne jegliche Eingriffe in das Rohr selbst.

Hinsichtlich der Anordnung der Messsensoren existieren verschiedene Varianten in Bezug auf die Anzahl der Schallwege zwischen Emitter und Empfänger. Bei einer ungeraden Anzahl an Schallwegen werden die beiden Sensoren einander gegenüberliegend an der Rohrwand angeordnet. Bei einer geraden Anzahl werden diese

parallel auf der gleichen Seite des Rohres installiert. Durch diese Anordnung wird der Schallweg verdoppelt, da der Schallimpuls an der gegenüberliegenden Rohrwand reflektiert und anschließend vom Empfänger registriert wird. Abbildung 2.8 (rechts) veranschaulicht die Varianten. Grundsätzlich gilt, dass mit höherer Anzahl an Messpfaden die Messgenauigkeit zunimmt. Durch mehrfaches Kreuzen des Strömungsprofils wird dessen Einfluss auf die Messung reduziert. Zudem wird der Messstrahl verlängert und die Unterschiede in den Laufzeiten zwischen Emitter und Empfänger dadurch erhöht. Allerdings führt die größere Durchlaufstrecke auch zu einer größeren Signaldämpfung im Wasser und das Impulssignal kann durch die Reflexionen sowie mögliche Ablagerungen an den Rohrwänden weiter abgeschwächt werden (Hofmann, 2000).

In den Abbildungen 6.9 und 6.10 in Abschnitt 6.4.2 ist das im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Clamp-On-Messgerät zur Ultraschalldurchflussmessung mittels Laufzeitverfahren dargestellt.

Magnetisch-induktive Durchflussmessgeräte: Diese Geräte bestehen aus einem Messrohr mit elektrisch isolierter Innenwand, das in den Rohrstrang eingebaut wird. Durch zwei Feldspulen auf dem Messrohr wird ein zur Strömungsrichtung senkrecht Magnetfeld erzeugt. Aufgrund der Leitfähigkeit des durchströmenden Wassers wird eine elektrische Spannung induziert, die proportional zur Fließgeschwindigkeit ist. Diese Spannung wird durch senkrecht zur Strömungsrichtung angeordnete Elektroden registriert und an einen Messumformer zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeit weitergegeben. Durch Multiplikation der Geschwindigkeit mit dem bekannten Querschnitt des Messrohrs wird anschließend der Durchfluss berechnet.

IDMs zeichnen sich durch eine hohe Messgenauigkeit sowie eine weitestgehende Unabhängigkeit von Strömungsprofil, Dichte sowie Viskosität des Wassers aus (Brucker u. a., 2008). Nachteil ist die Voraussetzung einer ununterbrochenen Stromversorgung und der erhöhte Energieaufwand zur Erzeugung der magnetischen Wechselfelder.

2.6.4 Druckmessung

Die Druckmessung wird in der Wasserverteilung neben der Überwachung der Versorgungsdrücke auch zur Füllstandsmessung in Behältern angewandt, um dort Wasserentnahme- sowie Wasserverlustmengen zu ermitteln. Die folgenden Ausführungen zu den Messverfahren und Bauformen von Druckmessgeräten basieren auf Gaßmann und Gries (2009).

Grundsätzlich werden bei der elektronischen Druckmesstechnik Sensoren eingesetzt, die den Druck oder die Druckänderung registrieren und in ein elektrisches Signal als Maß des einwirkenden Drucks oder dessen Änderung umwandeln. Dabei wird in die folgenden drei Messprinzipien unterschieden:

- *Resistive Druckmessung*: Messung der elektrischen Widerstandsänderung aufgrund druckabhängiger Verformung von metallischen Dehnungsmessstreifen auf einer Membran.
- *Piezoresistive Druckmessung*: Messung der spezifischen Änderung des Widerstands aufgrund druckabhängiger Verformung von Dehnungsmessstreifen aus Halbleitermaterial.
- *Kapazitive Druckmessung*: Messung der Kapazitätsänderung eines Zweiplattenkondensators durch Verringerung des Plattenabstands.

Die gängigsten Bauformen elektronischer Druckmessgeräte sind Druckmessumformer, Druckschalter, Drucktransmitter sowie Pegelsonden. Grundsätzlich setzen sich alle Bauformen aus den folgenden Komponenten zusammen: Druckanschluss, Drucksensorik, Elektronik und Gehäuse. Der Druckmessumformer wandelt den gemessenen Druck in ein Standard-Industriesignal (z.B. 4...20 mA) um, das an die nachgeschaltete Signalauswertung weitergegeben wird. Der Druckschalter basiert auf dem Prinzip des Umformers, stellt jedoch weitere Funktionen wie ein Display zur digitalen Messwertanzeige sowie einen elektronischen Schalter für einfache Steuerungsaufgaben bereit. Drucktransmitter sind ebenfalls Druckmessumformer, die u.a. die individuelle Einstellung von Messbereichen sowie anderer Parametern ermöglichen. Alle drei Bauformen werden über ein Gewinde direkt in die Messstelle (z.B. Rohrwand) eingeschraubt. Im Gegensatz dazu ist die Pegelsonde ein Druckmessgerät, das dauerhaft in das Medium Wasser zur Messung des hydrostatischen Drucks eingetaucht wird. Dies dient vornehmlich der Füllstandsmessung in Speicherbehältern, Brunnen oder Bohrlöchern.

Im Folgenden wird das Messprinzip und die Bauform einer kapazitiven Pegelsonde näher erläutert, da diese im Rahmen dieser Arbeit im Projektgebiet zur Füllstandsmessung in einem Wasserturm eingesetzt wurde (siehe Abschnitt 6.4.2). Wie in Abbildung 2.9 dargestellt besteht der Zweiplattenkondensator aus einer festen und einer beweglichen Platte, die im Ausgangszustand den Abstand d haben. Die bewegliche Platte ist eine metallische Membran, die bei Druckeinwirkung in Richtung der festen Platte verschoben wird. Dadurch verringert sich der Abstand d , was gemäß Gleichung 2.2 eine Zunahme der Kondensatorkapazität C bei unveränderter Plattenfläche A und Dielektrizitätskonstante ϵ bewirkt. Die Kapazitätsänderung wird dann in ein elektrisches Ausgangssignal umgewandelt und in die entsprechende Druckänderung übersetzt. Mit diesem Messprinzip kann eine hohe Messgenauigkeit erreicht werden. Außerdem werden kapazitive Drucksensoren durch die maximal mögliche Auslenkung der beweglichen Platte bis zur festen Platte vor Überlast geschützt.

$$C = \epsilon \cdot \frac{A}{d} \quad (2.2)$$

Der Kondensator ist in ein hermetisch dichtes und korrosionsbeständiges Gehäuse eingebaut. Im Fall der im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Pegelsonde ist diese mit einem Datensammler zum Speichern der Messwerte kombiniert. Über ein

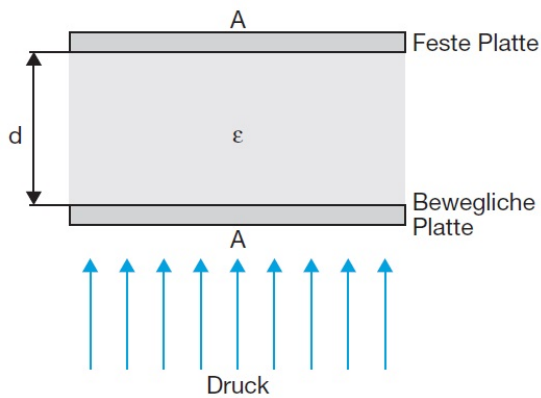


Abbildung 2.9: Prinzip der kapazitiven Druckmessung (Gaßmann und Gries, 2009)



Abbildung 2.10: Kapazitive Pegelsonde mit Kommunikationseinheit (OTT, 2010)

Kabel sind Sonde und Speicher mit einer Kommunikationseinheit verbunden, die dem Auslesen der Messwerte sowie der Spannungsversorgung des Messgeräts dient. Da im Anwendungsfall der Relativdruck, d.h. der hydrostatische Druck in Relation zum lokal herrschenden Luftdruck, gemessen wird, ist in das Verbindungskabel eine Druckausgleichskapillare (Hohlraum) integriert. Diese steht in Verbindung mit dem Umgebungsdruck, der somit als Referenz für die Druckmessung verfügbar ist (OTT, 2010). In Abbildung 2.10 sind die Pegelsonde sowie die Kommunikationseinheit des im Projektgebiet eingesetzten Druckmessgeräts dargestellt.

2.6.5 Messabweichungen

2.6.5.1 Allgemeines

Bei jeder physikalischen Messung treten aufgrund verschiedener Ursachen Messabweichungen auf, die als Abweichung eines Messwertes vom wahren Wert definiert ist (ISO/IEC, 2008). Grundsätzlich haben Messabweichungen eine zufällige und eine systematische Komponente (Abbildung 2.11). Die zufällige Messabweichung entsteht durch nicht vorhersagbare und nicht beherrschbare Einflüsse des Messgeräts sowie zeitliche und räumliche Veränderungen von Einflussgrößen. Dadurch ergibt sich eine zufällige Streuung der ermittelten Messwerte, die nicht komplett ausgeglichen, jedoch durch eine Vergrößerung der Anzahl der Messungen verringert werden kann. Systematische Messabweichungen dagegen sind bei konstanten Messbedingungen wiederholt ermittelbar, wobei jedoch die Schwierigkeit besteht, eine systematische Abweichung zu erkennen. Ursachen dieser Abweichungen sind z.B. die Unvollkommenheit des Messgeräts, Umwelteinflüsse (z.B. Temperatur) oder die von den Geräteherstellern angegebenen maximal zulässigen Messabweichungen (Fehlergrenzen). Dabei wird in bekannte und unbekannt systematische Abweichungen unterschieden. Das Messergebnis sollte hinsichtlich bekannter systematischer Abweichungen so gut wie möglich korrigiert werden (Mühl, 2017).

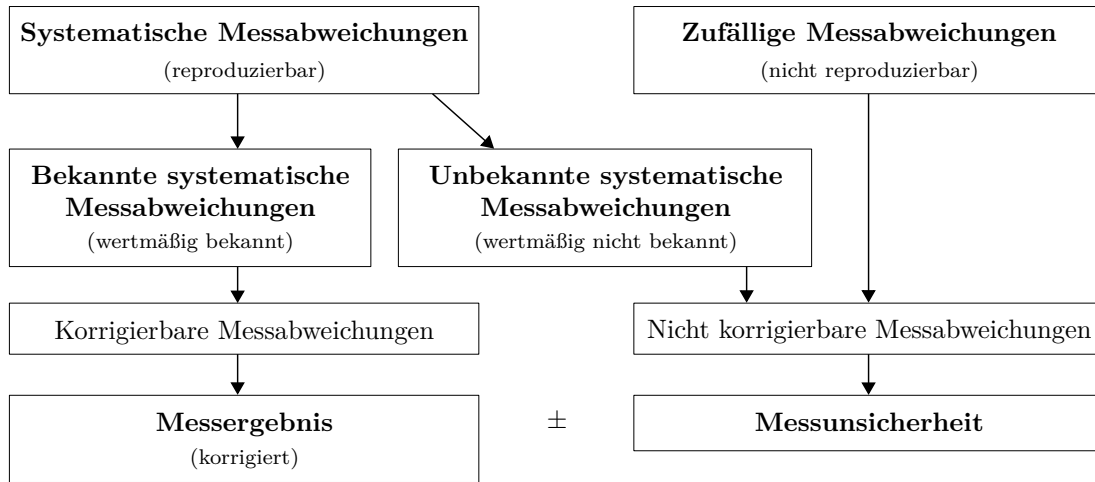


Abbildung 2.11: Vollständiges Messergebnis mit der abgeleiteten Messunsicherheit (Mühl, 2017)

Die zufälligen und die nicht bekannten systematischen Messabweichungen werden in der Praxis gemäß der ISO/IEC (2008) als Messunsicherheit u zusätzlich zum Messergebnis angegeben (Abbildung 2.11). Die Messunsicherheit gilt als quantitatives Maß der Genauigkeit der Messung und gibt als Schätzwert den Bereich um den Messwert an, in dem der wahre Wert liegen kann. Die Unsicherheit besteht meist aus mehreren Komponenten, die entweder mittels statistischer Analyse der Messergebnisse (Ermittlungsmethode A) oder aus verfügbaren Informationen (Ermittlungsmethode B), wie z.B. Angaben von Geräteherstellern, ermittelt werden. Bei Ermittlungsmethode A wird eine Messgröße mehrmals gemessen und der Mittelwert als Schätzwert gebildet, der sich aus den einzelnen Messwerten ergibt. Die Unsicherheit wird dann als Standardabweichung des Mittelwerts berechnet. Bei Ermittlungsmethode B wird die Unsicherheit durch eine wissenschaftliche Beurteilung von verfügbaren Informationen ermittelt. Beispielsweise werden von Gerätehersteller die obere und untere Fehlergrenze angegeben, die die vereinbarten oder garantiert höchsten Abweichungen vom wahren Messwert kennzeichnen (ISO/IEC, 2008).

Bei der Ermittlung der Messunsicherheit muss berücksichtigt werden, ob sich das Messergebnis aus einer oder mehreren Eingangsgrößen zusammensetzt. In Bezug zu dieser Arbeit ergibt sich beispielsweise das Ergebnis der Wasserverlustmengen u.a. aus der Messung von den eingespeisten und entnommenen Wassermengen in einem Versorgungsgebiet. Wird ein Messergebnis Y aus mehreren, voneinander unabhängigen Eingangsgrößen X_1, X_2, \dots, X_n berechnet, so ist für dieses Messergebnis die kombinierte Unsicherheit $u_c(y)$ anhand der Unsicherheiten der Eingangsgrößen $u(x_i)$ gemäß Gleichung 2.3 zu ermitteln.

$$u_c(y) = \sqrt{u^2(x_1) + u^2(x_2) + \dots + u^2(x_n)} \quad (2.3)$$

Die kombinierte Unsicherheit $u_c(y)$ kann gemäß Gleichung 2.4 noch mit dem Erweiterungsfaktor k multipliziert und somit zur erweiterten Unsicherheit U werden. Durch k wird der Bereich um das Messergebnis definiert, „von dem erwartet werden kann, dass er einen großen Anteil der Verteilung der Werte umfasst, die der gemessenen Größe sinnvollerweise zugeordnet werden können“ (DIN, 1995b). Der gewählte Wert von k , der üblicherweise zwischen 2 und 3 liegt, definiert das Vertrauensniveau p (z.B. 95 % für $k = 2$ und 99 % für $k = 3$).

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (2.4)$$

Damit lässt sich ein Messergebnis Y gemäß Gleichung 2.5 mit y als bestem Schätzwert zusammen mit der erweiterten Unsicherheit U angeben (DIN, 1995b).

$$Y = y \pm U \quad (2.5)$$

2.6.5.2 Messabweichung Wasserzähler

Die Höhe der Messabweichung von Wasserzählern wird von verschiedenen Faktoren wie den zulässigen Fehlergrenzen, Einbauort und -lage, Dimensionierung, Alter und Verschleiß sowie dem Entnahmeverhalten bei bestimmten Hausinstallationen beeinflusst, die im Folgenden erläutert werden.

Zulässige Fehlergrenzen der Wasserzähler: Wasserzähler, die im geschäftlichen Verkehr z.B. bei der Lieferung und Abrechnung von Wasser an Haushalte eingesetzt werden, müssen den Anforderungen des Eichrechts entsprechen. Gemäß der in Deutschland gültigen Eichordnung gilt diesbezüglich, dass die Verkehrsfehlergrenzen das Doppelte der Eichfehlergrenzen betragen. Die Verkehrsfehlergrenzen sind die bei eichpflichtigen Messgeräten maximal zulässigen Messabweichungen vom wahren Wert während des Einsatzes innerhalb der Eichgültigkeitsdauer, die für Kaltwasserzähler derzeit sechs Jahre beträgt (Stefanski, 2009; BMJV, 2019). Die Eichfehlergrenzen sind in der europäischen Richtlinie 2004/22/EG über Messgeräte geregelt, die oftmals auch als MID (englisch: *Measuring Instruments Directive*) bezeichnet wird. Darin werden u.a. die Zählerbezeichnungen und deren charakterisierende Durchflüsse definiert. Diese Durchflusspunkte kennzeichnen verschiedene Belastungsbereiche der Zähler, innerhalb derer die Fehlergrenzen einzuhalten sind. Gemäß der MID (EG, 2004) werden Wasserzähler über die folgenden Durchflusspunkte charakterisiert:

- *Minstdurchfluss* Q_1 : Kleinster Durchfluss, bei dem der Wasserzähler noch innerhalb der zugelassenen Fehlergrenzen misst.
- *Übergangsdurchfluss* Q_2 : Durchfluss, der den Durchflussbereich in einen unteren und einen oberen Belastungsbereich unterteilt, in denen jeweils unterschiedliche Fehlergrenzen gelten.

- *Dauerdurchfluss* Q_3 : Größter Durchfluss, bei dem der Zähler unter normalen Bedingungen ausreichend genau misst.
- *Überlastdurchfluss* Q_4 : Größter Durchfluss, bei dem der Zähler kurzzeitig ohne Beeinträchtigung ausreichend genau misst.

Die entsprechenden Eichfehlergrenzen betragen 5 % im unteren Belastungsbereich zwischen dem Mindestdurchfluss Q_1 und dem Übergangsdurchfluss Q_2 sowie 2 % im oberen Belastungsbereich, der vom Übergangsdurchfluss Q_2 und dem Überlastdurchfluss Q_4 begrenzt ist. Die zulässigen Verkehrsfehlergrenzen betragen somit 10 % im unteren und 4 % im oberen Belastungsbereich.

Über die Durchflusspunkte werden die Zähler außerdem hinsichtlich ihrer Größe und messtechnischen Eigenschaften unterschieden. Dazu sind von den Herstellern der Dauerdurchfluss Q_3 sowie das Verhältnis von Dauer- zu Mindestdurchfluss (Q_3/Q_1), das als Ratio R bezeichnet wird, anzugeben. Die Ratio R definiert die Genauigkeitsklasse des Zählers: Je höher R , desto genauer misst der Zähler. Darüber hinaus sind in der Richtlinie die Werte der Verhältnisse von Übergangs- zu Mindestdurchfluss mit $Q_2/Q_1 = 1,6$ und von Überlast- zu Dauerdurchfluss mit $Q_4/Q_3 = 2,25$ festgelegt. Damit können die übrigen Durchflussgrößen zur Leistungsbeschreibung und Definition der Belastungsbereiche eines Zählers ermittelt werden (Stefanski, 2007).

In Tabelle 2.4 sind für die in Deutschland am häufigsten eingesetzten Baugrößen von Hauswasserzählern ($Q_3 = 2,5$ und $Q_3 = 4$) die entsprechenden Durchflüsse bei unterschiedlicher Ratio R gelistet. Zudem sind in Abbildung 2.12 die Eichfehlergrenzen sowie die Belastungsbereiche beispielhaft für den Zählertyp $Q_3 = 4$ R80 dargestellt.

Tabelle 2.4: Beispiele für Baugrößen und Genauigkeitsklassen von Wasserzählern nach Karger und Hoffmann (2013)

		R=40		R=80		R=100		R=160	
Q_3 in	Q_4 in	Q_1 in	Q_2 in	Q_1 in	Q_2 in	Q_1 in	Q_2 in	Q_1 in	Q_2 in
m ³ /h	m ³ /h	l/h	l/h	l/h	l/h	l/h	l/h	l/h	l/h
2,5	3,125	63	100	31	50	25	40	16	25
4	5	100	160	50	80	40	64	25	40

Einbauort und -lage: Grundsätzlich gilt, dass Wasserzähler in jederzeit mit Wasser vollgefüllte Leitungsabschnitte einzubauen sind (DVGW, 2012). Dadurch werden Messabweichungen durch Luftpneumatische Einschlüsse vermieden. Zudem sind die Geräte je nach Zählertyp und Bauform in einer bestimmten Lage in die Rohrleitung einzubauen, um die vorgesehene Genauigkeit der Wasserzählung zu gewährleisten. In einer Feldstudie zeigten Arregui u. a. (2006), dass sich bei Flügelradzählern, die üblicherweise für eine horizontale Lage und daher den Betrieb mit senkrecht stehender Flügelradachse konzipiert sind, erhebliche Genauigkeitsunterschiede beim Betrieb in geneigten Einbaupositionen (45° bzw. 90° geneigt gegenüber horizontaler Lage)

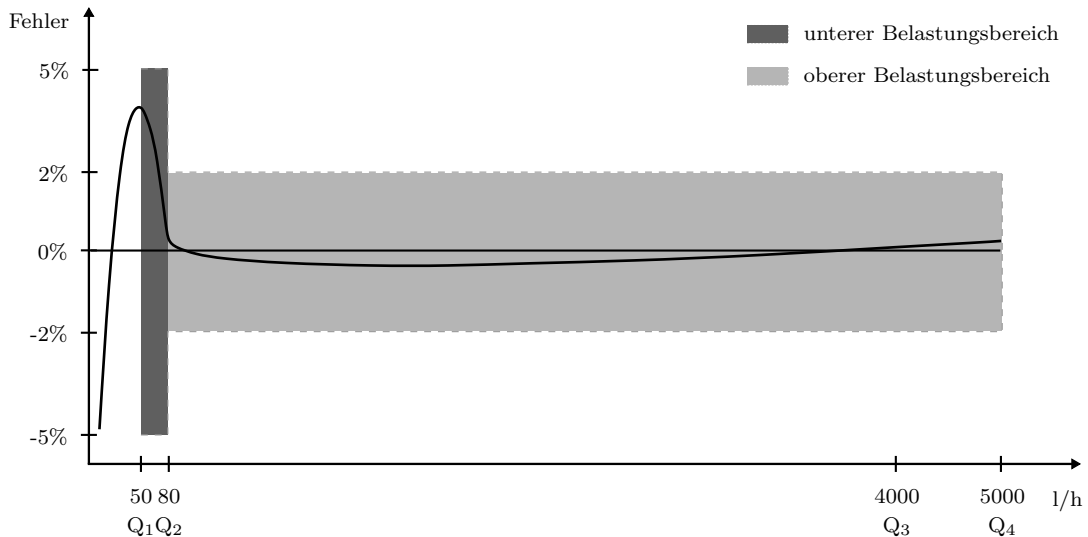


Abbildung 2.12: Fehlergrenzen und Belastungsbereiche für den Zählertyp $Q_3=4$ R80 nach ZENNER (2011)

ergeben. Durch die höhere Belastung auf die Lagerung des Flügelrades und somit einen erhöhten Reibungswiderstand ergaben sich bei geneigter Lage, vor allem bei einer 45° -Neigung, zum Teil deutlich höhere Messabweichungen. Neben dem unmittelbaren Einfluss führt die geneigte Einbaulage auch langfristig gesehen zu einem schnelleren Verschleiß und somit zu einer beschleunigten Abnahme der Genauigkeit des Zählers. Allerdings ist zu beachten, dass Flügelradzähler auch für den Einbau in vertikaler Position (90° geneigt) gemäß der MID (EG, 2004) zugelassen sein können. Die entsprechend geringere Zählergenauigkeit wird in diesem Fall als separate Ratio R angegeben (Beispiel: Genauigkeitsklasse R80H40V, mit H für horizontale und V für vertikale Einbaulage).

Ringkolbenzähler und Woltmannzähler sind hinsichtlich der Messabweichung relativ unempfindlich gegen geneigte Einbaulagen. Bei Woltmannzähler ist für die genaue Messung darauf zu achten, dass oberstrom des Zählers eine ausreichend lange, gerade Rohrstrecke mit der Nennweite des Zählers vorhanden ist. Dadurch wird ein ungestörtes Strömungsprofil im gesamten Rohrquerschnitt gewährleistet. Ist das Strömungsprofil an der Einbaulage eines Woltmannzählers gestört, beispielsweise durch einen Krümmer oder Schieber, müssen diesbezüglich Vorrichtungen wie z.B. ein Strömungsgleichrichter eingebaut werden, um die Messgenauigkeit zu erhalten (DVGW, 2012).

Dimensionierung: Für die Dimensionierung von Wasserzählern gilt, dass der Haupteinsatzbereich des Zählers möglichst gut mit den zu erwartenden Durchflussverhältnissen in der Anschlussleitung des Verbrauchers übereinstimmen sollte. Daher sollte ein Großteil der Verbrauchsmengen innerhalb des oberen Belastungsbereichs des Zählers zwischen Q_2 und Q_3 liegen. Eine Überdimensionierung

von Zählern führt nach einer Feldstudie von Hofmann u. a. (2010) zu Messabweichungen, die teilweise über die zulässigen Verkehrsfehlergrenzen hinausgehen. Grund dafür ist, dass die Zähler zum überwiegenden Teil im Bereich ihrer unteren Belastungsgrenze betrieben werden. In diesem Bereich erfolgt die Messung gemäß der in Abbildung 2.12 dargestellten typischen Fehlerkurve mit einem positiven Fehler. Dieser führt zu einer Überregistrierung zu Lasten der Verbraucher, d.h. es wird mehr Wasservolumen vom Zähler registriert als tatsächlich durch den Zähler geflossen ist. Darüber hinaus zeigte eine Studie von Wendt (2011), dass insbesondere bei überdimensionierten Wasserzählern kurzzeitige, geringe Entnahmemengen und kleine Durchflüsse zu einem Nachlaufen und somit einer Überregistrierung des Zählers führen können. Grund dafür ist die Massenträgheit des Flügelrades, das sich nach einem abrupten Stopp des Durchflusses (z.B. durch Schließen eines Wasserhahns) kurzzeitig weiterdreht.

Eine Überdimensionierung kann auch zu negativen Messabweichungen, sogenannten Schleichverlusten, führen. Diese ergeben sich beim Betrieb des Zählers unterhalb des Mindestdurchflusses Q_1 durch die geringen Fließgeschwindigkeiten am Zähler. Aufgrund der Reibungswiderstände des Flügelrades ist in diesem Durchflussbereich das Verhältnis von Fließgeschwindigkeit und der Drehgeschwindigkeit des Flügelrades nicht mehr linear und es kommt zu einer Unterregistrierung der tatsächlichen Durchflussmengen. Sind die Verbräuche noch geringer und liegen die Durchflussmengen unter dem Anlaufdurchfluss des Zählers, reicht die kinetische Energie des Wassers nicht mehr zur Überwindung des Anlaufwiderstandes des Flügelrades und es wird keine Durchflussmenge gemessen (Arregui u. a., 2007). Beispiele hierfür sind tropfende Wasserhähne oder undichte Toilettenspülungen, die bei längerer Laufzeit ohne Reparatur zu erheblichen Messabweichungen zu Lasten des Versorgungsunternehmens führen können.

Eine Unterdimensionierung von Wasserzählern kann dazu führen, dass die Geräte häufig im Bereich ihres Überlastdurchflusses Q_4 betrieben werden. Dadurch sind die mechanischen Messkomponenten der Zähler einer erhöhten Belastung ausgesetzt, die zu einem schnelleren Verschleiß dieser Komponenten und somit einer rascheren Abnahme der Zählergenauigkeit führt (Arregui u. a., 2005).

Alter und Verschleiß: Mit zunehmendem Alter der Wasserzähler nimmt der Verschleiß der mechanischen Messkomponenten zu, was insbesondere bei geringen Durchflüssen zu erheblichen Messabweichungen in Form von Unterregistrierung führen kann (siehe vorherige Abschnitte). Der Verschleiß des Zählers wird durch abrasive Feststoffe im Wasser, die auf die beweglichen Messkomponenten treffen und dort zu Abrieb führen, noch beschleunigt (Arregui u. a., 2005).

Des Weiteren haben Sediment- oder Kalkablagerungen, die sich im Laufe der Zeit im Messgehäuse eines Zählers bilden können, Einfluss auf dessen Genauigkeit. Bei Flügelradzählern nehmen die Ablagerungen im ungünstigsten Fall ein Ausmaß an, durch das die Drehbewegung des Flügelrades komplett verhindert und somit kein Durchfluss mehr gemessen wird. Auch Ablagerungen geringeren Ausmaßes beeinflussen bereits die Zählergenauigkeit, wie eine experimentelle Studie von Arregui u. a.

(2005) zeigt. Dabei wurde der Einlauffilter der Zähler zum einen durch Ablagerungen über den gesamten Rand (radiale Einengung) sowie zum anderen über den Filterquerschnitt zufällig verteilte Ablagerungen (lokale Einengungen) teilweise zugesetzt. Im ersten Fall führte die radiale Einengung zu erhöhten Geschwindigkeiten des auf das Flügelrad auftreffenden Wasserstrahls, der dadurch zu erheblichen positiven Messabweichungen führte. Im zweiten Fall kam es durch die lokalen Einengungen zu einer Vielzahl von kleinen Strahlen mit hohen Geschwindigkeiten, die jedoch geringere Messabweichungen zur Folge hatten. Grund hierfür ist, dass sich die Vielzahl an Wasserstrahlen innerhalb einer kürzeren Fließstrecke wieder zu einem vollständig ausgebildeten Strömungsprofil im Querschnitt vereinen (Arregui u. a., 2005).

Ringkolbenzähler sind relativ empfindlich gegenüber Ablagerungen sowie Feststoffen (z.B. Sandpartikeln), da diese zu einer Blockade des rotierenden Kolbens und somit zu einer Verhinderung des Durchflusses durch den Zähler führen können (Arregui u. a., 2006).

Hausinstallationen: Das Entnahmeverhalten der Verbraucher hat ebenfalls Einfluss auf die Messabweichung von Wasserzählern. Wie bereits beschrieben führen sehr geringe Entnahmemengen zu Schleichverlusten, da die zugehörigen Durchflüsse zum Teil unter dem Anlaufdurchfluss eines Zählers liegen. Dies gilt insbesondere bei privaten Speichertanks auf Verbraucherseite, die in intermittierend betriebenen Wasserversorgungssystemen häufig zur Zwischenspeicherung des Wassers eingesetzt werden. Diese Tanks sind zur Vermeidung von Überläufen während der Befüllung aus dem Leitungsnetz oftmals mit Schwimmentilfen ausgestattet. Die Ventile, deren Öffnungsgrad mechanisch über den Wasserspiegel geregelt wird, reagieren teilweise sehr sensibel auf geringe Wasserspiegeländerungen. Dies kann dazu führen, dass sich zu Zeiten geringen Verbrauchs die Ventile bei fast maximalem Füllstand im Behälter nur geringfügig und kurzzeitig öffnen und anschließend wieder schließen. Dadurch entstehen zu diesen Zeiten der Befüllung permanent geringe Durchflüsse, die zu einem erheblichen Teil nicht von den eingesetzten Wasserzählern registriert werden (Criminisi u. a., 2009).

2.6.5.3 Messabweichung Durchflussmessgeräte

Durchflussmessgeräte weisen grundsätzlich eine höhere Messgenauigkeit als Wasserzähler auf. Allerdings hängt die Messgenauigkeit stark von den Einbaubedingungen, der Wasserbeschaffenheit sowie dem vorherrschenden Strömungsprofil im Rohrquerschnitt ab. Im Folgenden werden die wesentlichen Einflussgrößen hinsichtlich den Messabweichungen von USD und IDM basierend auf Arregui u. a. (2005) vorgestellt.

USD: Bei idealen Voraussetzungen können Geräte mittels dem Ultraschall-Laufzeit-Verfahren mit Abweichungen unter 1 % messen. In der Praxis liegen diese jedoch meist höher (ca. 2 bis 3 %). Für eine genaue Messung muss ein störungsfreies, rotationssymmetrisches Strömungsprofil vorliegen. Daher werden von Herstellerseite Angaben über die mindestens einzuhaltende Länge einer geraden,

ungestörten Rohrstrecke oberstrom des Messortes gemacht. Darüber hinaus können Luftblasen im oberen Rohrquerschnitt sowie Sedimentablagerungen am Rohrboden die Messgenauigkeit beeinflussen. Daher sollten die Ultraschall-Sensoren möglichst mittig auf Höhe der Rohrachse installiert werden. Nichtsdestotrotz wird Luft in Rohrleitungen als Wasser gemessen und somit das Ergebnis verfälscht. Sedimentablagerungen verengen den Rohrquerschnitt und führen zu einer höher gemessenen Fließgeschwindigkeit und somit ebenfalls zu einer ungenaueren Messung. Daher sollten die Fließgeschwindigkeiten im Rohr möglichst hoch sein, um die Ablagerung von Sedimenten generell zu vermeiden.

Bei Clamp-On-Messgeräten hängt die Messgenauigkeit außerdem vom Rohrmaterial sowie der Kenntnis des exakten Rohrinne durchmessers ab, die als Eingangsparameter in das Gerät eingegeben werden müssen. Poröse Rohrmaterialien wie Asbestzement oder Stahlbeton können zu einem erheblichen Signalverlust an den Sensoren führen. Generell sollten vor der Sensorinstallation der Rohranstrich sowie Schmutz an diesen Stellen entfernt werden, um somit die akustische Kopplung zwischen den Sensoren und der Rohrwand zu verbessern.

Das Ultraschall-Doppler-Verfahren weist höhere Messungenauigkeiten auf, da nicht die Geschwindigkeit des Wassers sondern der mitgeführten Partikel oder Luftblasen gemessen wird. Zwischen beiden Fließgeschwindigkeiten können lokal erhebliche Unterschiede bestehen, die zu einer erhöhten Messabweichung führen.

IDM: Mit magnetisch-induktiven Durchflussmessgeräten können bei gegebenen Voraussetzungen die Messabweichungen unter 0,5 % liegen. Beeinflusst wird die Messgenauigkeit durch die vorherrschende Leitfähigkeit des durchströmenden Wassers, das Strömungsprofil sowie Feststoffe und Kalkablagerungen. Daher sollte zunächst vermieden werden, dass Partikel mit einer höheren Leitfähigkeit als Wasser mitgeführt werden. Das Gerät misst ansonsten diese Leitfähigkeit und liefert somit ein verfälschtes Messergebnis. Das Strömungsprofil im Messraum sollte ungestört und rotationssymmetrisch sein, daher ist oberstrom eine gewisse Länge an gerader Rohrstrecke zu gewährleisten. Luftblasen im durchströmenden Wasser führen zu einer Überregistrierung, da die Luft als Wasser gemessen wird. Abrasive Feststoffe können zu einem erhöhten Verschleiß, vor allem der elektrisch isolierenden Innenbeschichtung des Messrohrs führen. Ebenso können Kalkablagerungen an den Elektroden zu einer erhöhten Abweichung der Spannungsmessung führen. Daher wird empfohlen, die Fließgeschwindigkeit im Messrohr entsprechend hoch zu halten, um Ablagerungen zu vermeiden.

2.6.5.4 Messabweichung Druckmessung

Die Messabweichung eines Druckmessgeräts kann aus der Kennlinie abgelesen werden, die den Zusammenhang zwischen Ausgangssignal und Druck im gesamten Messbereich darstellt (Abbildung 2.13). Dabei wird die reale mit der idealen Kennlinie verglichen. Im Idealfall ändert sich das Ausgangssignal linear mit dem Druck, daher ist die ideale Kennlinie eine Gerade. Die reale Kennlinie weicht jedoch aufgrund

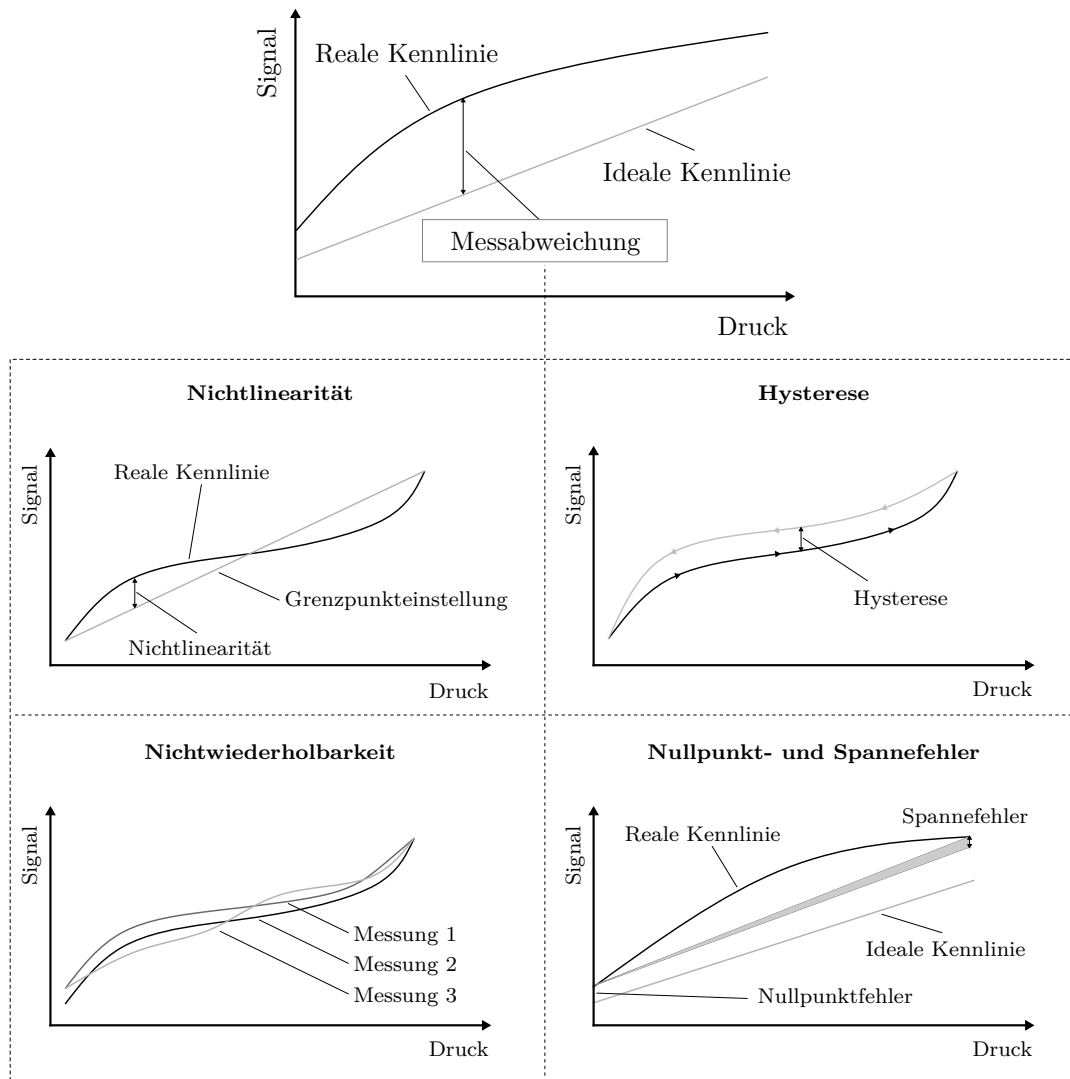


Abbildung 2.13: Kennlinien eines Druckmessgeräts (oben) sowie Komponenten der Messabweichung bei der Druckmessung (unten) nach Gaßmann und Gries (2009) und STS (2017)

von Messabweichungen unterschiedlicher Herkunft von der idealen Kennlinie ab. Die Höhe der gesamten Messabweichung setzt sich bei einer bestimmten Referenztemperatur im Wesentlichen aus den Messfehlern bedingt durch die Nichtlinearität, die Hysterese, die Nichtwiederholbarkeit sowie den Nullpunkt- und Spannefehler zusammen (Gaßmann und Gries, 2009):

- *Nichtlinearität:* Die Messabweichung durch Nichtlinearität ist die größtmögliche Abweichung der realen Kennlinie von einer Referenzgeraden. Die zwei gängigsten Methoden der Bestimmung der Referenzgeraden sind die Grenzpunkteinstellung und die Kleinstwerteeinstellung. Bei der Grenzpunkteinstellung, die in Abbildung 2.13 dargestellt ist, liegt die Gerade zwischen Anfangs-

und Endpunkt der realen Kennlinie. Die Kleinstwerteeinstellung erfolgt derart, dass die Referenzgerade so zur realen Kennlinie positioniert wird, dass die Quadratsumme der Abweichungen minimal ist.

- *Hysterese*: Diese bezeichnet die maximale Abweichung, die sich durch die Nichtübereinstimmung des Ausgangssignals bei identischen Drücken während einem kontinuierlichen Druckanstieg und einer anschließenden Druckabnahme ergibt (Abbildung 2.13). Grund für die Hysterese ist vor allem das elastische Verhalten des Sensormaterials.
- *Nichtwiederholbarkeit*: Diese beschreibt die größte Messabweichung, die sich aus drei Messungen unter identischen Bedingungen ergibt (Abbildung 2.13).
- *Nullpunkt- und Spannefehler*: Diese Fehler sind als Differenzen zwischen den real gemessenen und den idealen Werten des Nullpunkts und des Endpunkts des Ausgangssignals definiert (Abbildung 2.13). Diese sind unabhängig voneinander zu betrachten, d.h. der Spannefehler beinhaltet nicht den Nullpunktfehler. Üblicherweise werden der Nullpunkt- und Spannefehler bereits von Herstellerseite durch Justierung des Messgeräts kompensiert (Offset-Einstellung).

Neben den genannten Messfehlerursachen wird die gesamte Messabweichung auch durch die vorherrschende Temperatur beeinflusst, da diese beispielsweise Einfluss auf den elektrischen Widerstand der verwendeten Sensormaterialien hat. Zudem ergibt sich über die gesamte Lebensdauer eines Messgeräts betrachtet eine Änderung der Langzeitstabilität bzw. ein Langzeitdrift, weswegen eine regelmäßige Überprüfung des Messverhaltens und ggf. eine Nachjustierung empfohlen wird (Gaßmann und Gries, 2009).

Von Herstellerseite wird die maximal zu erwartende Messabweichung üblicherweise mit einer Worst-Case-Angabe mittels eines \pm -Wertes in Prozent angegeben. Beispielsweise definiert die Angabe $\pm 0,1$ % FS (englisch: *full scale*, deutsch: Messbereichsendwert) bei einem Gerät im Messbereich bis 10 m Wassersäule (WS) eine maximale Abweichung von 0,01 m WS.

2.7 Wassertarife

2.7.1 Ziele

Zweck der Wassertarife aus Sicht von Wasserversorgungsunternehmen ist die Sicherstellung eines kostendeckenden Betriebs sowie die Generierung von ausreichenden Einnahmen für Investitionen in die Versorgungssysteme. Aus sozialer Sicht sollten die Tarife gerecht und für alle Verbraucher bezahlbar sein, sodass diese Zugang zu ausreichend und sauberem Trinkwasser haben. Auf der anderen Seite sollten die geltenden Tarife derart konzipiert sein, dass sie die Verbraucher zu einem ressourcenschonenden Wasserverbrauch animieren und Verschwendung durch z.B. zu

niedrige Tarife vermieden wird. Und schließlich sollte die Tarifausgestaltung einfach und nachvollziehbar sowie mit möglichst geringem administrativen Aufwand zu implementieren und verwalten sein. Aufgrund dieser zum Teil in Konflikt stehenden Ziele muss bei der Ausgestaltung der Wassertarife oftmals eine Abwägung und Gewichtung stattfinden (Boland und Whittington, 2000).

2.7.2 Tarifausgestaltung

Weltweit werden verschiedene Arten von Wassertarifen angewandt, die sich in Fixtarife, volumenabhängige Tarife sowie eine Kombination aus den beiden Tarifarten unterscheiden lassen. Abbildung 2.14 gibt einen Überblick über die Tarifarten und deren unterschiedliche Ausgestaltung.

Ein Fixtarif wird angewandt, wenn keine Wasserzähler zur Messung des Verbrauchsvolumens installiert sind. Das verbrauchte Wasser wird dann unabhängig von der Menge über eine Pauschale von den Kunden bezahlt. Oftmals gelten unterschiedliche Fixtarife für unterschiedliche Verbrauchergruppen. Beispielsweise bezahlen Haushalte andere Preise als industrielle Verbraucher oder die Größe der Anschlussleitung bestimmt den Preis. Eine weitere Option ist die Kopplung des Tarifs an die Grundstücksgröße, z.B. durch Erhebung einer Wassersteuer als Teil der Grundstückssteuer (Singh u. a., 2005). Ein großer Nachteil der Anwendung eines Fixtarifes ist, dass für die Verbraucher kein finanzieller Anreiz zur Vermeidung von Wasserverschwendung geschaffen wird. Außerdem werden Verbraucher mit hohen Entnahmemengen von denjenigen mit geringen Entnahmemengen quersubventioniert. Grund dafür ist, dass mit zunehmender Verbrauchsmenge der Preis pro Verbrauchseinheit (z.B. Kubikmeter) günstiger wird, während dieser bei vergleichsweise geringen Mengen höher ist (Abbildung 2.14). Diese Tarifausgestaltung findet überwiegend in Entwicklungsländern, in denen aus politischen, institutionellen oder sozialen Gründen keine Wasserzähler installiert sind, sowie in einigen Industrieländern mit Wasserüberfluss wie Kanada oder England Anwendung (Whittington u. a., 2002).

Bei volumenabhängigen Wassertarifen wird gemäß den von Wasserzählern gemessenen Verbrauchsmengen abgerechnet. Dabei wird zwischen einem einheitlichen Tarif sowie ansteigendem oder absteigendem Blocktarif unterschieden. Bei dem einheitlichen Tarif gilt ein bestimmter Wasserpreis pro Verbrauchsvolumen und die zu entrichtende Gebühr eines Verbrauchers berechnet sich durch die Multiplikation des Tarifs mit dem gemessenen Volumen. Der Vorteil dieses Tarifs ist die unmittelbare Kopplung von Verbrauch und Kosten, wodurch dem Verbraucher der Wert des Wassers direkt vermittelt werden und dieser zur Vermeidung von Wasserverschwendung angeregt werden kann (Whittington u. a., 2002). Diese Tarifausgestaltung findet vorwiegend in Industrie- und Schwellenländern Anwendung. In Entwicklungsländern sehen viele Beteiligte den Nachteil dieser Tarifart darin, dass durch den für alle Verbraucher gültigen Tarif pro Volumen die Bezahlbarkeit von ausreichend Trinkwasser für die Ärmsten und die gleichzeitige Sicherstellung eines kostendeckenden Betriebs

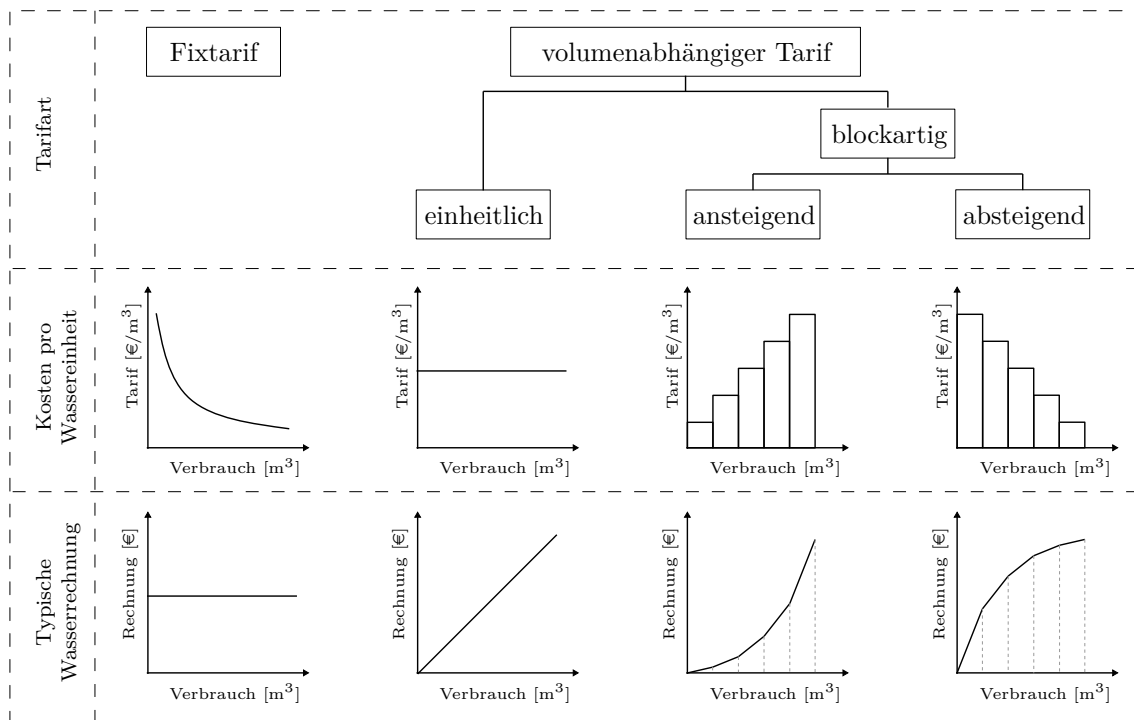


Abbildung 2.14: Tarifarten und ihre unterschiedlichen Ausgestaltungen nach Tsagarakis (2005)

durch einen ausreichend hohen Tarif in Konflikt stehen und daher kaum beide Ziele zugleich realisierbar sind.

Blocktarife bestehen aus einzelnen Blöcken, die jeweils eine bestimmte Spanne an Verbrauchsvolumina abdecken. Innerhalb der Blöcke ist der Tarif konstant, unabhängig von dem tatsächlichen Verbrauchsvolumen. Erst bei Über- bzw. Unterschreitung einer Blockgrenze erfolgt der Sprung in einen neuen Block. Ansteigende Blocktarife beginnen mit dem geringsten Tarif für den geringsten Wasserverbrauchsblock, anschließend steigt der Tarif stufenweise an. Absteigende Blocktarife hingegen rufen den höchsten Tarif für den ersten Block auf. Für die anschließenden Blöcke reduziert sich der Tarif stufenweise.

Ansteigende Blocktarife werden vor allem in Entwicklungs- und Schwellenländern angewandt. Grund hierfür ist die weit verbreitete Meinung, dass durch diesen Tarif die zu Beginn dieses Abschnitts genannten Ziele der Tarifausgestaltung bestmöglich vereinbar sind. Mit einem ersten Block zu niedrigen Preisen sollte selbst für die Ärmsten die Versorgung mit ausreichend Trinkwasser gesichert sein. Durch ansteigende Preise bei höherem Verbrauch soll der Wert des Wassers vermittelt und zum Wassersparen angeregt werden. Und durch die hohen Preise in den oberen Verbrauchsblöcken sollte ein kostendeckender Betrieb möglich sein. Nach Whittington u. a. (2002) verfehlen allerdings ansteigende Blocktarife aufgrund ihrer mangelhaften Ausgestaltung in der Praxis oftmals diese Ziele. Da sich die Ärmsten meist keinen eigenen Hausanschluss aufgrund der hohen Anschlusskosten leisten können, teilen

sie einen Anschluss mit den Nachbarn. Dadurch entsteht ein höherer Gesamtverbrauch, wodurch die Betroffenen in einen höheren Verbrauchsblock rutschen und sie damit nicht mehr vom meist subventionierten ersten Block profitieren. Zudem können der erste Block mit niedrigsten Wasserpreisen zu groß gewählt sowie die Preise der weiteren Blocks zu niedrig angesetzt sein. In der Folge wird kein kostendeckendes Einnahmenvolumen für den Versorger generiert.

Abfallende Blocktarife werden heutzutage kaum mehr eingesetzt, da sie durch ihre Ausgestaltung nicht zum Wassersparen animieren und durch ihre höchsten Wasserpreise im ersten Block den Verbrauchern kaum vermittelbar sind (Whittington u. a., 2002).

Kombinationen von Fixtarif und volumenabhängigem Tarif variieren stark in ihrer Ausgestaltung. Meist sollen über den Fixtarif alle festen Kosten wie für den Betrieb und Wartung des Versorgungssystems sowie die Verwaltung abgedeckt sein, die unabhängig vom Wasserverbrauch entstehen. Über den volumenabhängigen Tarif wird das verbrauchte Wasservolumen im Abrechnungszeitraum in Rechnung gestellt (Tsagarakis, 2005).

2.7.3 Subventionierung

In vielen Ländern weltweit sind die geltenden Tarife nicht kostendeckend. Das vorrangige Ziel, allen Menschen unabhängig von deren Einkommen den Zugang zu mindestens einer Basiswasserversorgung zu gewährleisten, überwiegt vor allem in Entwicklungs- und Schwellenländern gegenüber dem Prinzip der Kostendeckung. Daher erfolgt in den meisten Staaten eine Subventionierung der Wasserversorgung. Abbildung 2.15 gibt einen Überblick über die wesentlichen Subventionsarten und deren unterschiedliche Ausgestaltung. Dabei wird zunächst zwischen einer direkten, meist von staatlicher Seite finanzierten Subventionierung sowie einer Quersubventionierung zwischen den Verbrauchern unterschieden (Komives u. a., 2005).

Bei der direkten Subventionierung werden entweder die Wasserversorgungsunternehmen oder einzelne Verbrauchergruppen von staatlicher Seite finanziell unterstützt. Im ersten Fall wird den Versorgungsunternehmen durch die Subventionen die Anwendung eines niedrigen, nicht kostendeckenden Wassertarifs für alle Verbraucher ermöglicht. Im anderen Fall werden gezielt bedürftige Verbrauchergruppen durch entweder geringere Tarife (bereits angeschlossene Verbraucher) oder durch die Erstattung von Anschlusskosten an das Versorgungsnetz (Neukunden) finanziell entlastet (Le Blanc, 2007).

Im Fall einer Quersubventionierung erfolgt eine partielle Umverteilung von Einkommen innerhalb der Verbraucher, indem höhere Einkommensgruppen einen höheren Tarif entrichten als zur Kostendeckung erforderlich. Dieser Überschuss wird dann zur Subventionierung eines niedrigeren, nicht kostendeckenden Tarifes für Verbrauchergruppen mit geringem Einkommen verwendet (Whittington u. a., 2002).

Auch bei der Subventionierung gibt es in der Praxis eine Vielzahl an Ausgestaltungen. Dabei existieren Mischformen aus den beschriebenen Ansätzen, beispielsweise

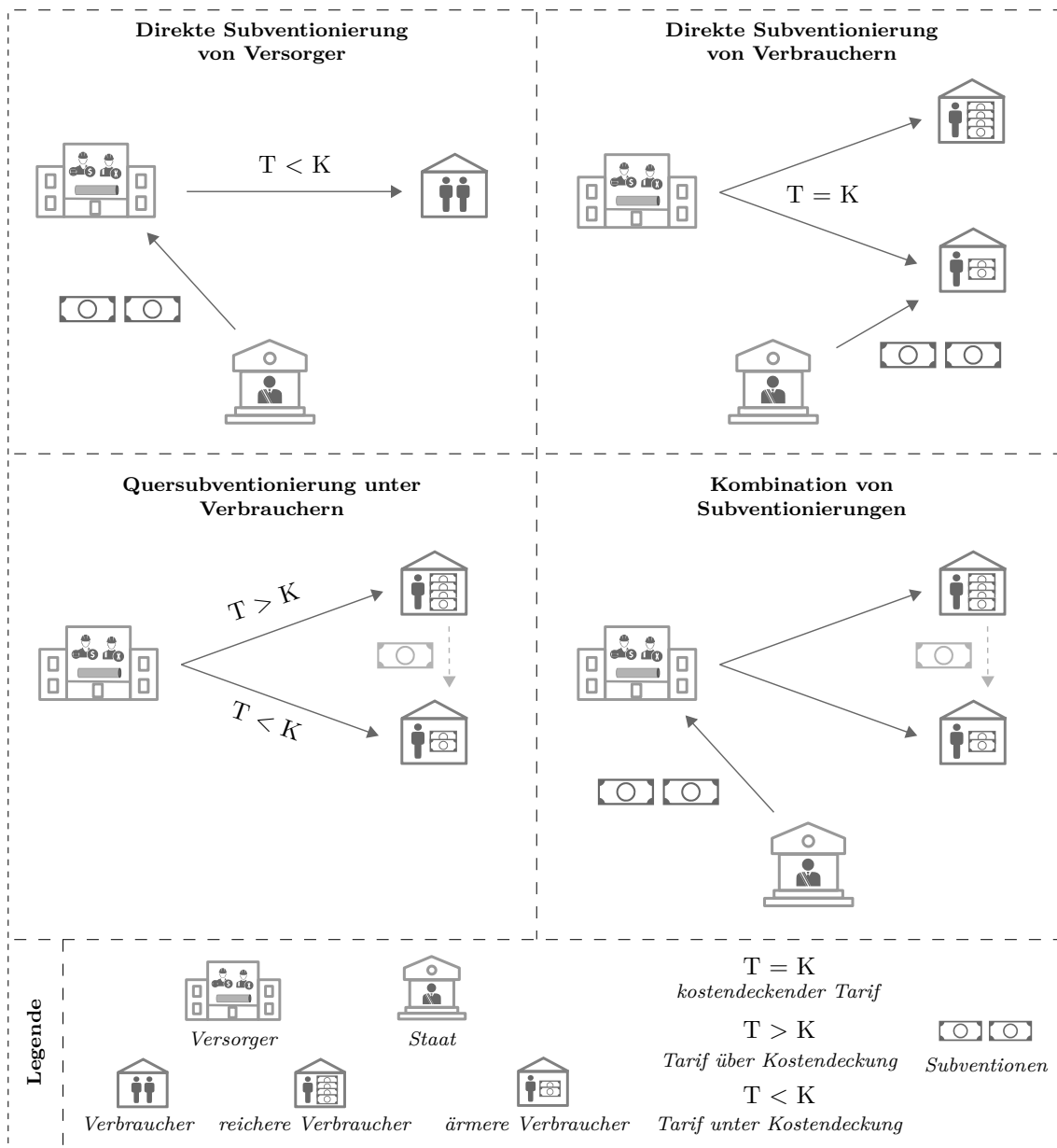


Abbildung 2.15: Subventionen und ihre unterschiedlichen Ausgestaltungen, basierend auf Whittington u. a. (2002)

die direkte Subventionierung der Betriebskosten des Versorgers durch die öffentliche Hand plus eine Quersubventionierung innerhalb der Verbraucher.

Allerdings gibt es auch Kritik an den gängigen Ausgestaltungen der Subventionierung. Durch die in Kauf genommene fehlende Kostendeckung mangelt es häufig an den finanziellen Mitteln für einen ordnungsgemäßen Betrieb und Wartung seitens der Versorgungsunternehmen, da in diesen Fällen die Höhe der staatlichen Subventionen nicht ausreichend ist. Darüber hinaus werden durch die staatliche Subventionen keine Anreize für die Versorger für eine effiziente und ressourcenschonende

Versorgung gegeben. Defizite wie beispielsweise ein mangelhaftes Wasserverlustmanagement oder Nachlässigkeiten bei der ordnungsgemäßen Abrechnung der an die Kunden gelieferten Wassermengen werden in diesem Fall durch die Subventionen kompensiert.

Ein weiteres Problem ergibt sich, wenn die Subventionen nicht auf die bedürftigen Verbrauchergruppen fokussieren, sondern ein für alle Verbraucher geltender niedriger Tarif angewandt wird. Dadurch werden Haushalte mit höherem Einkommen zu Lasten der Einkünfte des Versorgers finanziell unterstützt. Bei einer gezielten Subventionierung wiederum muss ein höherer administrativer Aufwand betrieben werden, um die entsprechenden Informationen über die Verbraucher zu deren Eingruppierung in bedürftig und nicht bedürftig zu ermöglichen. Hinsichtlich der Subventionierung von bedürftigen Gruppen durch niedrige Tarife muss beachtet werden, dass diese nicht die Menschen unterstützen, die sich aufgrund der hohen Kosten erst gar keinen Anschluss an das Versorgungssystem leisten können. Eine reine Anschlusskostenerstattung wiederum unterstützt nur Neukunden. Bereits angeschlossene, bedürftige Kunden werden nicht hinsichtlich eines möglicherweise zu hohen Verbrauchspreises entlastet (Komives u. a., 2005).

Nichtsdestotrotz sieht der UN-Weltwasserbericht 2019 nach wie vor zielgerichtete Subventionen in der Wasserversorgung als besonders wichtigen Schlüsselfaktor, um das Ziel eines universellen Zugangs zu ausreichend und sauberem Trinkwasser zu erreichen (WWAP, 2019).

2.7.4 Umsetzungsbeispiele

In Deutschland setzt sich der Wassertarif in der Regel aus einem fixen Grundpreis und einem mengenabhängigen Arbeitspreis zusammen. Der Grundpreis bemisst sich meist nach der Größe des Hausanschlusses oder der Anzahl der Wohneinheiten pro Anschluss. Nach einer Erhebung des Bundeskartellamts (2016) bei den 38 größten Versorgungsunternehmen Deutschlands variierte der Grundpreis zwischen ca. 15 und 235 Euro netto im Jahr und der Arbeitspreis pro Kubikmeter Wasser zwischen 1,1 und 2,5 Euro. Diese erheblichen Schwankungen sind größtenteils auf externe, von den Versorgungsunternehmen nicht beeinflussbare Faktoren wie die Dichte des Versorgungsgebiets, topographische Bedingungen oder die Wasserbeschaffenheit zurückzuführen. Je dichter das Versorgungsgebiet, d.h. je kürzer die Distanzen zwischen den einzelnen Anschlüssen, desto geringer sind die Kosten der erforderlichen Infrastruktur für den Absatz eines Kubikmeters Wassers an die Verbraucher. Erhebliche topographische Unterschiede im Versorgungsgebiet erfordern die Einrichtung von Druckzonen, wodurch die Kosten für den Betrieb und die Infrastruktur erhöht sind. Bei der Wasserbeschaffung wirken sich die unterschiedlichen Bezugsquellen auf die Kosten aus. Verunreinigtes Grund- oder Oberflächenwasser muss aufwändig aufbereitet werden, während beispielsweise bei Quellwasser geringere Kosten anfallen. Im Durchschnitt fielen im Jahr 2016 für einen Zwei-Personen-Haushalt mit einem Durchschnittsverbrauch von ca. 121 *lpcd* Kosten von 233 Euro an (Bundeskartellamt, 2016; StBA, 2019a). Subventionen spielen in der Wasserversorgung

in Deutschland aufgrund der kostendeckenden Tarife und der sozialen Grundsicherung, die allen Menschen Zugang zu ausreichend Wasser ermöglicht, kaum eine Rolle (BDEW, 2015a).

In Indien sind nahezu alle dargestellten Tarifausgestaltungen vertreten, die grundsätzlich durch sehr geringe Tarife gekennzeichnet sind und dadurch überwiegend keine Kostendeckung gewährleisten (Singh u. a., 2005). In einer Studie des *National Institute of Urban Affairs* (NIUA, 2005) wurden die Tarife in 300 indischen Städten untersucht. Bei Anwendung eines Fixtarifs variierten dabei die jährlichen Kosten zwischen 240 und 1.460 Indischen Rupien (INR), was ca. 3,1 bzw. 19 Euro entspricht. Der Durchschnitt betrug 600 INR (ca. 7,8 Euro). Bei einem volumenabhängigen Tarif schwankte der Preis pro Kubikmeter zwischen 0,18 und 5,75 INR (ca. 0,2 und 7,5 Eurocent), mit einem Durchschnittspreis von 1,5 INR (ca. 2 Eurocent) pro Kubikmeter. Belastbare Zahlen für eine Kombination aus beiden Tarifarten sind nicht verfügbar. Allerdings zeigt die NIUA-Studie, dass die Gesamtkosten bei einer Kombination im Allgemeinen niedriger sind als bei Haushalten, die einen Fixtarif entrichten. Zur Einordnung der generell sehr niedrigen Tarife setzten Raghupathi und Foster (2002) die Kosten für eine Versorgung mit 133 *lpcd* ins Verhältnis zum Einkommen einer an der offiziellen Armutsgrenze in Indien lebenden, fünfköpfigen Familie. Demnach müsste die Familie einen Anteil von ca. 1,2 % bei einem volumenabhängigen und 2 % bei einem fixen Tarif von ihrem Einkommen für die Wasserversorgung ausgeben. Damit blieben selbst diese Familien unter dem von der WHO empfohlenen Grenzwert von 5 % für Ausgaben zur Deckung des Wasserbedarfs.

Durch die starke Fokussierung auf eine für alle Menschen bezahlbaren Wasserversorgung sind die Versorger in Indien auf staatliche Subventionierungen angewiesen. Allerdings sind diese nicht zielgerichtet und in den meisten Fällen mangelhaft ausgestaltet. Aufgrund der sehr niedrigen Tarife für alle erfolgt keine Fokussierung auf die wirklich bedürftigen Bevölkerungsgruppen. Des Weiteren reichen die Subventionen oftmals nicht zur Kostendeckung und zur Sicherstellung eines ordnungsgemäßen Betriebs der Wasserversorgungssysteme. Die Folge ist u.a. eine intermittierende Betriebsweise, bei der die Versorgung nur wenige Stunden am Tag bzw. in der Woche erfolgt. Daher müssen die Verbraucher in private Zwischenspeicher investieren, deren Kosten um ein Vielfaches über einem kostendeckenden Wassertarif liegen (Raghupathi und Foster, 2002).

3 Wasserverlustmanagement

3.1 Überblick

Kapitel 3 gibt einen Überblick über den Stand der Wissenschaft und Technik hinsichtlich des Wasserverlustmanagements. Um dieses zielführend anwenden zu können, sollten allen Beteiligten zunächst die in Abschnitt 3.2 erläuterten Erscheinungsformen und Ursachen von Wasserverlusten sowie deren Auswirkungen bekannt sein. Abschnitt 3.3 gibt anschließend einen Überblick über die Komponenten des Wasserverlustmanagements, die in den darauffolgenden Abschnitten ausgeführt sind. Im Rahmen der Wasserverlustanalyse als erstem Schritt werden die Verluste in einem Versorgungssystem möglichst genau ermittelt und anschließend mittels Kennzahlen bewertet. Abschnitt 3.4 gibt diesbezüglich einen Überblick über die gängigen Verfahren der Wasserverlustermittlung, wobei insbesondere das Verfahren der Wasserbilanz detailliert dargestellt ist, da dieses im Rahmen dieser Arbeit angepasst wurde. Anschließend werden die international etablierten Kennzahlen sowie deren Anwendung zur Entwicklung einer effizienten Wasserverlustreduktionsstrategie vorgestellt. Basierend auf der Strategie werden dann die geeigneten Gegenmaßnahmen zur Verlustreduktion durchgeführt, die im finalen Abschnitt 3.5 erläutert werden.

3.2 Wasserverluste

3.2.1 Reale Wasserverluste

Reale Wasserverluste umfassen die Wassermengen, die aufgrund von Leckagen und Undichtheiten an Rohrleitungen und -verbindungen, Armaturen sowie Überläufen und Leckagen an Speicherbehältern vor Erreichen der vorgesehenen Übergabestelle, beispielsweise dem Kundenwasserzähler, aus dem Versorgungssystem austreten. Überläufe werden durch Betriebsfehler oder mangelhafte Regelung der Behälter hervorgerufen. Alle anderen realen Wasserverluste an Leckage- und Undichtigkeitsstellen entstehen durch Schäden an den einzelnen Komponenten eines Versorgungssystems, wodurch dessen Funktionsfähigkeit lokal beeinträchtigt wird (DVGW, 2003, 2010). Je nach Ursache der Schäden entstehen unterschiedliche Schadensarten, die zusammen mit den entsprechenden Leckraten sowie Laufzeiten der Leckagen oder Undichtheiten schlussendlich die Menge der realen Wasserverluste in einem Versorgungssystem bedingen. Im Folgenden werden die Schadensursachen und -arten sowie die Abhängigkeit der Wasserverlustmengen von Leckrate und Laufzeit erläutert. Abbildung 3.1 gibt diesbezüglich einen Überblick.

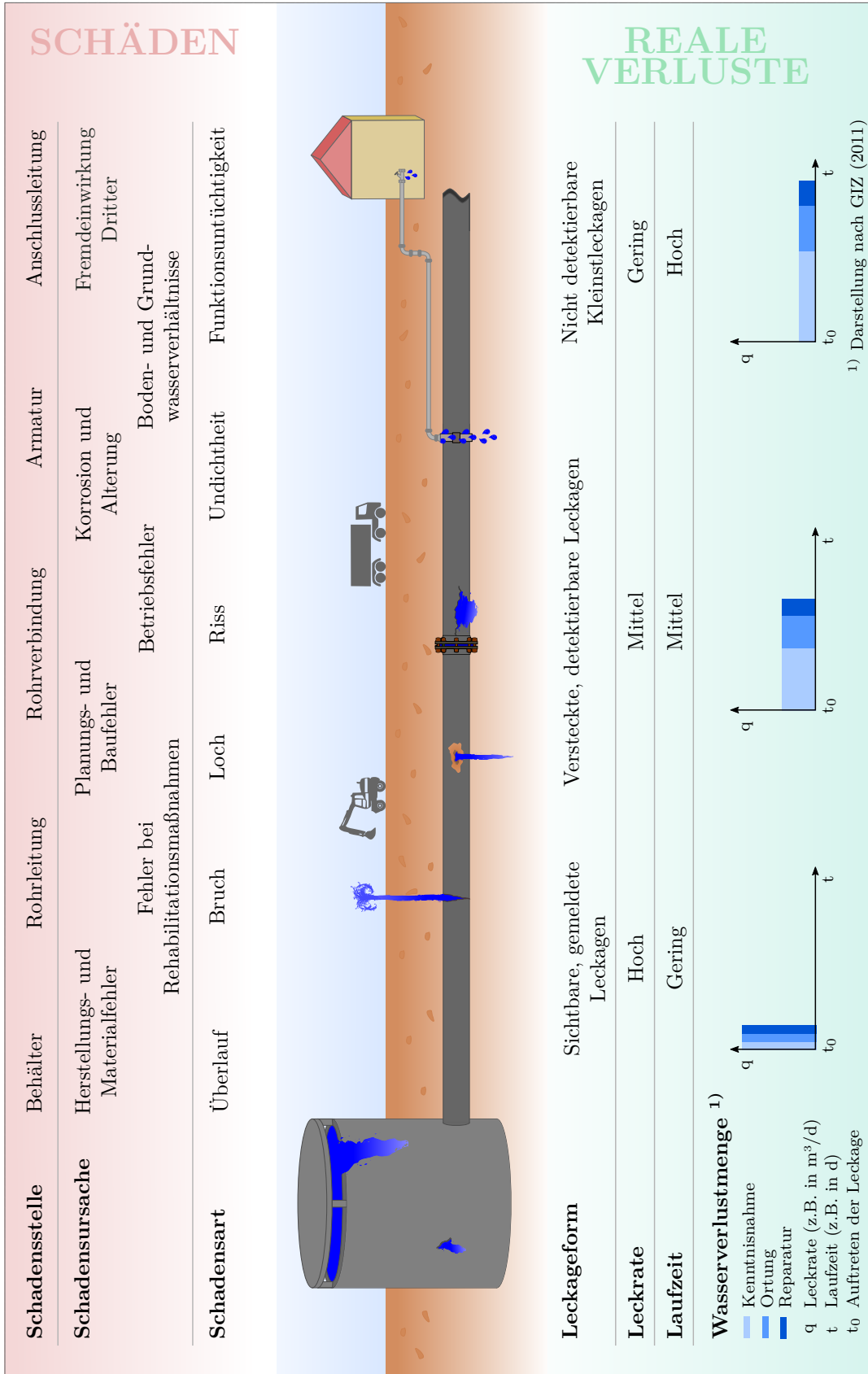


Abbildung 3.1: Reale Wasserverluste und deren Ursachen

Schadensursachen: Die Schadensursachen an den größtenteils unterirdisch verlegten Rohrleitungen und -verbindungen sind nach Roscher (2009) in der Regel „die Interaktionen zwischen Rohrleitung bzw. -verbindung, Betriebsparametern und Verlegeumgebung der Rohrleitung (Baugrund)“. Bereits Fehler in der Herstellung der Rohre können zu späteren Materialschäden führen. Dabei begünstigen oder mindern die werkstoffspezifischen Eigenschaften der Rohrmaterialien sowie die Herstellungsverfahren der Rohrleitungen das Auftreten von Schäden. Als Beispiele sind unzureichender Korrosionsschutz bei Stahlrohren oder die Unterschreitung von Mindestwanddicken beim Gussverfahren von Graugussrohren zu nennen. Ebenso können Fehler in der Planung zu Rohrleitungsschäden führen, beispielsweise durch die Trassierung der Leitungen durch Gebiete mit ungünstigen Gelände- und Bodenverhältnissen oder die falsche Auswahl der Rohrwerkstoffe und -dimensionen in der Planungsphase. Im Zuge der Verlegung und Montage der Leitungen können unsachgemäßer Transport und Lagerung sowie fehlerhafte Ausführung der Bettung und Verbindungen Schäden verursachen. Nach der Installation kann es im Laufe der Zeit zu Schäden durch Korrosion und Alterung der Rohrleitungen kommen. Dabei haben die chemischen und physikalischen Umgebungsbedingungen im unterirdischen Bauraum, die Materialeigenschaften der Rohrwerkstoffe sowie die Beschaffenheit des transportierten Trinkwassers einen erheblichen Einfluss auf das Auftreten und Fortschreiten der Korrosion sowie den Alterungsprozess.

Auch Mängel und Fehler in der Betriebsweise können zu Schäden führen, vor allem in Bezug auf den vorherrschenden Druck im System. Häufige Druckschwankungen, aber auch permanent erhöhter Druck sowie Druckstöße haben einen direkten Einfluss auf die Schadensrate von Rohrleitungen. Zudem können Fehler bei Rehabilitationsmaßnahmen zu Schädigungen führen. Und schließlich können Schäden auch durch Fremdeinwirkung entstehen, beispielsweise durch unsachgemäße Baumaßnahmen Dritter oder Verkehrslast in unmittelbarer Nähe von Rohrleitungen (DVGW, 2004b; Roscher, 2009; GIZ, 2011; Roscher, 2018).

Ursachen für Schäden an Armaturen können mangelhafte Teilkomponenten wie Dichtungen oder Gehäuse sowie Korrosion, Sedimentation, Bodenbewegungen und Fremdeinwirkung sein.

Bei Behältern können nach Merkl (2005) Schäden aufgrund planerischer, baulicher und betrieblicher Mängel auftreten. So müssen bei der Planung u.a. die Wechselwirkung zwischen Behälter und Baugrund beachtet werden, um die dauerhafte Standsicherheit des Behälters zu gewährleisten. Aufgrund einer mangelhaften Bauausführung von Behältern, die oftmals aus Stahlbeton gefertigt werden, kann es aufgrund von unsachgemäßer Betonierung und Bewehrungskorrosion zu Rissen und Löchern im Beton und somit zu Undichtigkeiten kommen. Beim Betrieb der Behälter kommt es im Fall von Bedienungsfehlern oder Mängeln in der automatischen Regelung zu Überläufen von Wasser aus den Behältern (Merkl, 2005).

Schadensarten: Als Schadensart wird laut DVGW (2010) eine „festgestellte Veränderung des Sollzustands am Betriebsmittel“ bezeichnet. Dabei wird je nach Ausprägung in die Schadensart Bruch, Riss, Loch, Undichtheit, Funktionsuntüch-

tigkeit und Überlauf unterschieden (Abbildung 3.1). Der Überlauf eines Behälters stellt keinen Schaden im ursprünglichen Sinne dar, führt jedoch im Endeffekt auch zu realen Verlusten aufgrund der schädigenden Auswirkung von Betriebs- und Regelungsfehlern.

Brüche treten vor allem bei Rohrleitungen aus Grauguss, Asbestzement und Beton aufgrund der geringen plastischen Verformbarkeit auf. Auslöser sind erhöhte mechanische Belastungen wie z.B. durch Verkehrsbelastung, Bodenbewegungen oder Druckstöße (Roscher, 2009; Pozos-Estrada u. a., 2016).

Schäden in Form von Löchern sind bei metallischen Rohren und Armaturen durch Korrosion bedingt. Dabei gelangen Wasser und Sauerstoff an die Oberfläche des Rohres oder Armatur und bewirken die chemischen Reaktionen, durch die Korrosion entsteht. Je nach Erscheinungsform wird in Flächen-, Mulden- und Lochkorrosion unterschieden. Bei der Flächenkorrosion wird der Metallwerkstoff gleichmäßig über die Fläche abgetragen. Eine Muldenkorrosion entsteht meist durch Unregelmäßigkeiten im Werkstoff, sodass die Oberfläche nicht gleichmäßig, sondern an einigen Stellen stärker und tiefer korrodiert. Bei der Lochkorrosion erfolgt eine intensive Abtragung des Werkstoffs, wodurch tiefe kraterförmige Narben bis hin zur vollständigen Durchlöcherung der Rohr- oder Armaturwand entstehen. Ausgelöst wird die Lochkorrosion meist durch lokale Beschädigungen der Korrosionsschutzschicht. Bei Kunststoffrohren entstehen Löcher im Rohr aufgrund von örtlichen Spannungsspitzen, hervorgerufen beispielsweise durch scharfkantige Steine (Roscher u. a., 2015).

Ausprägungsformen von Risschäden sind Rund-, Quer-, Längs- und Spiralliss. Vor allem Stahlrohre und Gussrohre sind aufgrund ihrer geringen Elastizität anfällig gegen Risse. Jedoch können auch bei Kunststoffrohren (PVC, PE) Risse durch unsachgemäße Bettung in Splitt oder steinigem Böden entstehen. Bei Behältern treten Risse durch Setzungen, Bemessungsfehler oder durch schädigenden Einfluss von aggressiven Wässern auf die Baustoffe auf.

Undichtheiten entstehen bei Rohren vor allem an Verbindungen und dabei insbesondere bei fehlerhaft ausgeführten Muffenverbindungen. Des Weiteren werden mit zunehmendem Alter die Dichtungen porös und somit undicht. Bei Armaturen treten Undichtheiten durch Lockern der Flanschverbindungen sowie durch nicht oder nicht mehr dichte Armaturengehäuse auf. An Behältern kommt es aufgrund von Mängeln des Baustoffs sowie mangelhaft ausgeführten Betonierungsarbeiten oder Rohrdurchführungen zu Undichtheiten (Roscher, 2009).

Die Funktionsuntüchtigkeit betrifft vor allem Armaturen, die beispielsweise aufgrund von Ablagerungen im Armaturengehäuse nicht mehr vollständig schließen oder durch Korrosion nicht mehr bedienbar sind. Allerdings ist hierbei zu beachten, dass diese Schadensart nicht zwangsläufig zu Wasserverlusten als aus dem Leitungssystem austretende Wassermenge führt (Schonlau und Hölting, 2018).

Wasserverlustmengen: Die Menge des realen Wasserverlusts an einer Leckagestelle ergibt sich aus dem Produkt von Leckrate (z.B. in m^3/h) sowie der Laufzeit (z.B. in h). Dabei wird in drei Kategorien der Leckageform unterschieden (Abbildung 3.1):

- *Sichtbare und gemeldete Leckagen:* Diese Leckageform ist häufig die Folge von Rohrbrüchen an Zubringer- und Hauptleitungen. Das austretende Wasser erreicht aufgrund des anstehenden Leitungsdrucks, der hohen Durchflussrate sowie der Beschaffenheit des umgebenden Bodens rasch die Oberfläche und wird durch Anwohner oder Betriebspersonal des Versorgungsunternehmens meist nach kurzer Zeit erkannt und gemeldet.
- *Versteckte, detektierbare Leckagen:* Diese Leckagen sind nicht sichtbar, da das austretende Wasser nicht oder zumindest nicht visuell erkennbar die Erdoberfläche erreicht. Durch aktive Leckortung mit den gängigen Verfahren (siehe Abschnitt 3.5) sind die Leckagen, die durch mittlere Leckraten und Laufzeiten gekennzeichnet sind, jedoch detektierbar.
- *Nicht detektierbare Kleinstleckagen:* Diese Leckageform umfasst die nicht sichtbaren und nicht detektierbaren Kleinstleckagen. Diese weisen eine geringe Leckrate mit hoher Laufzeit auf. Zur Abgrenzung von den versteckten, detektierbaren Leckagen wird für die Leckrate häufig ein Grenzwert von ca. 250 Litern pro Stunde angegeben. Unterhalb dieses Grenzwerts gelten die nicht sichtbaren Leckagen in vielen Ländern als nicht detektierbar (McKenzie, 2007).

Die Höhe der Leckrate wird beeinflusst von der jeweiligen Schadensstelle und -lage, der Schadensart sowie dem anstehenden Betriebsdruck. Hydraulisch lässt sich die Leckrate mit der seitlichen Ausströmung von Wasser aus einem Behälter vergleichen. Dieser Vorgang wird durch die Blendengleichung 3.1 beschrieben (Zoebl und Kruschik, 1978). In dieser ist Q der Durchfluss, A die Austrittsfläche und $\sqrt{2 \cdot g \cdot h}$ die Austrittsgeschwindigkeit mit der Erdbeschleunigung g und der Druckdifferenz h an der Blendenöffnung. Durch den dimensionslosen Austrittskoeffizienten μ_A werden die Kontraktion des Austrittsstrahls sowie die Reibungsverluste und somit die tatsächlich wirksame Austrittsfläche berücksichtigt.

$$Q = A \cdot \mu_A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (3.1)$$

Zur Bestimmung der Leckrate wird die Blendengleichung in eine allgemeinere Gleichung umgewandelt. Dies ist erforderlich, da sich zum einen der Koeffizient μ_A in Abhängigkeit des Fließzustandes ändert und zum anderen die Leckrate je nach Rohrmaterial, Schadensart (z.B. Riss oder Loch) und anstehendem Druck variiert (Van Zyl und Clayton, 2007). Beispiel hierfür ist die Aufweitung eines Längsrisse an einem Kunststoffrohr mit zunehmendem Druck. In Gleichung 3.2 fasst der dimensionslose Leckagekoeffizient c das Produkt aus der Austrittsfläche A , dem Koeffizienten μ_A und der Wurzel der zweifachen Erdbeschleunigung g aus Gleichung 3.1 zusammen. Werte für c und den dimensionslosen Leckageexponent α können anhand einer Messung oder Schätzung der Leckrate q bei verschiedenen Drücken bzw. Druckdifferenzen erfolgen. Für den Exponent α wurde dabei in zahlreichen Feld- und Laborstudien gezeigt, dass der Wert von 0,5 (entsprechend der Wurzel der Druckdifferenz h in Gleichung 3.1) zum Teil erheblich überschritten wird. Basierend auf

den Ergebnissen aus 100 Feldstudien in Versorgungssystemen weltweit liegen nach Thornton und Lambert (2005) die Werte von α typischerweise zwischen 0,5 und 1,5, wobei teilweise auch Werte bis zu 2,5 ermittelt wurden. Dies zeigt, dass die Leckrate in erheblichem Maße vom Druck an der Leckagestelle abhängt.

$$q = c \cdot h^\alpha \quad (3.2)$$

Die Laufzeit einer Leckage lässt sich in die drei zeitlich aufeinander folgenden Abschnitte Kenntnisnahme, Ortung und Reparatur gliedern (Abbildung 3.1). Die Kenntnisnahme umfasst den Zeitraum vom Auftreten der Leckage bis zu dem Zeitpunkt, an dem das Versorgungsunternehmen von dessen Existenz erfährt. Die Ortung ist der zeitliche Abschnitt nach der Kenntnisnahme bis zur eindeutigen Bestimmung der Lage der Leckage. Die Reparatur umfasst den Zeitraum nach der Verortung der Leckage bis zum Abschluss der Reparatur der Leckage, inklusive des vorangegangenen erforderlichen Zeitraums für Planung und Vorbereitung der eigentlichen Reparaturmaßnahmen (Thornton u. a., 2008). Wie in Abbildung 3.1 verdeutlicht, sind bei großen Rohrbrüchen die Leckraten sehr hoch. Allerdings sind die Laufzeiten aufgrund des rasch an der Oberfläche austretenden Wassers und der somit in der Regel zeitnahen Kenntnisnahme, Ortung und Reparatur der Brüche gering. Bei versteckten Leckagen und Kleinstleckagen dagegen können die Laufzeiten, je nach Druck und Rohrmaterial sowie der Organisation und technischen Durchführung von Leckkontrollen, teilweise erheblich lange sein. Es wird davon ausgegangen, dass Kleinstleckagen aufgrund ihrer Anzahl und langen Laufzeiten mengenmäßig den größten Anteil an realen Wasserverlusten ausmachen (GIZ, 2011).

3.2.2 Scheinbare Wasserverluste

Scheinbare Wasserverluste umfassen die Wassermengen, die zwar vom Versorgungsunternehmen erfolgreich an den Verbraucher geliefert, jedoch nicht oder nicht korrekt erfasst und abgerechnet werden. Ursachen für diese Verluste sind Zählerabweichungen, Ablese- und Abgrenzungsfehler sowie Wasserdiebstahl (Abbildung 3.2). In den ersten beiden Fällen können die Abweichungen aus Sicht des Versorgers positiv oder negativ ausfallen. Negativ bedeutet, dass eine geringere Wassermenge erfasst und abgerechnet wird als tatsächlich geliefert. Diese Menge stellt einen monetären Verlust für den Versorger dar. Das Wasser wird gewonnen, aufbereitet und über das Verteilungssystem erfolgreich zum Endverbraucher geliefert, kann aber schlussendlich nicht zu dem gültigen Tarif in Rechnung gestellt werden. Bei einer positive Abweichung wird eine größere Wassermenge erfasst und abgerechnet als tatsächlich geliefert, was zu Lasten des Verbrauchers geht. Im Folgenden werden die Ursachen für scheinbare Wasserverluste näher erläutert.

Zählerabweichungen: Die unterschiedlichen Faktoren, die Einfluss auf die Höhe der Messabweichungen von Wasserzählern und Durchflussmessgeräten haben können, sind in Abschnitt 2.6.5.2 ausführlich erläutert.

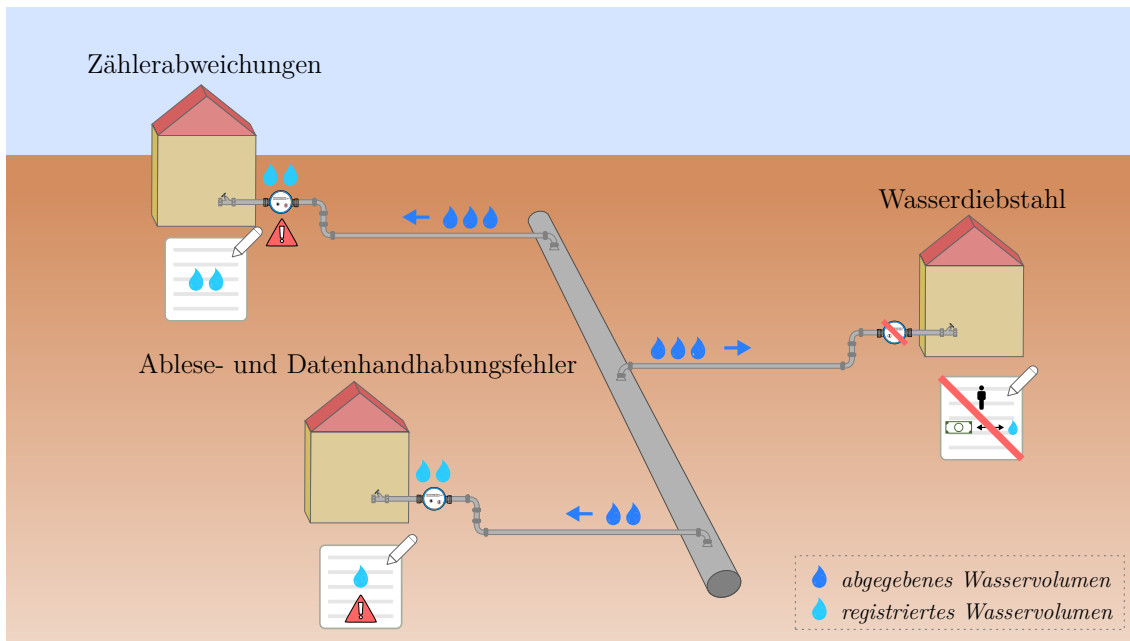


Abbildung 3.2: Scheinbare Wasserverluste und deren Ursachen

Ablese- und Datenhandhabungsfehler: Wasserzähler werden regelmäßig manuell oder automatisch abgelesen, um aus der Differenz der angezeigten Zählerstände das im entsprechenden Zeitraum durchflossene Wasservolumen zu erfassen und in Datenbanken abzuspeichern. Dabei können während dem Datenverarbeitungsprozess vom Ablesen bis zum Abspeichern Fehler entstehen, insbesondere wenn mehrere Personen bzw. Abteilungen an dem Prozess beteiligt sind. Bei der manuellen Ablesung können die Zählerstände falsch abgelesen oder fehlerhaft protokolliert werden. Durch eine automatisierte Ablesung können derartige Fehler vermieden werden, allerdings kann es im Fall von Übertragungsfehlern oder Ausfällen der Kommunikationseinheiten ebenfalls zu Unstimmigkeiten kommen.

Datenhandhabungsfehler können u.a. durch Abgrenzungsfehler entstehen. Da in der Regel nicht alle Wasserzähler stichtagsgenau abgelesen werden können, beziehen sich die Zählerstände auf unterschiedliche Ablesezeiträume. Werden diese Unterschiede nicht durch Umrechnung auf einen einheitlichen Betrachtungszeitraum ausgeglichen, entstehen fehlerhafte Verbrauchsdaten (AWWA, 2009). Auch bei der Datenweiterverarbeitung können Fehler auftreten. So sind die Zählerstanddaten oftmals in der Datenbank der Finanzbuchhaltung eines Wasserversorgers zur Kundenabrechnung abgespeichert. Werden diese Daten ohne nähere Angaben bezüglich der Erfassung und Diskretisierung an den technischen Betrieb, beispielsweise zur Wasserbilanzerstellung weitergegeben, können fehlerhafte Verbrauchsdaten für den entsprechenden Bilanzzeitraum die Folge sein (Knobloch, 2014).

Wasserdiebstahl: Die unzulässige Wasserentnahme aus einem Versorgungssystem kann unter Umständen einen erheblichen Anteil an den Wasserverlusten

ausmachen. Das Ausmaß hängt von Faktoren wie der Verfügbarkeit und dem gesellschaftlichen Wert von Wasserressourcen, dem ökonomischen Entwicklungsstand der Gesellschaft sowie der Durchsetzungsstärke der betroffenen Wasserversorger bezüglich des Unterbindens von Wasserdiebstahl ab. Die Erscheinungsformen von Wasserdiebstahl sind vielfältig. Beispiele sind illegale Anschlüsse an das Versorgungssystem, überbrückte oder manipulierte Wasserzähler, Re-Aktivierung von stillgelegten Hausanschlüssen oder unerlaubtes Anzapfen von Hydranten (AWWA, 2009). Während Wasserdiebstahl in Deutschland kaum eine Rolle spielt, trägt dieser in Indien zu einem erheblichen Teil zu den scheinbaren Verlusten der Wasserversorger bei (Jain, 2014).

3.2.3 Wasserverschwendung

Ein weiterer Aspekt hinsichtlich der Wasserverluste in einem Versorgungssystem ist die Wasserverschwendung. Diese tritt vor allem im Kundenbereich sowie zum Teil auch im Leitungsnetz durch das Personal des Versorgungsunternehmens auf, beispielsweise durch Überlaufen von Speicherbehältern oder unnötig hohe Verbrauchsmengen beim Leitungsspülen. Im Kundenbereich geht eine vorsätzliche Wasserverschwendung bei einem volumenabhängigen Wassertarif zu Lasten der Verbraucher, da die verschwendeten Mengen vom Wasserzähler erfasst und dementsprechend in Rechnung gestellt werden. Wasserverschwendung kann allerdings auch durch Leckagen an Armaturen und Leitungen oder defekten Toilettenspülungen im Kundenbereich erfolgen. Da in diesen Fällen die Durchflussmengen meist unter dem Anlaufpunkt der Wasserzähler liegen, gehen diese austretenden Wassermengen zu Lasten des Versorgers (AWWA, 2009).

In Abwesenheit von Wasserzählern und bei Anwendung eines Fixtarifs geht jegliche Wasserverschwendung im Kundenbereich zu Lasten des Versorgers. Vor allem in intermittierend betriebenen Versorgungssystemen kommt es zur Verschwendung durch die Entleerung der häuslichen Speicherbehälter vor einer Versorgungsperiode, um Raum für frisches Wasser zu schaffen (Bradley u. a., 2002; Totsuka u. a., 2004; Butler und Memon, 2006). Außerdem kann es bei fehlenden oder defekten Schwimmerventilen zu Überläufen der Speicherbehälter sowie durch offengelassene Absperrhähne an der Anschlussleitung zu weiteren verschwendeten Wassermengen im Kundenbereich kommen.

Auch an öffentlichen Zapfstellen im Leitungsnetz können erhebliche Wassermengen durch unsachgemäße Bedienung (z.B. offengelassene Absperrhähne) oder undichte Armaturen verschwendet werden, da diese Mengen nicht zu Lasten der Verbraucher gehen und somit kein finanzieller Anreiz zum Wassersparen besteht (Klingel, 2010).

3.2.4 Auswirkungen von Wasserverlusten

Angesichts der zunehmenden Knappheit an verfügbaren Wasserressourcen und dem gleichzeitigen Anstieg des Wasserbedarfs in vielen Regionen der Welt wächst der Druck auf die Versorgungsunternehmen, eine möglichst ressourcenschonende

und effiziente Versorgung sicherzustellen. Hohe Wasserverluste in Versorgungssystemen stehen dem Ziel eines nachhaltigen Wasserressourcenmanagements in direkter Weise entgegen und können Ausmaße annehmen, welche die Bereitstellung von Trinkwasser in der erforderlichen Menge mit ausreichendem Druck sowie in einwandfreier Qualität unmittelbar gefährden. Im Folgenden werden diesbezüglich die technischen, ökonomischen, ökologischen und sozialen Auswirkungen von Wasserverlusten auf die betroffenen Menschen und die Umwelt erläutert.

Technische Auswirkungen: Die technischen Anlagen von Wasserversorgern sind darauf ausgelegt, die erforderliche Wassermenge möglichst verlustfrei von der Gewinnung bis zu den an das Versorgungssystem angeschlossenen Verbraucher zu transportieren. Jeder Kubikmeter Wasser, der während des Transports verloren geht, muss zusätzlich gewonnen, aufbereitet und gefördert werden, um den Wasserbedarf im Versorgungsgebiet zu decken. Dies bedeutet unter anderem einen höheren technischen Aufwand. Werden die Kapazitätsgrenzen der technischen Anlagen erreicht und keine Maßnahmen zur Wasserverlustreduktion durchgeführt, ist sogar ein Ausbau der Kapazitäten oder die Erschließung zusätzlicher Wasserressourcen erforderlich (Weimer, 1999). Hohe Wasserverluste und ein limitiertes Wasserdargebot können auch dazu führen, dass keine kontinuierliche Versorgung mehr möglich ist und eine intermittierende Betriebsweise mit alternierender Befüllung und Entleerung der Leitungsnetze eingeführt wird. Diese Betriebsweise führt aufgrund wechselnder Druckverhältnisse mit hohen Druckstößen zu einer erhöhten Anzahl an Leitungsschäden. Außerdem ist der verfügbare Versorgungsdruck aufgrund der aus dem Leitungsnetz austretenden Wassermengen reduziert bzw. muss ein höherer Druck von den Förderanlagen bereitgestellt werden, um den Mindestversorgungsdruck aufrechtzuerhalten. Dies führt zu einem erhöhten technischen Aufwand zur Aufrechterhaltung der Wasserversorgung (Charalambous und Lapidou, 2017).

Ökonomische Auswirkungen: Wasserverluste bedeuten einen unmittelbaren finanziellen Verlust für die Versorgungsunternehmen, da diese Wassermenge nicht den Kunden in Rechnung gestellt werden kann. Zusätzlich entstehen Mehrkosten durch den im vorherigen Absatz beschriebenen erhöhten technischen Aufwand der Wassergewinnung, -aufbereitung und -förderung zur Deckung des Wasserbedarfs der Endverbraucher. Während zur Ermittlung der Verlustkosten bei den realen Wasserverlustmengen die Produktionskosten berücksichtigt werden, ist bezüglich der scheinbaren Wasserverlusten der Verkaufspreis anzusetzen, da dieses Wasser erfolgreich an die Kunden geliefert, jedoch nicht abgerechnet wird (Alegre u. a., 2016).

Auch für die Verbraucher können hohe Wasserverluste mehr Kosten verursachen. Je nach Tarifpolitik des Unternehmens können diese sich dazu entscheiden, die erhöhten Versorgungskosten auf die Verbraucher durch eine Erhöhung des Tarifs umzulegen. Ist aufgrund der hohen Wasserverluste nur eine intermittierende Versorgung möglich, investieren viele Verbraucher in die Sicherung einer kontinuierlichen Wasserverfügbarkeit. Beispiele sind die Installation von privaten Speicherbehältern

und Pumpen zur Verteilung des gespeicherten Wassers im Haushalt. Weitere Kosten entstehen durch den Zukauf von Wasser aus alternativen Quellen wie z.B. Tanklaster oder Kioske, um den Wasserbedarf zu decken (Majuru u. a., 2016).

Ökologische Auswirkungen: Durch die erforderliche erhöhte Entnahme von Rohwasser werden erschlossene Wasservorkommen durch Wasserverluste zusätzlich belastet oder sogar die Erschließung neuer Vorkommen notwendig. Damit einher gehen ein höherer Energieverbrauch und somit erhöhte CO_2 -Emissionen in die Umwelt. In Deutschland wurden die Wasserverluste im Jahr 2016 zu ca. 456 Millionen m^3 beziffert. Mit einem im Rahmen einer Studie von Plath und Wichmann (2009) berechneten spezifischen Energieverbrauch der deutschen Wasserversorgung von im Mittel $0,51 \text{ kWh}/m^3$ und einem CO_2 -Emissionsfaktor von $0,581 \text{ kg}/\text{kWh}$ für das Jahr 2016 ergibt sich eine durch Wasserverluste verursachte Gesamtemission in diesem Jahr zu ca. 135.000 Tonnen CO_2 (StBA, 2019b; UBA, 2019).

Soziale Auswirkungen: Hohe Wasserverluste und ihre Folgen, wie beispielsweise Versorgungsunterbrechungen, niedrige Versorgungsdrücke und ungleiche Verteilung, führen zur Unzufriedenheit und einem Mangel an Vertrauen der Verbraucher gegenüber Versorgungsunternehmen. Daraus kann sich eine Weigerungshaltung entwickeln, den aktuellen Wassertarif oder einen erhöhten Tarif des Versorgungsunternehmens zu bezahlen, der wiederum zur Deckung der Kosten für die Behebung der beschriebenen Defizite erforderlich wäre (Mugabi u. a., 2009).

Wasserverluste können auch zu einer Verschlechterung der Wasserqualität führen. Leckagen sind potentielle Gefährdungsstellen, da dort verunreinigtes oder kontaminiertes Grundwasser oder Abwasser sowie andere Schadstoffen in das Leitungsnetz eingetragen werden können. Vor allem in intermittierend betriebenen Systemen ist die Gefahr der Eintragung von Schadstoffen an Leckagestellen aufgrund der zeitweise entleerten Leitungen gegeben (Kumpel und Nelson, 2014).

3.2.5 Wasserverluste in Zahlen

3.2.5.1 Global

Für einen weltweiten Überblick sind die verfügbaren Statistiken zu Wasserverlusten lediglich als grobe Schätzungen einzustufen. Hauptgrund hierfür ist die nach wie vor unzureichende, nicht flächendeckende Ermittlung und Publikation der Wasserverlustzahlen, vor allem in Entwicklungs- und Schwellenländern. Gerade darin besteht die Motivation dieser Arbeit, eine angepasste Methodik zur Ermittlung der Wasserverluste in diesen Ländern mit typischen Randbedingungen wie der intermittierenden Versorgung bereitzustellen.

Eine der meist zitierten Abschätzungen der weltweiten Wasserverluste stammt von Kingdom u. a. (2006), basierend auf der verfügbaren Datengrundlage der Weltbank. Die Studie schätzte, dass die weltweiten jährlichen Wasserverlustmengen im Jahr 2005 ca. 48,6 Milliarden m^3 betragen, wobei 32,7 Milliarden m^3 als reale Verluste

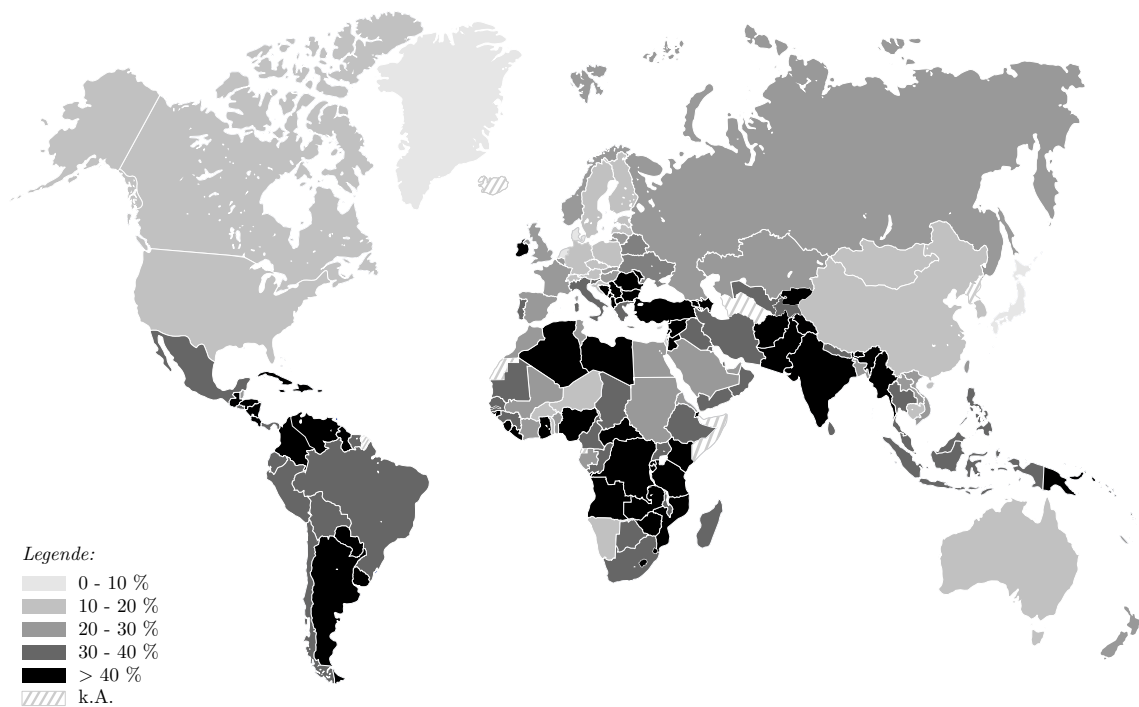


Abbildung 3.3: Globale NRW-Niveaus (World Bank, 2007; Danilenko u. a., 2014; GWI, 2016; EUREAU, 2017)

und 10,6 Milliarden m^3 als scheinbare Verluste verloren gingen. Allerdings merkten die Autoren selbst an, dass die Zahlen vermutlich höher lagen. Grund hierfür ist, dass die veröffentlichten Wasserverlustzahlen überwiegend von Versorgungsunternehmen mit einer besseren Management- und Betriebsstruktur und somit auch sehr wahrscheinlich einer effizienteren Versorgung mit geringeren Wasserverlusten stammen. Versorgungsunternehmen, deren mangelhafte technische und personelle Ressourcen zu hohen Wasserverlusten im Leitungsnetz führen, verfügen üblicherweise auch nicht über die Ressourcen zur Quantifizierung der Wasserverlustmengen (Kingdom u. a., 2006).

Die ohnehin schon dramatischen Zahlen wurden von einem der Autoren in seiner jüngsten Studie zur Abschätzung der weltweiten Wasserverluste erheblich nach oben korrigiert. Basierend auf den verfügbaren, länderspezifischen Daten der an das öffentliche Leitungsnetz angeschlossenen Bevölkerung, den Pro-Kopf-Verbrauchsdaten sowie Angaben zu den durchschnittlichen Wasserverluststraten wird in dieser Studie von Liemberger und Wyatt (2018) die gesamte Wasserverlustmenge zu 98 Milliarden m^3 für das Jahr 2005 geschätzt. Mit den aktuellsten Zahlen wird diese Menge mit 126 Milliarden m^3 bzw. 77 *lpcd* für das Jahr 2016 angegeben. Die Unterschiede in den beiden Studien sind vor allem auf die sehr konservativen Schätzungen in der Studie von Kingdom u. a. (2006) sowie den zunehmenden Bevölkerungszuwachs und Ausbau der Verteilungssysteme zurückzuführen.

Eine alternative Darstellung der Wasserverlustmenge ist die Angabe in Prozent als Anteil an der Systemeinspeisung, d.h. der in das Leitungsnetz eingespeisten Wassermenge. International wird dabei meist die gesamte Wassermenge genannt, für die dem Versorgungsunternehmen Kosten bei der Gewinnung, Aufbereitung und Verteilung entstehen, durch die jedoch keine Einnahmen generiert werden. Diese wird als nicht in Rechnung gestellte Wassermenge, im internationalen Gebrauch als NRW (englisch: *Non-revenue Water*) bezeichnet. Abbildung 3.3 gibt einen globalen Überblick über die NRW-Niveaus. Auch wenn die Angabe in Prozent aufgrund der Nichtberücksichtigung von Infrastrukturmerkmalen nicht für einen technischen Leistungsvergleich der Versorgungsunternehmen verwendet werden sollten (siehe Abschnitt 3.4.5.4), eignen sich die Zahlen dennoch für eine Einordnung der weltweiten Wasserverlustsituation. Insbesondere in den Entwicklungs- und Schwellenländern macht der Anteil der Systemeinspeisung, der den Versorgern nur Kosten und keine Einnahmen generiert, zum Teil 30 % und mehr aus.

3.2.5.2 Deutschland

In Deutschland ist das Niveau der Wasserverluste im weltweiten Vergleich sehr gering. Zahlen zu Wasserverlusten lassen sich den Veröffentlichungen des statistischen Bundesamtes, der deutschen Wasserverbände sowie des nationalen Benchmarkingprojekts zum Leistungsvergleich zwischen deutschen Wasserversorgungsunternehmen entnehmen. Eine Auswertung von Knobloch (2014) zeigt, dass die Zahlen des statistischen Bundesamtes den bundesweit umfassendsten und genauesten Überblick über die Wasserverluste in Deutschland geben.

Abbildung 3.4 zeigt die nicht in Rechnung gestellte Wassermenge Q_{NRW} , die neben den realen und scheinbaren Wasserverlusten auch den Eigenbedarf der Versorgungsunternehmen (z.B. für Filter- und Leitungsspülungen) umfasst, in den jeweiligen Bundesländern für das aktuellste Betrachtungsjahr 2016. Des Weiteren ist die zeitliche Entwicklung von Q_{NRW} in Deutschland im Zeitraum 1991 bis 2016 dargestellt. Dabei zeigt sich der positive Trend, dass der Anteil dieser Wassermenge an der Gesamteinspeisung durch entsprechende Maßnahmen der Wasserverlustreduktion in den letzten 20 Jahren stetig auf ein derzeitiges Niveau von 11,2 % abgenommen hat (StBA, 2019b).

Für einen technischen Leistungsvergleich können nach DVGW (2017) die spezifischen realen Wasserverluste q_{VR} herangezogen werden, welche die Rohrnetzlänge und somit die Struktur der Versorgungssysteme berücksichtigen (siehe Abschnitt 3.4.5). In Abbildung 3.4 ist dieser Indikator als realer Wasserverlust pro km Leitungslänge und Stunde für die jeweiligen Bundesländer dargestellt. Demnach ergaben sich im Jahr 2016 für Mecklenburg-Vorpommern mit $0,05 \text{ m}^3/\text{km}/\text{h}$ die geringsten und für Thüringen mit $0,14 \text{ m}^3/\text{km}/\text{h}$ die höchsten realen Wasserverluste, bei einem bundesweiten Mittelwert von $0,09 \text{ m}^3/\text{km}/\text{h}$. Für die Berechnung wurden die jeweiligen Leitungslängen in den Bundesländern nach Knobloch (2014) verwendet, da diese nicht in den Veröffentlichungen des Statistischen Bundesamtes angegeben sind.

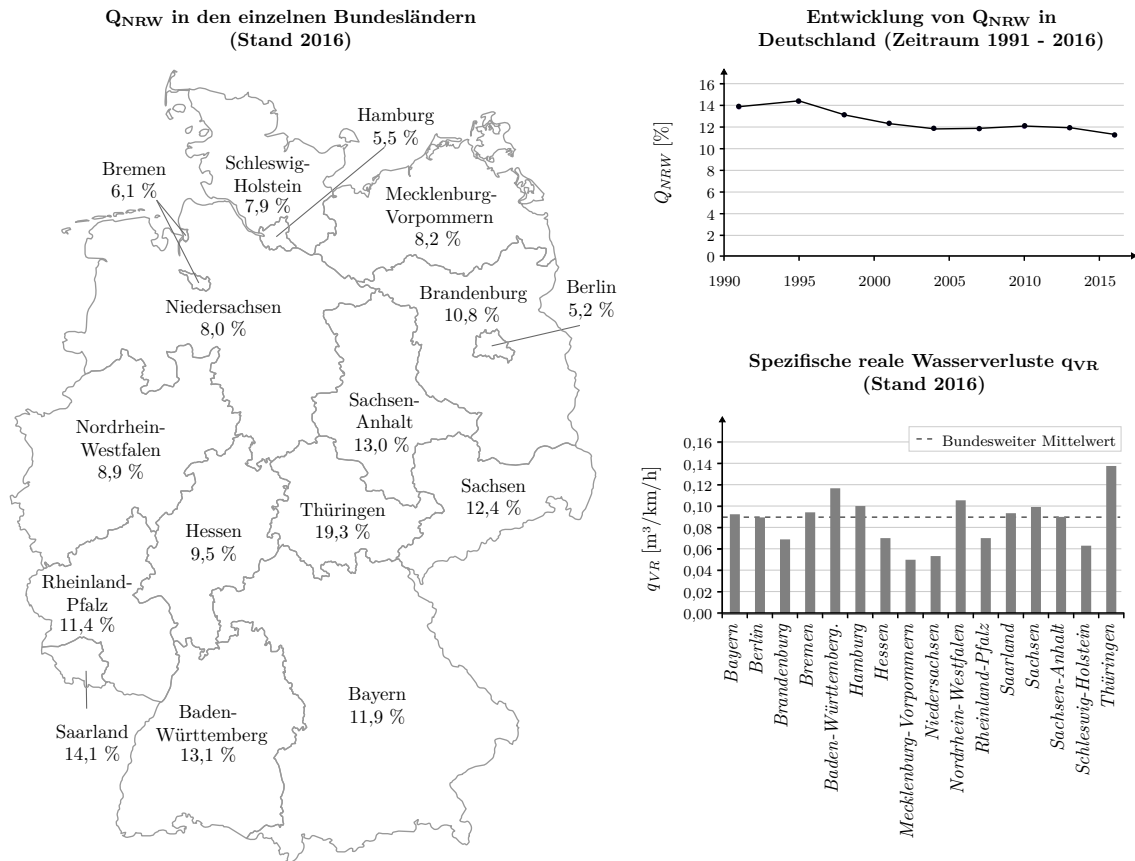


Abbildung 3.4: Wasserverlustzahlen in Deutschland (StBA, 2006, 2009, 2015, 2019b; UBA, 2015)

3.2.5.3 Indien

In Indien erfolgt keine landesweite Erhebung der NRW-Zahlen von Versorgungsunternehmen. Gründe sind vor allem die unzureichenden technischen und personellen Ressourcen sowie die fehlenden institutionellen Rahmenbedingungen. Im Zuge von einigen wenigen Pilotstudien zum Leistungsvergleich von indischen Versorgungsunternehmen wurden durchschnittliche NRW-Niveaus von 30 bis 50 % ermittelt. Basierend auf den Zahlen dieser Studien sowie einigen Projektberichten gibt Abbildung 3.5 einen Überblick über die NRW-Zahlen in Indien. In allen Veröffentlichungen wird jedoch darauf hingewiesen, dass diese Zahlen als Schätzungen einzustufen sind und diese in der Realität sehr wahrscheinlich noch höher liegen, da aufgrund von fehlender oder fehlerhafter Messtechnik nicht das gesamte Ausmaß der Wasserverluste erfasst wird. Dies zeigt einmal mehr den Bedarf einer angepassten Methodik zur Ermittlung der Wasserverluste bei diesen gegebenen Randbedingungen.

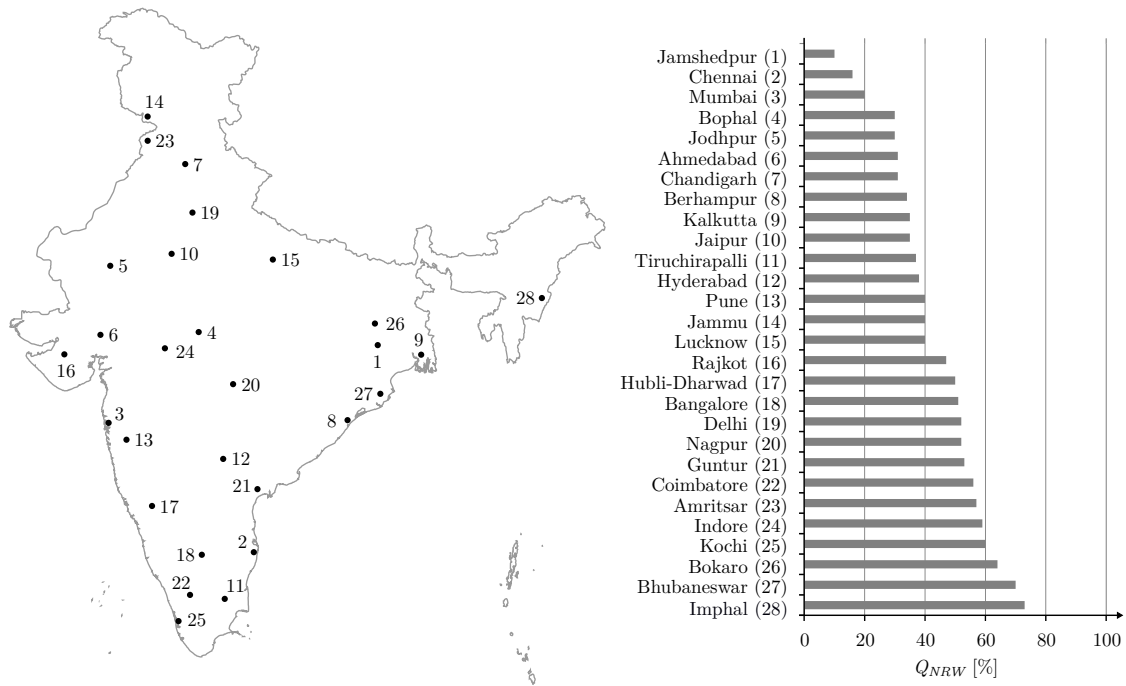


Abbildung 3.5: Wasserverlustzahlen in Indien (ADB, 2005, 2007, 2012; World Bank, 2008; MoUD, 2010; GIZ, 2016)

3.3 Wasserverlustmanagement als iterativer Prozess

Angesichts der zunehmenden Knappheit verfügbarer Wasserressourcen und der in den vorherigen Abschnitten dargestellten Auswirkungen und aktuellen Zahlen wird deutlich, dass Wasserverluste eines der Hauptprobleme der Versorgungsunternehmen weltweit sind. Umso wichtiger ist die Bekämpfung der Verluste mittels eines effektiven und aktiven Wasserverlustmanagements. Dieses definiert die EPA (2010) als den iterativen Prozess aus den drei Komponenten Wasserverlustanalyse, Gegenmaßnahmen und Evaluation (Abbildung 3.6).

Die Wasserverlustanalyse als erster Schritt umfasst alle erforderlichen Maßnahmen, um den aktuellen Zustand eines Leitungsnetzes hinsichtlich der Art und dem Ausmaß der Verluste zu untersuchen und anschließend eine Strategie für eine effektive Wasserverlustreduktion zu entwickeln (siehe Abschnitt 3.4).

Die Gegenmaßnahmen sind die Aktivitäten zur Reduktion der Wasserverluste. Je nach gewählter Strategie und Art der Verluste werden Maßnahmen zur Reduktion der realen und scheinbaren Wasserverluste durchgeführt (siehe Abschnitt 3.5).

Im Rahmen der Evaluation wird der Erfolg der Wasserverlustanalyse, der darauf basierenden Strategie sowie den durchgeführten Gegenmaßnahmen zur Wasserverlustreduktion bewertet. Die Erkenntnisse der Evaluation fließen dann in die Planung und Verbesserung der erneuten Wasserverlustanalyse und Durchführung von Gegenmaßnahmen zur dauerhaften Verlustreduktion ein.

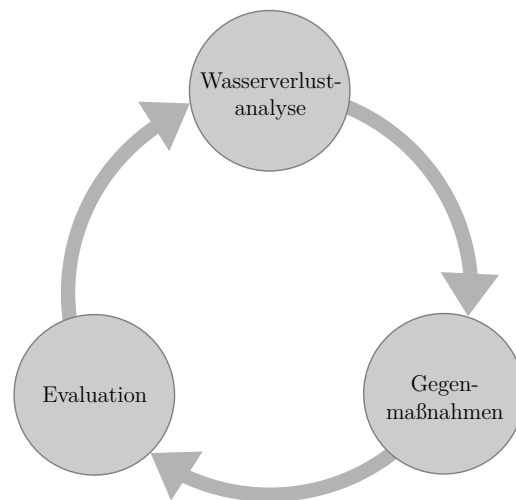


Abbildung 3.6: Komponenten des Wasserverlustmanagements (EPA, 2010)

3.4 Wasserverlustanalyse

3.4.1 Allgemeines

Die Wasserverlustanalyse dient der möglichst genauen Ermittlung der Verluste und deren Bewertung anhand von Kennzahlen hinsichtlich dem Ausmaß und Reduktionspotential. Anschließend erfolgt die zielgerichtete Auswahl geeigneter Maßnahmen zur Reduktion dieser Mengen auf ein aus ökonomischer Sicht optimales Niveau. Nach Farley u. a. (2008) werden im Rahmen der Wasserverlustanalyse die folgenden Fragen beantwortet:

- *Wieviel* Wasser geht verloren?
- *Wo* treten die Wasserverluste auf?
- *Warum* treten die Wasserverluste auf?
- *Welche* Strategie ist am besten zur Wasserverlustreduktion geeignet?

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Schritte der Wasserverlustanalyse näher erläutert.

3.4.2 Schaffung der Voraussetzungen

Die Wasserverlustanalyse kann nur zielführend durchgeführt werden, wenn die dazu erforderlichen Daten und Informationen verfügbar sind. Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Daten als Grundlage der Analyse. Dazu gehören u.a. die Messwerte der in das zu analysierende Leitungsnetz eingespeisten und aus dem Netz abgegebenen Wassermengen, Erhebungen bzw. Schätzungen zu nicht gemessenen Wassermengen wie dem Löschwasser und Daten der Netzdokumentation, der angeschlossenen Kunden sowie der Kosten des Versorgungsunternehmens.

Tabelle 3.1: Übersicht der wichtigsten Daten für die Wasserverlustanalyse

Daten	Beispiele
Messwerte	Eingespeiste und abgegebene Wassermengen Betriebsdrücke
Erhebungen/ Schätzungen	Ungemessene Wasserabgaben (z.B. Löschwasser) Scheinbare Verluste (z.B. Wasserdiebstahl)
Netz- dokumentation	Systemkomponenten (z.B. Lage, Alter, Zustand) Schadensstatistik (z.B. Schadensart und -ursache) Reparaturmeldungen (z.B. Laufzeit von Leckagen)
Kundendaten	Lage der Hausanschlüsse Zählerablesungen In Rechnung gestellte Wassermenge
Kosten	Wassergewinnung Personal und Material Betrieb und Instandhaltung

Im günstigsten Fall kann zur Datenbeschaffung auf ein Netzinformationssystem zurückgegriffen werden, das basierend auf einem Geoinformationssystem (GIS) umfassende Netzdaten mit räumlichem Bezug bereitstellt. Außerdem können, falls verfügbar, hydraulische Modelle des Leitungsnetzes die Wasserverlustanalyse unterstützen, beispielsweise durch die Simulation von Wasserverlusten sowie der Analyse der Auswirkungen von Wasserverlusten auf die Systemstabilität (GIZ, 2011).

Sollten die erforderlichen Daten nicht verfügbar sein, müssen entsprechende Maßnahmen zur Schaffung der Datengrundlage ergriffen werden. Diese umfassen beispielsweise die Erstellung einer möglichst genauen Dokumentation des bestehenden Leitungsnetzes sowie die Einrichtung eines Monitoringsystems, um mit Hilfe von Messtechnik die erforderlichen Messwerte zu erfassen.

Es ist zu beachten, dass die erforderlichen Daten teilweise bereits verfügbar sein können, diese jedoch in verschiedenen Organisationseinheiten des Versorgungsunternehmens verwaltet sind (Knobloch, 2014). Beispiele sind die vom technischen Betrieb erfassten Zählerwerte (z.B. eingespeiste oder bei Leitungsspülungen verbrauchte Wassermengen) und die bei der kaufmännischen Abteilung gespeicherten Daten zu den Zählerständen bei den Kunden (abgegebene und in Rechnung gestellte Wassermengen). Daher ist es im Zuge der Schaffung der Datengrundlage auch erforderlich, die Daten aus den verschiedenen Organisationseinheiten zu sammeln und ggf. für die Weiterverarbeitung in der Wasserverlustanalyse aufzubereiten.

3.4.3 Wasserbilanz

3.4.3.1 Aufbau und Terminologie

Im Jahr 2000 veröffentlichten Lambert und Hirner (2000) angesichts des international zunehmenden Bewusstseins für die Wasserverlustproblematik eine standardisierte Terminologie sowie zugehörige Wasserbilanz zur strukturierten Verlostermittlung und -bewertung. Grund hierfür war laut den Autoren vor allem das Fehlen einer international einheitlichen und gültigen Vorgehensweise zur Definition und Ermittlung von Wasserverlusten. Die Veröffentlichung fasste die bis zum damaligen Zeitpunkt erarbeiteten Erkenntnisse der *Water Loss Task Force* der IWA zusammen und basierte auf den nationalen Ansätzen aus Großbritannien, Deutschland, Frankreich, Japan und den USA (Knobloch, 2014). Inzwischen ist die IWA-Wasserbilanz und die zugehörige Terminologie weltweit anerkannt und in vielen nationalen Richtlinien umgesetzt worden, so auch in Deutschland im DVGW-Arbeitsblatt W 392 (A) (2017).

Die Wasserbilanz soll dem Unternehmen einen Überblick über die einzelnen Wasserverlustkomponenten im Versorgungssystem geben. Dazu werden zunächst alle Wassermengen betrachtet, die in das System in einem definierten Betrachtungszeitraum eingespeist oder entnommen werden. In Abbildung 3.7 sind die jeweiligen Einspeise- und Abgabemengen in einem Versorgungssystem von der Wassergewinnung bis zum Endverbraucher, die durch Zähler möglichst genau gemessen werden sollten, sowie die Wasserverluste in den jeweiligen Systemkomponenten dargestellt. Die tabellarische Darstellung erfolgt in der englischsprachigen Terminologie der IWA, da im nächsten Abschnitt die Wasserbilanz ebenfalls mit den international anerkannten Begriffen eingeführt wird. Bei der Erstellung der Wasserbilanz sind die Systemgrenzen des betrachteten Leitungssystems eindeutig zu definieren. Beispielsweise kann das gesamte Versorgungssystem inklusive der Rohwasser- und Zubringersysteme oder nur das Verteilungssystem beginnend nach der Wasseraufbereitung analysiert werden.

Sind die Systemgrenzen festgelegt, werden die Einspeise- und Abgabemengen in der Wasserbilanz als Bilanzkomponenten in tabellarischer Form aufgelistet und grafisch dargestellt (Abbildung 3.8). Ausgehend von der gesamten Einspeisung in das System auf der linken Seite werden die an die Verbraucher abgegebenen Wassermengen sowie die Wasserverlustmengen in zunehmendem Detailgrad aufgeschlüsselt. Die Mengen werden dabei in Kubikmetern pro Betrachtungszeitraum angegeben, bei einer jährlichen Betrachtung beispielsweise in m^3/Jahr . Im Folgenden werden die einzelnen Bilanzkomponenten näher erläutert, wobei zusätzlich die in Deutschland gemäß DVGW Arbeitsblatt W 392 (A) (2017) gültige Terminologie in Klammern angegeben ist.

System Input Volume (Systemeinspeisung): Die Komponente *System Input Volume* umfasst alle in das betrachtete Leitungssystem eingespeisten Wassermengen. Bei einer Betrachtung des gesamten Versorgungssystems setzen diese sich

3 Wasserverlustmanagement

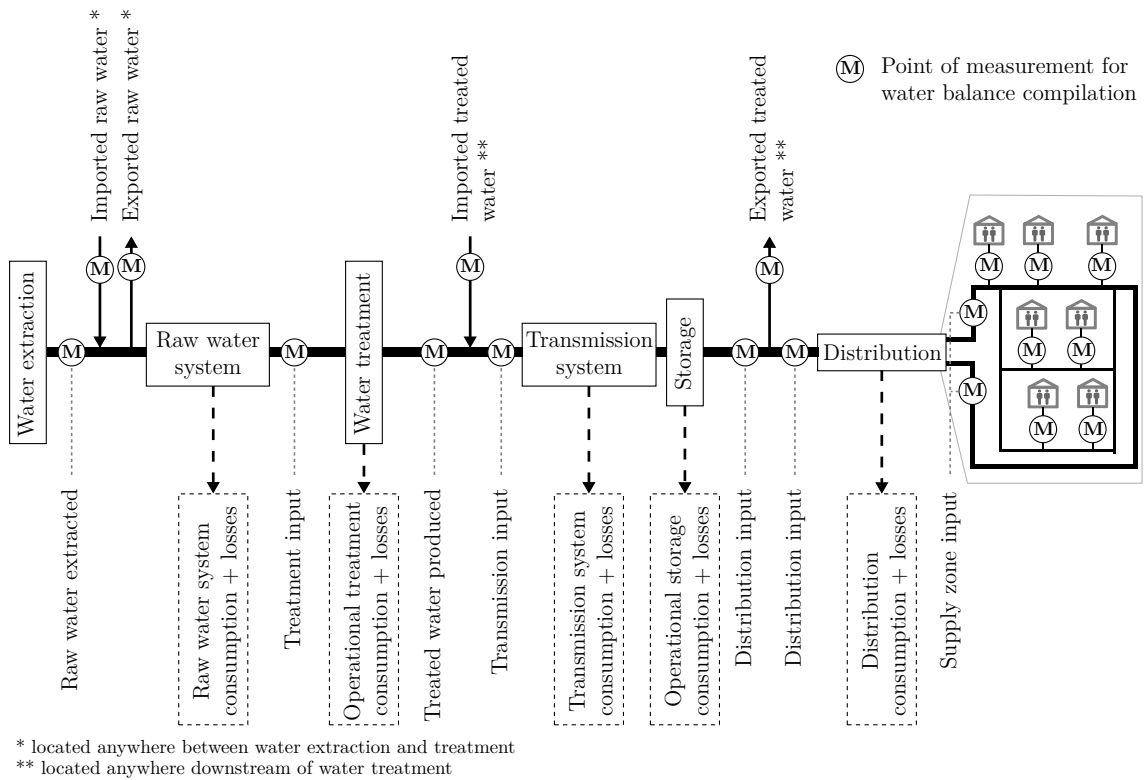


Abbildung 3.7: Einspeise- und Abgabemengen in einem Wasserversorgungssystem nach Alegre u. a. (2000)

System Input Volume	Authorised Consumption	Billed Authorised Consumption	Billed Metered Consumption	Revenue Water	
			Billed Unmetered Consumption		
	Water Losses	Unbilled Authorised Consumption		Unbilled Metered Consumption	Non-Revenue Water
				Unbilled Unmetered Consumption	
	Real Losses	Apparent Losses		Unauthorised Consumption	
				Metering Inaccuracies	
			Systematic Data Handling Errors		
		Leakage on Transmission and Distribution Mains			
		Leakage and Overflows at Utility's Storage Tanks			
		Leakage on Service Connections up to point of Customer Metering			

Abbildung 3.8: IWA-Wasserbilanz (Lambert und Hirner, 2000)

zusammen aus der Eigengewinnung des Versorgungsunternehmens sowie ggf. dem Fremdbezug, d.h. den von anderen Versorgern oder Lieferanten bezogenen und

in das System eingespeisten Mengen. Wird dagegen nur das Verteilungssystem ab der Aufbereitung betrachtet, entspricht die Einspeisung der aufbereiteten Reinwassermenge plus ggf. der fremdbezogenen Reinwassermenge (Abbildung 3.7).

Authorised Consumption (Netzabgabe): Die Komponente *Authorised Consumption* umfasst neben den vom Versorgungsunternehmen verbrauchten Mengen alle an die registrierten Kunden und andere autorisierten Verbraucher abgegebenen Wassermengen zur häuslichen, kommerziellen, industriellen und landwirtschaftlichen Nutzung (Lambert und Hirner, 2000). Des Weiteren werden Wasserexporte an Weiterverteiler der Netzabgabe zugeordnet (siehe Abbildung 3.7). In der Wasserbilanz wird das gesamte Abgabevolumen weiter unterschieden in die *Billed/Unbilled Authorised Consumption* (in Rechnung gestellte/nicht in Rechnung gestellte Netzabgabe) sowie die *Metered/Unmetered Consumption* (gemessene/nicht gemessene Netzabgabe). In der Regel sollten die Abgabemengen an die registrierten Kunden und sonstige Verbraucher sowie die Wasserexporte gemessen und in Rechnung gestellt sein. Je nach Praxis der Versorgungsunternehmen zählen zu den nicht in Rechnung gestellten, gemessenen oder nicht gemessenen Abgaben insbesondere die Wassermengen für die folgenden Nutzungen (DVGW, 2017):

- Eigenbedarf des Versorgungsunternehmens
- Hydranten- und Leitungsspülungen
- Behälter- und Leitungsentleerungen
- Druckprüfungen
- Löschwasser
- Kanal- und Straßenreinigung
- Bewässerung öffentlicher Grünflächen
- Zier- und Trinkbrunnen
- Öffentliche Toiletten und Bäder

Water Losses (Wasserverluste): Die Komponente *Water Losses* beinhaltet die *Real Losses* und *Apparent Losses* (reale und scheinbare Wasserverluste), die ausführlich in den Abschnitten 3.2.1 und 3.2.2 erläutert wurden. Die Komponente der realen Verluste wird je nach Schadensstelle weiter unterschieden in Leckagen an Zubringer-, Haupt- und Versorgungsleitungen (englisch: *Transmission and Distribution Mains*), an Anschlussleitungen bis zum Kundenwasserzähler (englisch: *Service Connections*) sowie in Überläufe und Leckagen an Speicherbehältern (englisch: *Storage Tanks*). Die scheinbaren Verluste werden in der Wasserbilanz je nach Ursachen weiter aufgeteilt in die Verluste durch Wasserdiebstahl, Zählerabweichungen und Ablese- und Abrechnungsfehler (englisch: *Unauthorised Consumption, Metering Inaccuracies, Systematic Data Handling Errors*).

Revenue Water, Non-Revenue Water (In Rechnung und nicht in Rechnung gestellte Wassermengen): Am Ende der Wasserbilanz werden die einzelnen Komponenten der Netzabgabe sowie der Wasserverluste zur finanziellen Leistungsbewertung den Komponenten *Revenue Water* und *Non-Revenue Water*. Die

Komponente *Revenue Water* ist gleich der Komponente *Billed Authorised Consumption*, die dem Versorgungsunternehmen durch die den Kunden in Rechnung gestellten Wassermengen Einkünfte generiert. Die Summe aus *Unbilled Authorised Consumption* und *Water Losses* ergibt die Komponente *Non-Revenue Water*, da diese Wassermengen nicht in Rechnung gestellt werden bzw. im Leitungssystem verloren gehen und somit keine Einkünfte generieren.

3.4.3.2 Erstellung der Wasserbilanz

Für die Erstellung der Wasserbilanz geben (Lambert und Hirner, 2000) und nationale Richtlinien wie das DVGW Arbeitsblatt W 392 (A) (2017) eine im Prinzip gleiche standardisierte Vorgehensweise zur schrittweisen Bestimmung der Wassermengen für die einzelnen Komponenten an:

1. Ermittlung von *System Input Volume*
2. Ermittlung von *Billed Authorised Consumption* und möglichst genaue Schätzung von *Unbilled Authorised Consumption*
3. Berechnung: $Authorised\ Consumption = Billed\ Authorised\ Consumption + Unbilled\ Authorised\ Consumption$
4. Berechnung: $Revenue\ Water = Billed\ Authorised\ Consumption$
5. Berechnung: $Non-Revenue\ Water = System\ Input\ Volume - Revenue\ Water$
6. Berechnung: $Water\ Losses = System\ Input\ Volume - Authorised\ Consumption$
7. Möglichst genaue Schätzung der *Apparent Losses*
8. Berechnung: $Real\ Losses = Water\ Losses - Apparent\ Losses$

In der Wasserbilanz wird somit ausgehend von der Systemeinspeisung die Wassermenge der realen Wasserverluste von oben nach unten ermittelt. Daher wird die Erstellung der Wasserbilanz auch als *top-down*-Verfahren bezeichnet. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist, dass die Genauigkeit der ermittelten Gesamtmenge der realen Verluste von den jeweiligen Genauigkeiten der gemessenen oder geschätzten Wassermengen der anderen Komponenten abhängt, da diese durch Fehlerfortpflanzung Einfluss auf die Berechnung haben. Daher wird in nahezu allen Richtlinien und technischen Anleitungen betont, dass die Messung der Systemeinspeisung und der Netzabgabe möglichst umfassend und genau erfolgen muss und dass die Messungenauigkeiten der eingesetzten Messtechnik in der Ergebnisdarstellung und -interpretation berücksichtigt werden müssen. Zudem wird gefordert, die ungemessene Netzabgabe möglichst genau abzuschätzen. Im Folgenden werden die empfohlenen Herangehensweisen zur Bestimmung der einzelnen Bilanzkomponenten basierend auf GIZ (2011) näher erläutert.

System Input Volume: Die gesamte Systemeinspeisung sollte durch Wasserzähler erfasst werden. Des Weiteren ist darauf zu achten, Wassereporte aus dem Leitungsnetz ebenfalls zu messen und je nach betrachteten Systemgrenzen ggf. von der Gesamteinspeisung abzuziehen (siehe Abbildung 3.7). Da die Betriebswasserzähler zur Messung der Einspeisung nicht der Eichpflicht unterliegen, sind diese Geräte regelmäßig auf Abweichungen zu prüfen, um größere Ungenauigkeiten der Messwerte rechtzeitig zu erkennen und entsprechend in der Bilanzerstellung zu berücksichtigen. Möglichkeiten der Überprüfung eines Betriebswasserzählers sind beispielsweise der Einsatz eines temporär und in Serie mit dem Zähler installierten Durchflussmessgeräts oder der Abgleich mit Wasserspiegeländerungen von Speicherbehältern (Bestimmung der eingespeisten Wassermenge bei bekannter Behältergeometrie). Bei ungemessenen Einspeisungen sollte durch geeignete Felduntersuchungen die Einspeisemenge möglichst genau abgeschätzt werden. Dies kann beispielsweise durch zeitlich und örtlich begrenzte Volumenmessungen und eine anschließende Hochrechnung auf das gesamte betrachtete Bilanzgebiet und den gewählten Bilanzzeitraum erfolgen.

Billed Authorised Consumption: Zur Ermittlung der in Rechnung gestellten Netzabgabe sollten alle häuslichen, kommerziellen, industriellen und landwirtschaftlichen Verbraucher identifiziert und die entsprechenden Zählerstände der Kundenwasserzähler zur Ermittlung der Netzabgabe verfügbar sein. Stimmen Ablese- und Bilanzzeitraum nicht überein, müssen die Ablesewerte entsprechend umgerechnet werden. Nähere Informationen zu den verschiedenen Verfahren zur Umrechnung finden sich in Renaud u. a. (2009) und Knobloch (2014). Ungemessene Netzabgaben an registrierte und abgerechnete Verbraucher sollten durch geeignete Methoden möglichst genau abgeschätzt werden. Beispielsweise können stichprobenartige Messungen in Kombination mit verfügbaren Kundendaten (Anzahl der Personen, Größe des Hausanschlusses) zur Extrapolation auf das gesamte Bilanzgebiet durchgeführt werden.

Unbilled Authorised Consumption: Die Ermittlung der nicht in Rechnung gestellten Netzabgabe muss ebenfalls über Schätzungen erfolgen, da diese in der Regel nicht über Wasserzähler gemessen wird. Grundsätzlich sollte die unentgeltlich abgegebene Wassermenge nur einen geringen Anteil an der Systemeinspeisung ausmachen. Für die Schätzung müssen zunächst alle nicht abgerechneten Verbraucher bzw. Verbrauchergruppen identifiziert werden. Dazu zählen beispielsweise Feuerwehren, öffentliche Parkanlagen und Bäder oder Betriebswohnungen des Versorgungsunternehmens. Anschließend muss die Abgabe an diese Verbrauchergruppen entweder durch Feldtests stichprobenartig ermittelt oder anhand von verfügbaren Literaturwerten übertragen werden. Der Eigenverbrauch des Versorgungsunternehmens muss ebenso abgeschätzt bzw. wenn möglich gemessen werden. Beispielsweise sollten bei Leitungs- und Hydrantenspülungen Standrohre mit integriertem Wasserzähler zur Bestimmung der dabei verbrauchten Wassermenge eingesetzt werden.

Apparent Losses: Scheinbare Verluste werden nicht von der Messtechnik erfasst und müssen daher so genau wie möglich abgeschätzt werden. Dazu können entweder Richtwerte aus der einschlägigen Literatur (z.B. nationale Richtlinien) verwendet oder stichprobenartige Feldkampagnen im Versorgungsgebiet durchgeführt werden. In den nationalen und internationalen Richtlinien werden zur Abschätzung unterschiedliche Angaben bezüglich der Richtwerte gemacht. Während die DVGW im nicht mehr gültigen Arbeitsblatt W 392 (2003) noch angibt, dass die scheinbaren Wasserverluste mit 1,5 - 2,0 % der Netzabgabe angesetzt werden können, wird im aktuell gültigen Arbeitsblatt W 392 (A) (2017) diesbezüglich keine Angabe gemacht. Vielmehr wird betont, dass ohne konkrete Abschätzung der scheinbare Wasserverlustanteil mit Null anzusetzen ist und ein Anteil von über 0,5 % der Netzabgabe detailliert begründet werden muss. In einem Positionspapier zu den besten Praktiken im Wasserverlustmanagement schlägt die EU einen scheinbaren Wasserverlustanteil von 2,2 % an der in Rechnung gestellten und gemessenen Netzabgabe als Richtwert vor (EU, 2015). Mutikanga u. a. (2010) empfehlen für Entwicklungsländer, abhängig von der Zahl der Hausanschlüsse, dem Alter und der Genauigkeit der Kundenwasserzähler, der Art der Hausinstallationen (direkte Versorgung/private Speicherbehälter) sowie dem Zähler- und Abrechnungsmanagement des Versorgungsunternehmens, Referenzwerte mit einem Anteil zwischen 7,5 % und 48 % der scheinbaren Verluste an der in Rechnung gestellten Wassermenge. Alle genannten Quellen betonen jedoch, dass die Versorgungsunternehmen nach Möglichkeit eine eigene Untersuchung zu den scheinbaren Verlusten im betrachteten Versorgungssystem durchführen sollten. Dazu können beispielsweise Erhebungen zu illegalen bzw. nicht registrierten Hausanschlüssen oder stichprobenartige Analysen der Messgenauigkeiten der eingebauten Kundenwasserzähler im Prüfstand durchgeführt werden, um so die Wassermenge der scheinbaren Wasserverluste abschätzen zu können.

Real Losses: Das Ergebnis der Wasserbilanz ist das Gesamtvolumen der realen Wasserverluste, hergeleitet aus den gemessenen bzw. geschätzten Wassermengen der anderen Bilanzkomponenten. Dieses Ergebnis gibt jedoch keine Auskunft darüber, wie sich dieses Volumen auf die unterschiedlichen Systemkomponenten (z.B. Rohrleitungen oder Speicherbehälter) und Leckageformen (z.B. detektierbar oder nicht detektierbar) aufteilt (Fanner, 2004). Darüber hinaus gibt die Wasserbilanz nicht den aktuellsten Stand bezüglich der Wasserverluste wieder, sondern bezieht sich auf einen zurückliegenden Zeitraum (z.B. das vergangene Jahr). Daher sollte zur genaueren Analyse der aktuellen realen Wasserverluste und zur Entwicklung einer zielgerichteten Reduktionsstrategie die Wasserbilanz um weitere Verfahren der Wasserverlustermittlung ergänzt werden, die im nächsten Abschnitt erläutert werden.

3.4.4 Weitere Verfahren der Wasserverlustermittlung

3.4.4.1 Komponentenanalyse

Die Komponentenanalyse, die im internationalen Gebrauch als *BABE*-Konzept (englisch: *Bursts and Background Estimates*) bekannt ist, schätzt die Mengen verschiedener Komponenten der realen Wasserverluste. Dabei wird in die jeweilige Systemkomponente und Leckageform unterschieden. Die betrachteten Systemkomponenten sind die Haupt- und Versorgungsleitungen, Anschlussleitungen sowie Speicherbehälter. Bei der Leckageform erfolgt die gesonderte Betrachtung von Kleinstleckagen sowie reparierten Schäden, die entweder gemeldet oder durch Leckkontrollen des Versorgungsunternehmens detektiert wurden. Für jede der so entstandenen Gruppen aus jeweils einer Systemkomponente und Leckageform wird anhand von durchschnittlichen Leckraten und Laufzeiten die jeweilige Wasserverlustmenge abgeschätzt. Zieht man die Summe dieser Verlustmengen von der anhand der Wasserbilanz ermittelten Gesamtmenge der realen Wasserverluste ab, erhält man die Verlustmenge, die mit der aktuellen Strategie zur Reduktion der realen Wasserverluste nicht entdeckt und repariert wird. Diese Menge wird als exzessive Wasserverluste (englisch: *excess losses*) bezeichnet und kann dem Versorgungsunternehmen wichtige Hinweise zur zielgerichteten Verlustreduktion geben (Liemberger und Farley, 2004).

In Abbildung 3.9 sind die erforderlichen Eingangsdaten sowie die Berechnungsvorschriften zur Ermittlung der einzelnen realen Wasserverlustkomponenten und der daraus abgeleiteten exzessiven Wasserverlustmenge dargestellt. Bei den Eingangsdaten sind neben Leitungsnetzdaten vor allem Daten aus bekannten Schäden an Leitungskomponenten und Speicherbehältern erforderlich, beispielsweise die Anzahl sowie die Leckraten und Laufzeiten von gemeldeten und detektierten Schäden im Betrachtungszeitraum. Sind bezüglich den Leckraten und Laufzeiten keine Daten vorhanden, sind in Lambert u. a. (1999) Richtwerte basierend auf den Datensätzen von 27 Versorgungsunternehmen aus 20 Ländern gegeben, darunter Deutschland, Niederlande, Australien und die USA. Diese sind in Abbildung 3.9 angegeben und bei den jeweiligen Berechnungsansätzen berücksichtigt. Dabei ist zu beachten, dass diese Richtwerte die minimalen Leckraten und Laufzeiten für Leitungsnetze in sehr gutem Zustand und bei einer aktiven Leckkontrolle durch das Versorgungsunternehmen darstellen.

Auch wenn die Komponentenanalyse auf einer Reihe von Annahmen und Vereinfachungen basiert und nur eine Abschätzung der Verlustmengen liefert, gibt diese Aufschluss darüber, wo und in welchem Ausmaß reale Wasserverluste im Versorgungssystem auftreten. Zudem wird durch die Ermittlung der exzessiven Wasserverluste das Potential zur Reduktion von bisher nicht oder nicht ausreichend durch entsprechende Gegenmaßnahmen adressierten Verlustmengen im System aufgezeigt. Je nach Ausmaß der jeweiligen Verlustkomponenten können beispielsweise die Verlustmengen an Kleinstleckagen durch ein entsprechendes Druckmanagement (siehe Abschnitt 3.5) reduziert oder die Laufzeit von gemeldeten und detektierten Leckagen durch verbessertes Leckagemanagement verringert werden (Knobloch, 2014).

3 Wasserverlustmanagement

Eingangsdaten	
<i>Leitungsnetz</i>	L_{ges} : Gesamtlänge d. Leitungsnetzes [km] n_{AL}: Anzahl d. Anschlussleitungen [-] $L_{AL,p}$: mittl. Länge d. Anschlussleitungen auf Privatgrund [km] SP_m: mittl. Versorgungsdruck [m]
<i>Schäden</i>	$n_{g,HVL}$: Anzahl gemeldeter Schäden [-] $n_{d,HVL}$: Anzahl detektierter Schäden [-] <i>Haupt- und Versorgungsleitungen</i> $r_{g,HVL}$: Leckrate gemeldeter Schäden $r_{d,HVL}$: Leckrate detektierter Schäden 0,24 [m ³ /h/m Druck] * 0,12 [m³/h/m Druck] * $t_{g,HVL}$: Laufzeit gemeldeter Schäden [h] $t_{d,HVL}$: Laufzeit detektierter Schäden [h]
	<i>Anschlussleitungen</i> $n_{gd,AL}$: Anzahl gemeldeter u. detektierter Schäden [-] $r_{gd,AVL}$: Leckrate gemeldeter u. detektierter Schäden 0,032 [m ³ /h/m Druck] * $t_{d,AL}$: Laufzeit gemeldeter u. detektierter Schäden [h]
	<i>Speicherbehälter</i> $Q_{V,SB}$: Wasserverluste durch Leckagen u. Überläufe an Behälter(n) [m ³]
	<i>Kleinstleckagen</i> $r_{KL,HVL}$: Leckrate von Kleinstleckagen an Haupt- u. Versorgungsleitungen 0,0096 [m ³ /km/d/m Druck] * $r_{KL,AL,\delta}$: Leckrate von Kleinstleckagen an Anschlussleitungen im öffentl. Abschnitt 0,0006 [m ³ /AL/d/m Druck] * $r_{KL,AL,p}$: Leckrate von Kleinstleckagen an Anschlussleitungen im privaten Abschnitt 0,016 [m ³ /km/d/m Druck] *
<i>Wasserbilanz</i>	$Q_{V,WB}$: Reale Wasserverluste aus Wasserbilanzerstellung [m ³] t_{WB} : Anzahl der Tage im Bilanzzeitraum [d]
Berechnungsvorschriften	
<i>Wasserverluste durch Kleinstleckagen</i>	$Q_{V,KL} = (0,0096 \cdot L_{ges} + 0,0006 \cdot n_{AL} + 0,016 \cdot L_{AL,p}) \cdot t_{WB} \cdot SP_m$ [m ³]
<i>Wasserverluste durch gemeldete u. detektierte Schäden</i>	$Q_{V,S} = (0,24 \cdot n_{g,HVL} \cdot t_{g,HVL} + 0,12 \cdot n_{d,HVL} \cdot t_{d,HVL} + 0,032 \cdot n_{gd,AL} \cdot t_{gd,AL}) \cdot SP_m + Q_{V,SB}$ [m ³]
<i>Exzessive Wasserverluste</i>	$Q_{V,Exz} = Q_{V,WB} - (Q_{V,KL} + Q_{V,S})$ [m ³]

* Richtwerte nach Lambert u.a. (1999)

Abbildung 3.9: Komponentenanalyse nach Lambert u. a. (1999) und Liemberger und Farley (2004)

3.4.4.2 Induktive Verfahren

Die beiden bisher vorgestellten Verfahren der Wasserbilanz sowie der Komponentenanalyse werden als deduktive Verfahren (englisch: *top-down*) bezeichnet. Bei diesen erfolgt ein logisches Schließen von etwas Allgemeinem auf das Einzelne. Im Fall der Wasserbilanz beispielsweise werden die Wasserverluste schrittweise aus der Systemeinspeisung abgeleitet. Bei den induktiven Verfahren erfolgt die Bestimmung der aktuellen Wasserverlustmenge im betrachteten Versorgungssystem aus den Ergebnissen von Einzelmessungen innerhalb des Systems. Es wird bei der Induktion somit von Einzeluntersuchungen auf das Allgemeine geschlossen. Da jedoch die Planung und Durchführung der Messungen zur möglichst exakten Bestimmung der Wasserverluste mit erheblichem Aufwand verbunden sind, können diese in

der Regel nur örtlich und zeitlich begrenzt durchgeführt werden. Daher sind zur Vorbereitung der Messungen zunächst möglichst kleinräumige, hydraulisch über Absperrschieber isolierbare Untersuchungsgebiete (Messzonen) im Leitungsnetz einzurichten. Im internationalen Kontext werden diese Messzonen als DMA (englisch: *District Metered Area*) bezeichnet. Außerdem sollten alle Verbraucher in diesen Gebieten eindeutig identifiziert und deren Verbrauch und Verbrauchsverhalten analysiert werden (Knobloch, 2014). Anschließend können die im Folgenden erläuterten induktiven Verfahren mit der entsprechenden Messtechnik durchgeführt werden.

Nullverbrauchsmessung: Bei diesem Verfahren wird davon ausgegangen, dass in einer leakagefreien Messzone innerhalb von mehreren, kurzen Messintervallen in den verbrauchsarmen Nachtstunden kein Verbrauch erfolgt. Dazu wird nachts die momentane Netzeinspeisung in die Messzone mit mobilen Durchflussmessgeräten in kleinen Zeitintervallen gemessen und die minimalen Zuflusswerte identifiziert. Sind die Minimalwerte nicht gleich Null, deutet dies auf eine Leckage oder einen Dauerverbraucher hin. Ein identifizierter Dauerverbraucher sollte gemessen werden, um dessen Verbrauch von den gemessenen Minimalwerten abzuziehen und somit die Menge der realen Wasserverluste zu bestimmen (DVGW, 2017). Die untersuchte Messzone sollte in Abhängigkeit der Anzahl der angeschlossenen Verbraucher möglichst kleinräumig sein, um einen eindeutig identifizierbaren Nullverbrauch in den Nachtstunden zu gewährleisten. Nach DVGW Arbeitsblatt W 392 (2017) sollte die Einwohnerzahl im Untersuchungsgebiet maximal 500 Personen betragen.

Nachtmindestverbrauchsmessung: Bei der Nachtmindestverbrauchsmessung wird ebenfalls die Einspeisung in den Nachtstunden (1.00 bis 4.00 Uhr) analysiert, um Rückschlüsse auf die realen Wasserverluste in der Messzone zu ziehen. Im Vergleich zur Nullverbrauchsmessung kann dieses Verfahren in größeren Untersuchungsgebieten (gemäß DVGW Arbeitsblatt W 392 (2017) mit maximal 1.500 Einwohnern) durchgeführt werden. Die Netzeinspeisung wird in der Regel in Zeitintervallen von einer Stunde mittels mobiler oder stationärer Durchflussmessgeräte kontinuierlich gemessen. In den Nachtstunden ist der Verbrauch am geringsten und der Versorgungsdruck somit am höchsten. Dadurch erreicht auch die Wasserverlustmenge nachts die höchsten Werte.

Die maximale reale Verlustmenge $Q_{VR,max}$ [m^3/h] lässt sich gemäß Gleichung 3.3 aus der Differenz der in den Nachtstunden geringsten gemessenen Netzeinspeisung pro Stunde, die dem Nachtmindestverbrauch Q_{NMV} [m^3/h] entspricht, und der Restverbrauchsmenge der Einwohner Q_{Rest} [m^3/h] ermitteln. Die Restverbrauchsmenge Q_{Rest} muss anhand der Einwohnerzahl geschätzt werden. Diesbezüglich wird im DVGW Arbeitsblatt W 392 (2017) ein oberer Richtwert von 2 l/h pro Einwohner angegeben. Im nächsten Schritt werden zur Ermittlung der täglichen realen Wasserverlustmenge Q_{VR} [m^3/d] die Druckschwankungen über den Tag berücksichtigt, die Einfluss auf die aus den Leckagen austretende Wassermenge haben. Dazu wird gemäß Gleichung 3.4 die maximale reale Wasserverlustmenge $Q_{VR,max}$ mit dem Verhältnis des mittleren Versorgungsdrucks SP_m [m] zum Versorgungsdruck zum Zeit-

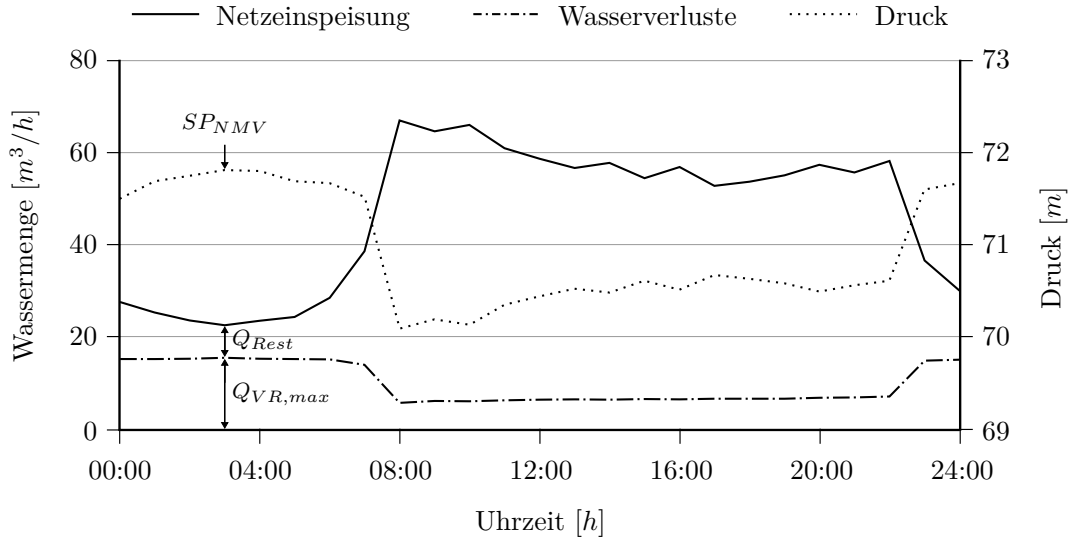


Abbildung 3.10: Beispiel einer Nachtmindestverbrauchsmessung nach Knobloch (2014)

punkt der Nachtmindestverbrauchsmessung SP_{NMV} [m] unter Berücksichtigung des dimensionslosen Leckageexponenten α multipliziert (Knobloch, 2014). Abbildung 3.10 veranschaulicht das Verfahren zur Bestimmung der realen Wasserverlustmenge zum Zeitpunkt des Nachtmindestverbrauchs.

$$Q_{VR,max} = Q_{NMV} - Q_{Rest} \quad [m^3/h] \quad (3.3)$$

$$Q_{VR} = Q_{VR,max} \cdot \left(\frac{SP_m}{SP_{NMV}} \right)^\alpha \quad [m^3/d] \quad (3.4)$$

Der im Rahmen einer Messkampagne ermittelte Nachtmindestverbrauch dient als Referenzwert für die weitere kontinuierliche Überwachung der Verluste in der Messzone. Wird der Referenzwert bei nachfolgenden Messkampagnen dauerhaft überschritten, deutet dies auf neue Leckagen hin, sofern eine Netzerweiterung oder neue Dauerverbraucher ausgeschlossen werden können. Bei einer Unterschreitung des Referenzwertes, beispielsweise bedingt durch abgeschlossene Wasserverlustreduktionsmaßnahmen oder den Wegfall eines Dauerverbrauchers, wird der Wert dementsprechend angepasst (DVGW, 2017).

Kontinuierliche Messung der Netzeinspeisung: Als geeignetste Methode zur Überwachung der Wasserverlustsituation in einer Messzone wird die kontinuierliche Messung der Netzeinspeisung angesehen. Dazu werden in der Regel alle Zuflussleitungen in die Zone mit Durchflussmessgeräten ausgestattet, deren Messwerte durch Fernwirktechnik kontinuierlich an die Leitstelle zur Analyse weitergegeben werden. Die softwaregestützte Verlustüberwachung basiert dabei auf dem Prinzip der

Nachtmindestverbrauchsmessung. Sobald ein bestimmter Referenzwert dauerhaft überschritten wird, erfolgt eine Analyse der Durchflussänderungen zur Feststellung, ob diese auf eine Leckage im Leitungsnetz hindeuten. Das Verfahren wird vorrangig zur raschen Erkennung und möglichst genauen Lokalisation von Leckagen und weniger für die Ermittlung der Wasserverlustmengen angewandt. Dazu werden die Durchflussmessungen der Netzeinspeisung meist mit Druck- und Geräuschpegelmessungen ergänzt, da dies die relevanten Parameter hinsichtlich eines Lecks sind. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse über Leckraten und Laufzeiten der einzelnen Schadensereignisse kann jedoch auch mit diesem Verfahren auf die Wasserverlustmenge im Betrachtungszeitraum geschlossen werden (Kölbl und Martinek, 2010).

Stop-Tap-Verfahren: Dieses Verfahren eignet sich besonders für den Einsatz in intermittierenden Versorgungssystemen. In diesen Systemen erfolgt die zeitlich begrenzte Versorgung meistens untertags. Dabei ist der Versorgungsdruck in der Regel gering, da die angeschlossenen Verbraucher private Speichertanks installiert haben und somit in der Versorgungsperiode aufgrund der dauerhaft geöffneten Anschlussleitungen durchgehend hohe Durchflüsse im Leitungsnetz herrschen. Somit ist die Anwendung der bisher vorgestellten Verfahren zur Wasserverlustermittlung in diesen Systemen in der Regel nicht umsetzbar bzw. nicht zielführend.

Daher erfolgt bei dem *Stop-Tap*-Verfahren eine zeitlich begrenzte Einspeisung mit entsprechendem Versorgungsdruck in die Messzone, wobei sowohl die Einspeisemenge als auch der Druck gemessen werden. Die temporäre Einspeisung kann dabei beispielsweise über mobile Tankklaster mit spezieller Pumpvorrichtung erfolgen. In der Vorbereitung dieses Verfahrens werden die Messzone über das Schließen von Absperrschiebern hydraulisch vom Rest des Leitungssystems isoliert und die Absperrventile (englisch: *stop taps*) an den Anschlussleitungen der Verbraucher geschlossen (Farley, 2001). Somit entspricht im Idealfall die eingespeiste Menge der Wasserverlustmenge, da kein Verbrauch über die geschlossenen Absperrventile erfolgen kann. Allerdings ist dabei zu beachten, dass die während der Durchführung dieses Verfahrens herrschenden Einspeisemengen und Versorgungsdrücke nicht die normalen Bedingungen während der intermittierenden Versorgung widerspiegeln. Daher müssen die gemessenen Werte zur Bestimmung der Leckraten in Abhängigkeit des Drucks dementsprechend angepasst werden.

Ein Vorteil dieses Verfahrens ist, dass die störenden Einflüsse der Befüllung privater Speichertanks unterbunden sind und somit während der Durchführung Leckortungen mittels akustischer Verfahren erfolgen können (Knobloch, 2014). Nachteilig ist, dass während der Messungen die Verbraucher von der Versorgung abgeschnitten sind, eine erhebliche Wassermenge durch vorhandene Leckagen verloren geht und das Verfahren relativ aufwendig ist (Farley, 2001).

Volumetrischer Dichtigkeitstest: Dieses verhältnismäßig einfach umzusetzende Verfahren eignet sich zur Bestimmung der Wasserverluste durch Undichtheiten an Speicherbehältern. Dabei wird die Auslauffleitung des Behälters mittels einer

Absperrarmatur geschlossen und die Behälterkammer vollständig gefüllt. Anschließend wird mittels der bestehenden Messtechnik oder einem zu installierenden, hochauflösenden Messgeräts die zeitliche Entwicklung des Wasserstands beobachtet. Sinkt der Wasserspiegel in der Kammer, deutet dies auf Undichtheiten hin. Über das Produkt aus bekannter Behältergrundfläche und der Wasserspiegeldifferenz im Betrachtungszeitraum wird dann die Leckrate der Undichtheiten bestimmt. Voraussetzung der Anwendung dieser Methode ist, dass die Absperrarmatur dicht ist. Dies sollte im Vorfeld der Messung überprüft werden (Thornton u. a., 2008). Dieses Verfahren wurde im Rahmen dieser Arbeit im Pilotgebiet in Indien durchgeführt, wie in Abschnitt 6.4.2 beschrieben.

3.4.5 Kennzahlen zur Wasserverlustbewertung

3.4.5.1 Allgemein

Angesichts der zunehmenden Knappheit verfügbarer Wasserressourcen, vor allem in Entwicklungs- und Schwellenländern, ist ein leistungsfähiger und effizienter Betrieb von Wasserversorgungssystemen ein zentraler Aspekt einer nachhaltigen Versorgung. Daher sollte die Leistungsbewertung ein integraler Bestandteil der strategischen Planungs- und Entscheidungsprozesse in einem Wasserversorgungsunternehmen sein. Diesbezüglich veröffentlichte die IWA im Jahr 2000 einen umfangreichen Katalog von Kennzahlen, der inzwischen in der dritten Auflage erschienen ist (*Performance Indicators for Water Supply Services* von Alegre u. a. (2000)). Die insgesamt 170 Kennzahlen, die die Bereiche Wasserressourcen, Personal, technische Ausstattung, Betrieb, Servicequalität und Wirtschaftlichkeit abdecken, können anhand von eindeutig definierten Berechnungsvorschriften und den entsprechend verfügbaren Eingangsdaten (z.B. Betriebs- und Finanzdaten) berechnet werden. Dadurch werden quantitative Informationen generiert, die u.a. einer systematische Leistungsbeurteilung des Unternehmens, der Festlegung von Unternehmenszielen sowie der Positionsbestimmung durch externe Unternehmensvergleiche (Benchmarking) dienen können.

In Deutschland wurde das IWA-Kennzahlensystem in einer erweiterten und an die Anforderungen der deutschen Wasserwirtschaft angepassten Fassung von Hirner und Merkel (2005) publiziert. Seitdem wurde dieses System weiter an die regionalen Randbedingungen angepasst. Dies hat zur Folge, dass zum Teil voneinander abweichende landesweite Kennzahlensysteme koexistieren, die einen bundesweiten Leistungsvergleich der Versorgungsunternehmen erschwert. Diesbezüglich wurde im Rahmen eines DVGW-Forschungsvorhabens ein Vorschlag für ein bundeseinheitliches Kennzahlensystem zur Berücksichtigung in den Benchmarking-Landesprojekten ausgearbeitet. Dieses System, dessen wesentliche Aspekte in den Merkblättern W 1100-2 und W 1100-3 veröffentlicht wurden, umfasst 95 Haupt-Kennzahlen und berücksichtigt Strukturmerkmale und somit die Randbedingungen der jeweiligen Versorgungssysteme (IWW, 2014).

Neben dem IWA-Kennzahlensystem wurden international noch weitere Bewertungssysteme von internationalen Organisationen wie der Weltbank oder der ADB entwickelt. Das IWA-System bietet dabei jedoch den umfangreichsten Bewertungskatalog. Zu beachten ist, dass die bestehenden Kennzahlensysteme nicht gleichermaßen für alle Versorgungsunternehmen gültig und anwendbar sind und bisher lediglich nationale Ansätze zum Leistungsvergleich der Wasserversorgungsunternehmen existieren. So ist in Entwicklungs- und Schwellenländern die Verfügbarkeit an geschultem Personal, den finanziellen Ressourcen sowie der erforderlichen Datengrundlage im Vergleich zu entwickelten Ländern limitiert. Dadurch ist auch die Anwendbarkeit des IWA-Kennzahlensystems in diesen Ländern auf vergleichsweise wenige Kennzahlen beschränkt (Haider u. a., 2014). In Indien beispielsweise umfasst das vom Staat veröffentlichte Handbuch zum Leistungsvergleich städtischer Dienstleistungen lediglich neun Indikatoren für den Bereich Wasserversorgung (MoUD, 2008).

Im Folgenden werden die wesentlichen finanziellen und betrieblichen Kennzahlen des IWA-Kennzahlensystems vorgestellt, die in Bezug zur Bewertung der unterschiedlichen Verlustkomponenten der Wasserbilanz stehen. Tabelle 3.2 gibt einen Überblick über die genannten Kennzahlen, die Bezeichnungen und entsprechenden Berechnungsvorschriften sowie die erforderlichen Eingangsparameter. Generell wird empfohlen, die Kennzahlen über einen Betrachtungszeitraum von mindestens einem Jahr zu ermitteln, um so beispielsweise jahreszeitliche oder temporäre betriebsbedingte Schwankungen der Eingangsparameter auszugleichen (Alegre u. a., 2016). Die in Tabelle 3.2 gelisteten Kennzahlen und Berechnungsvorschriften beziehen sich daher auf den Betrachtungszeitraum von einem Jahr.

3.4.5.2 Reale Wasserverluste

Zur Bewertung der realen Wasserverlustmengen stehen mehrere Kennzahlen zur Verfügung. Diese unterscheiden sich in der Anzahl der berücksichtigten Parameter, die Einfluss auf die Höhe der Verluste haben. Zu diesen Parametern zählen die Systemeinspeisung, die Gesamtlänge des Leitungsnetzes (ohne Anschlussleitungen), die Gesamtlänge und -Anzahl der Anschlussleitungen, der Versorgungsdruck sowie die Anzahl der Stunden am Tag, in denen das betrachtete Leitungsnetz unter Druck, d.h. mit Wasser vollgefüllt, ist.

Für die technische Bewertung innerhalb eines Unternehmens bzw. Versorgungssystems eignen sich zunächst die Kennzahlen *Reale Verluste je Anschlussleitung (Op27)* und *Reale Verluste je Leitungslänge (Op28)*. Die beiden Kennzahlen berücksichtigen entweder die Gesamtanzahl der Anschlussleitungen oder die Gesamtlänge des Leitungsnetzes (Tabelle 3.2). Alegre u. a. (2016) empfiehlt, bei einer Dichte von weniger als 20 Anschlussleitungen pro Kilometer Leitungsnetz die Verwendung der Kennzahl *Op28*, andernfalls sollte die Kennzahl *Op27* ermittelt werden. In beiden Fällen wird darüber hinaus die Anzahl der Stunden berücksichtigt, die das Leitungsnetz am Tag unter Druck steht. Dies ist insbesondere für die Bewertung von intermittierend betriebenen Versorgungssystemen relevant. Im DVGW Arbeitsblatt W 392 (2017) wird in Anlehnung an die Kennzahl *Op28* die Verwendung der spezifischen realen Was-

Tabelle 3.2: Kennzahlen zur Bewertung der Wasserverlustkomponenten (Alegre u. a., 2000, 2016)

Beschreibung	Berechnungsvorschrift	Parameter
Reale Verluste je Anschlussleitung	$Op27 = CARL = \frac{Q_{VR} \cdot 1000 \cdot 24}{n_{AL} \cdot 365 \cdot T_P} [l/AL/d]$	Q_{VR} : Reale Wasserverluste [m^3/a] Q_{VS} : Scheinbare Wasserverluste [m^3/a] Q_{AN} : Nicht in Rechnung gestellte Netzabgabe [m^3/a] Q_{AIM} : In Rechnung gestellte, gemessene Netzabgabe [m^3/a] Q_{NRW} : Nicht in Rechnung gestellte Wassermenge [m^3/a]
Reale Verluste je Leitungslänge	$Op28 = \frac{Q_{VR} \cdot 1000 \cdot 24}{L_{ges} \cdot 365 \cdot T_P} [l/km/d]$	Q_{STV} : Systemeinspeisung [m^3/a] Q_{Exp} : Wasserexport [m^3/a] L_{ges} : Gesamtlänge Leitungsnetz [km] L_{AL} : Gesamtlänge Anschlussleitungen [km] n_{AL} : Anzahl Hausanschlüsse [-]
Infrastructure Leakage Index (ILI)	$Op29 = \frac{CARL}{U_{ARL}} = \frac{CARL}{(6,57 \cdot L_{ges} + 0,256 \cdot n_{AL} + 9,13 \cdot L_{AL}) \cdot SP_m} [-]$	SP_m : mittl. Versorgungsdruck [m] T_P : Leitungsnetz unter Druck [h] C_B : Betriebskosten [€] C_{WP} : Wasserpreis für Direktversorgung [€/m ³] C_{VR} : Kosten der Realen Wasserverluste [€/m ³]
Scheinbare Verluste je Anschlussleitung	$Op25 = \frac{Q_{VS} \cdot 1000 \cdot 24}{n_{AL} \cdot 365 \cdot T_P} [l/AL/d]$	
Scheinbare Verluste je Leitungslänge	$Op26 = \frac{Q_{VS} \cdot 1000 \cdot 24}{L_{ges} \cdot 365 \cdot T_P} [l/km/d]$	
Scheinbare Verluste je Netzabgabe	$CAAL = \frac{Q_{VS}}{Q_{AIM}(-Q_{Exp})} \cdot 100 [\%]$	
Nicht in Rechnung gestellte Wassermenge	$F\%46 = \frac{Q_{NRW}}{Q_{STV}(-Q_{Exp})} \cdot 100 [\%]$	
Kosten der nicht in Rechnung gestellten Wassermenge	$F\%47 = \frac{(Q_{AN} + Q_{VS}) \cdot C_{WP} + Q_{VR} \cdot C_{VR}}{C_B} \cdot 100 [\%]$	

serverluste q_{VR} empfohlen, die ebenfalls die Gesamtlänge des Leitungsnetzes ohne Anschlussleitungen berücksichtigen. Die Einheit wird dabei jedoch mit Kubikmetern pro Kilometer und Stunde anstelle von Litern pro Kilometer und Tag angegeben.

Die Kennzahl *Infrastructure Leakage Index (Op29)* berücksichtigt neben der Leitungslänge und der Anschlussdichte auch den mittleren Versorgungsdruck im Netz und beinhaltet somit mehrere Parameter. Daher wird diese Kennzahl, die im internationalen Gebrauch meist als *ILI* bezeichnet wird, als der bisher umfassendste Ansatz zur quantitativen Bewertung der realen Wasserverluste sowie des Erfolgs von Reduktionsmaßnahmen angesehen. Zudem wird der externe Leistungsvergleich von Versorgungsunternehmen mit unterschiedlichen Infrastrukturmerkmalen und Betriebsbedingungen ermöglicht.

Der dimensionslose *ILI* setzt die aktuelle jährliche reale Wasserverlustmenge (englisch: *Current Annual Real Losses, CARL*), die der Kennzahl *Op27* entspricht, in das Verhältnis zu der unvermeidbaren jährlichen realen Wasserverlustmenge (englisch: *Unavoidable Annual Real Losses, UARL*). Die *UARL* stellen die aus technischer Sicht unvermeidbaren Verluste in Leitungsnetzen mit gut erhaltener Infrastruktur und aktiver Leckkontrolle dar. Zur Ermittlung dieser Verlusthöhe wurde von Lambert u. a. (1999) auf Basis von internationalen Datenerhebungen in 20 Versorgungssystemen eine Gleichung empirisch bestimmt und später weiter angepasst (Lambert u. a., 2014). Diese Gleichung, die in Tabelle 3.2 gegeben ist, beinhaltet die aus den Datenerhebungen gewonnenen Richtwerte für die jeweiligen Verluste im eigentlichen Leitungsnetz (Gesamtlänge L_{ges}) und den Anschlussleitungen (Gesamtlänge L_{AL} , Gesamtanzahl n_{AL}) in Abhängigkeit der Druckhöhe SP_m . Das Ergebnis des *ILI* gibt somit das aktuelle Wasserverlustniveau als ein Vielfaches des unvermeidbaren Verlustniveaus an. Je weiter der Wert über 1,0 liegt, desto größer ist das vorhandene Potential zur Wasserverlustreduktion durch geeignete Maßnahmen.

Hinsichtlich der Bewertung von intermittierenden Versorgungssystemen ist jedoch zu beachten, dass die Anwendbarkeit des *ILI* limitiert ist. Ein Grund hierfür ist, dass die *UARL*-Formel mit den empirisch abgeleiteten Richtwerten der durchschnittlichen Leckraten für stets unter Druck stehende Leitungsnetze entwickelt wurde. McKenzie u. a. (2007) empfehlen daher, dass vor Anwendung des *ILI* zur Leistungsbewertung des Wasserverlustmanagements die Einführung einer kontinuierlichen Versorgung priorisiert werden sollte. Außerdem sollte die Kennzahl nicht zum Leistungsvergleich zwischen intermittierend und kontinuierlich betriebenen Versorgungssystemen verwendet werden.

3.4.5.3 Scheinbare Wasserverluste

Bei der Bewertung der scheinbaren Wasserverluste herrscht bis heute Uneinigkeit bezüglich den aus technischer Sicht am besten geeigneten Kennzahlen. Ein Grund hierfür ist die Komplexität der scheinbaren Verluste, die sich aus unterschiedlichen Komponenten wie Zählerungenauigkeiten, Datenhandhabungsfehlern oder Wasserdiebstahl zusammensetzen. Somit wird die Höhe der scheinbaren Wasserverluste neben technischen Faktoren maßgeblich von menschlichen und sozialen Faktoren

bestimmt. Die Herausforderung besteht darin, diese nicht-technischen Faktoren zu quantifizieren und diesbezüglich Formeln zur Berechnung von Kennzahlen zu entwickeln (Vermersch u. a., 2016).

Die Uneinigkeit zeigte sich darin, dass in der ersten Veröffentlichung des IWA-Kennzahlensystems in Übereinstimmung mit den realen Verlusten auch bei den scheinbaren Verlusten die Anzahl der Anschlussleitungen bzw. die Gesamtlänge des Leitungsnetzes berücksichtigt wurde. In der zweiten und dritten Auflage wird dagegen die Angabe der scheinbaren Verluste als Prozentanteil an der Systemeinspeisung empfohlen. Dies wurde von verschiedenen Mitgliedern der *IWA Water Loss Task Force* kritisiert, die im Vorfeld dieser Veröffentlichungen im Gegensatz zur ersten Veröffentlichung nicht konsultiert wurden. Grund für die Kritik ist, dass eine höhere Systemeinspeisung zu einer positiveren Kennzahl führen würde, obwohl sich die scheinbaren Verluste in der Realität nicht geändert haben.

Aktuell wird daher die Verwendung der beiden Kennzahlen *Scheinbare Verluste je Anschlussleitung (Op25)* und *Scheinbare Verluste je Leitungslänge (Op26)* empfohlen. Wie auch bei den realen Verlusten dient die Anschlussdichte als Auswahlkriterium zwischen beiden Kennzahlen. *Op26* wird bei weniger als 20 Anschlüssen pro Kilometer Leitungslänge verwendet. Darüber hinaus wird in den aktuellen Handlungsempfehlungen der *IWA Water Loss Task Force* zu den scheinbaren Verlusten eine Kennzahl zur Bewertung der aktuellen jährlichen scheinbaren Wasserverlustmenge (englisch: *Current Annual Apparent Losses, CAAL*) vorgeschlagen (Vermersch u. a., 2016). Die Kennzahl setzt die scheinbaren Verluste in das prozentuale Verhältnis zu der in Rechnung gestellten, gemessenen Netzabgabe, ausschließlich der exportierten Wassermengen (Tabelle 3.2). Dies wird damit begründet, dass diese beiden Komponenten zusammen üblicherweise den Großteil der gesamten an die Verbraucher abgegebenen Wassermenge ausmachen. Dementsprechend bedeutet eine Reduktion der scheinbaren Verluste die unmittelbare Erhöhung der in Rechnung gestellten, gemessenen Netzabgabe, beispielsweise durch verbesserte Wartung von Kundenwasserzählern oder Neu-Installation von Zählern bei bisher nicht registrierten Verbrauchern.

Des Weiteren wird in Anlehnung an den *ILI* für reale Verluste der *ALI* (englisch: *Apparent Losses Index*) vorgeschlagen, der die *CAAL* in das Verhältnis zu einem Referenzwert für ein erreichbares Niveau der scheinbaren Wasserverluste (englisch: *Reference Annual Apparent Losses, RAAL*) setzt. Der Referenzwert wird mit 5 % der in Rechnung gestellten, gemessenen Netzabgabe in Leitungsnetzen mit einem effizienten Zähler- und Kundenmanagement angegeben. Dieser Ansatz ist jedoch noch nicht in der Praxis erprobt und daher nicht in der Übersicht der Kennzahlen in Tabelle 3.2 gelistet.

3.4.5.4 Nicht in Rechnung gestellte Wassermenge

Zur Bewertung der nicht in Rechnung gestellten Wassermenge (englisch: *Non-revenue Water, NRW*) werden zwei finanzielle Kennzahlen empfohlen, die in Tabelle 3.2 enthalten sind. Die Kennzahl *NRW (Fi46)* ist direkt aus der Wasserbilanz er-

mittelbar und setzt die nicht in Rechnung gestellte Wassermenge in das prozentuale Verhältnis mit der Systemeinspeisung. Die andere Kennzahl *NRW je Betriebskosten (Fi47)* setzt die monetäre Bewertung der jeweiligen Komponenten der Gesamtmenge an NRW in das prozentuale Verhältnis zu den Betriebskosten. Dazu werden die Komponenten der nicht in Rechnung gestellten Netzabgabe sowie der scheinbaren Wasserverluste mit dem aktuell gültigen Wasserpreis für die direkte Wasserversorgung multipliziert, da dieses Wasser an die Kunden abgegeben wurde, ohne dass dafür Einkünfte generiert wurden. Die Komponente der realen Verluste wird dagegen mit den Kosten der Wasserverluste multipliziert. Diese Kosten entsprechen nach Hirner und Merkel (2005) entweder den Kosten für fremdbezogenes Wasser oder den Kosten der eigenen Rohwasserquellen inklusive der Wasseraufbereitung. Der höhere Wert dieser beiden Kosten sollte in der Berechnung berücksichtigt werden. Aufgrund der differenzierten monetären Betrachtung gilt die Kennzahl *Fi47* als aussagekräftigere finanzielle Kennzahl im Vergleich zur Kennzahl *Fi46* (Liemberger u. a., 2007).

Hinsichtlich der Kennzahl *Fi46* wird von nahezu allen technischen Fachexperten darauf hingewiesen, dass diese im internationalen Kontext nach wie vor am häufigsten publizierte Kennzahl sich nicht für eine technische Bewertung der aktuellen Wasserverlustsituation eignet. Grund hierfür ist, dass bei dieser Betrachtungsweise der prozentuale Anteil von NRW aufgrund des *Top-Down*-Ansatzes der Wasserbilanz stark von Schwankungen der Systemeinspeisung sowie der Netzabgabe abhängt (Lambert u. a., 2014). Eine höhere Systemeinspeisung hat beispielsweise ein Absinken des Prozentwerts zur Folge, obwohl sich an der tatsächlichen Verlustmenge nichts geändert hat. Eine höhere Netzabgabe wiederum reduziert den Verlustanteil, obwohl sich dieser in der Realität nicht geändert hat. Zudem wird von Lambert u. a. (2014) angemerkt, dass bezüglich der Angabe der Systemeinspeisung unterschiedliche Betrachtungsweisen existieren, die eine realistische Vergleichbarkeit von den NRW-Kennzahlen unterschiedlicher Versorgungsunternehmen verhindern. Beispielsweise kann die Systemeinspeisung die gesamte Rohwasserförderung umfassen, während bei anderen Betrachtungsweisen lediglich die aus eigenen Quellen aufbereiteten und an die Endverbraucher abgegebenen Reinwassermengen entweder inklusive oder exklusive exportierter Reinwassermengen betrachtet wird. Liemberger u. a. (2007) empfehlen, bei der Ermittlung der Kennzahl *Fi46* stets die an Weiterverteiler exportierten Wassermengen von der Gesamtmenge der Systemeinspeisung abzuziehen (Tabelle 3.2).

3.4.5.5 Instandhaltung sowie Zähler- und Kundenmanagement

In Ergänzung zu den in Tabelle 3.2 gelisteten Kennzahlen zur direkten Bewertung der Wasserverlustkomponenten können weitere Kennzahlen ermittelt werden, die in Zusammenhang mit der Höhe der Wasserverluste stehen. Dazu zählen bezüglich der realen Verluste insbesondere Kennzahlen zur Instandhaltung des Leitungsnetzes sowie bezüglich der scheinbaren Verluste Kennzahlen zum Zähler- und Kundenmanagement.

Hinsichtlich der Instandhaltung geben z.B. die Kennzahlen *Leckkontrolle (Op4)* und *Reparaturen nach Leckkontrolle (Op5)* Aufschluss über das aktuelle Leckagemanagement eines Versorgungsunternehmens. Im Hinblick auf möglichst geringe scheinbare Verluste ist u.a. der flächendeckende und ordnungsgemäße Betrieb von Kundenwasserzählern von Bedeutung, der beispielsweise durch die Kennzahlen *Kundenwasserzähler in Betrieb (Op38)* und *Effizienz der Zählerablesung (Op36)* bewertet werden kann. Darüber hinaus sollte der Anteil an unzulässiger Wasserentnahme aus dem Leitungsnetz möglichst gering sein. Mutikanga (2012) schlagen diesbezüglich eine Kennzahl zur Effizienz der Detektion von illegalen Wasseranschlüssen vor.

Eine Übersicht der von der *IWA Water Loss Task Force* aktuell empfohlenen Kennzahlen zur Wasserverlustbewertung ist in Lambert u. a. (2014) gegeben.

3.4.6 Strategieentwicklung zur Wasserverlustreduktion

Basierend auf den Ergebnissen der Analyse der aktuellen Wasserverlustsituation sind im nächsten Schritt die geeigneten Gegenmaßnahmen zu identifizieren, um die Verluste möglichst effizient zu reduzieren. Dabei sind u.a. die finanziellen und personellen Ressourcen der Versorgungsunternehmen sowie die technische Umsetzbarkeit der Maßnahmen zu berücksichtigen. Ein wichtiger Aspekt ist diesbezüglich die ökonomische Betrachtungsweise der Wasserverluste sowie der Gegenmaßnahmen. Dabei soll die ökonomisch optimalste Wasserverlusthöhe bestimmt werden, indem die Kosten der Wasserverluste den Kosten der entsprechenden Gegenmaßnahmen gegenüber gestellt werden. Darüber hinaus gibt es Ansätze, zusätzlich die ökologischen und sozialen Kosten von Wasserverlusten in die Berechnungen mit einzubeziehen (z.B. Umweltschäden oder Versorgungsunterbrechungen durch Wasserverluste). Diesbezüglich hat sich jedoch noch kein international bewährtes Verfahren durchgesetzt. Daher sind die folgenden Ausführungen auf die ökonomische Betrachtungsweise beschränkt.

Das Vorgehen wird am Beispiel der realen Wasserverluste erklärt, bei dem die ökonomisch optimalste Höhe der Leckagemengen (englisch: *Economic Level of Leakage, ELL*) ermittelt wird. In Abbildung 3.11 ist zunächst das Vier-Säulen-Konzept mit den vier international anerkannten Gegenmaßnahmen zur Reduktion von realen Wasserverlusten dargestellt. Die Maßnahmen sind die aktive Leckkontrolle sowie das Reparatur-, Infrastruktur- und Druckmanagement, die in Abschnitt 3.5 näher erläutert werden. Mit Hilfe einer oder mehrerer dieser Maßnahmen in Kombination soll die aktuelle jährliche Wasserverlusthöhe *CARL* auf das *ELL*-Niveau gesenkt werden. Dies wird in Abbildung 3.11 verdeutlicht, in der beide Wasserverlusthöhen als unterschiedlich große Boxen dargestellt sind. Durch die entsprechenden Maßnahmen soll nun die größere, das aktuelle Verlustniveau repräsentierende Box auf die Größe der das *ELL*-Niveau darstellenden Box zusammengedrückt werden. Da in jedem Versorgungssystem insbesondere aufgrund von Kleinstleckagen ein gewisses Maß an unvermeidbaren jährlichen Wasserverlusten *UARL* gegeben ist, werden diese als kleinste Box in der Darstellung visualisiert. Eine Reduktion der Wasserverluste auf dieses *UARL*-Niveau ist vor allem aus ökonomischer Sicht nicht rentabel.

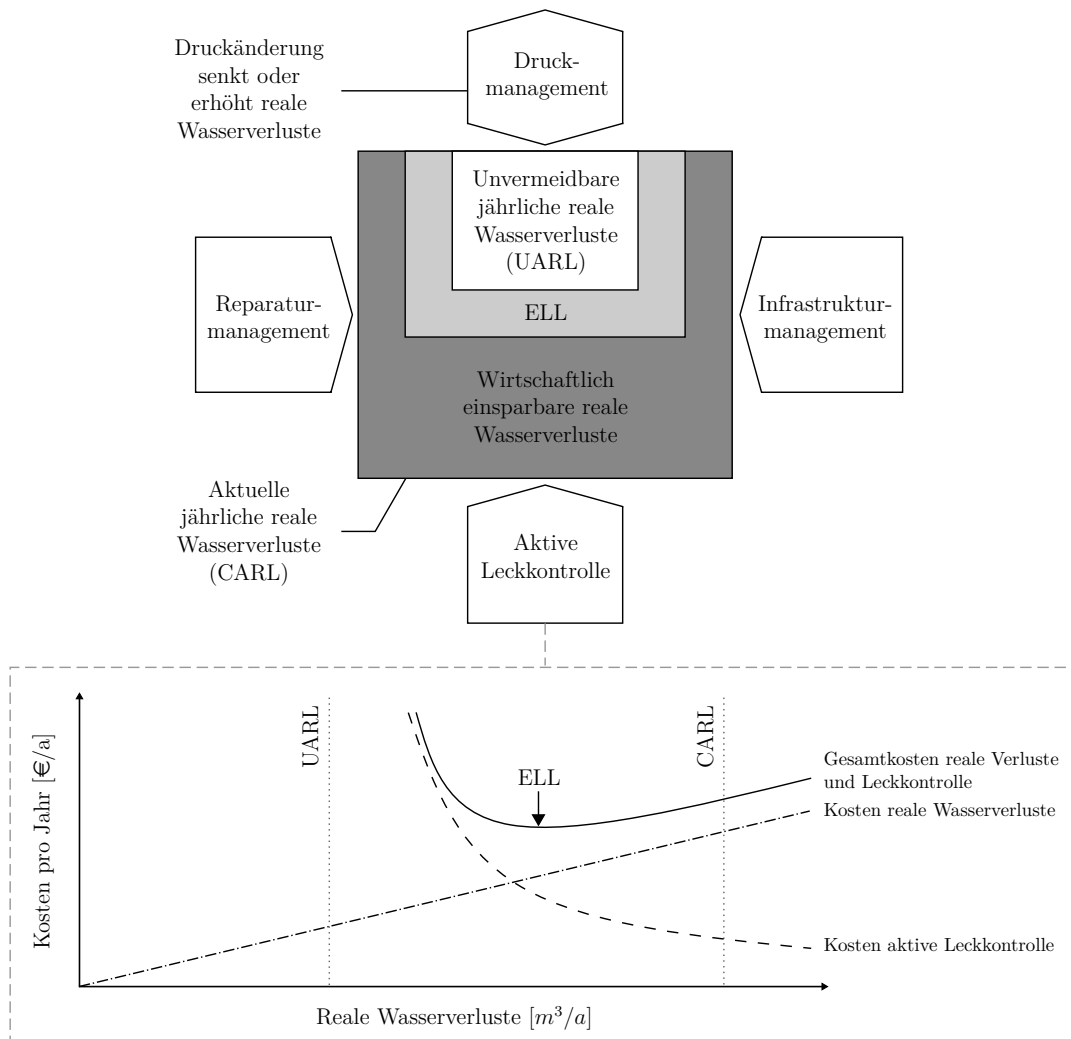


Abbildung 3.11: Bestimmung der optimalen ökonomischen Wasserverlustrhöhe (ELL) am Beispiel von aktiver Leckkontrolle nach Thornton u. a. (2008) und Knobloch (2014)

Die Bestimmung des *ELL* erfolgt anhand einer Gesamtkostenkurve. Diese ist in dem Diagramm in Abbildung 3.11 für das Beispiel der aktiven Leckkontrolle dargestellt. Die Kurve entsteht durch Überlagerung der beiden Kostenkurven der realen Wasserverluste sowie der Durchführung von regelmäßigen Leckkontrollen. Die Kostenkurve der realen Wasserverluste ist dabei idealisiert als linear dargestellt. In der Realität kann die Steigung der Kurve mit zunehmender Wasserverlustrhöhe steiler werden, da beispielsweise die Kosten für die Gewinnung von zusätzlich erforderlichen Wassermengen zur Deckung des Wasserbedarfs steigen (Thornton u. a., 2008). Der Verlauf der Kostenkurve der aktiven Leckkontrollen erklärt sich dadurch, dass die Kosten zur Erhaltung eines vergleichsweise geringen Wasserverlustniveaus sehr hoch sind und mit zunehmendem Verlustniveau stetig und signifikant abnehmen (GIZ, 2011). Der

Punkt mit den geringsten Kosten auf der kombinierten Gesamtkostenkurve stellt somit das ökonomisch optimalste Wasserverlustniveau dar. Dabei ist zu beachten, dass dieses Niveau in der Regel höher ist als das technisch mögliche Wasserverlustniveau. Die Differenz zwischen der aktuellen Wasserverlustmenge *CARL* und dem *ELL* stellt somit die aus wirtschaftlicher Sicht potentiell einsparbare Menge der jährlichen realen Wasserverluste dar.

Bezüglich der Bestimmung des *ELL* bei einer Kombination von mehreren Gegenmaßnahmen ist zu beachten, dass diese sich gegenseitig beeinflussen. Beispielsweise reduziert das Druckmanagement die Leckraten bestehender Leckagen, was wiederum die Rentabilität von anschließend durchgeführten Infrastrukturmanagement-Maßnahmen wie die Rehabilitation von Leitungen verringert (Thornton u. a., 2008). Grundsätzlich gilt, dass zu Beginn der Einführung eines kontinuierlichen Wasserverlustmanagements die Rentabilität von Verlustreduktionsmaßnahmen hoch ist und mit abnehmender Wasserverlusthöhe diese Rentabilität abnimmt. Daher ist die Ermittlung des *EEL* ein iterativer Prozess mit sich ändernden Kostenfunktionen.

Für die Entwicklung der Strategie zur effektiven Verlustreduktion wird empfohlen, dass die Versorgungsunternehmen Zielwerte bezüglich der angestrebten Verlusthöhe im betrachteten Leitungssystem formulieren. Dazu können die in Abschnitt 3.4.5 vorgestellten Kennzahlen genutzt werden, beispielsweise die *Realen Verluste je Anschlussleitung (Op27)*. Da die Versorgungszonen eines Versorgungssystems in der Regel unterschiedliche Wasserverlusthöhen aufweisen, sollte für jede der Zonen ein individueller Zielwert festgelegt werden. Anhand dieser Zielwerte kann dann der Fortschritt des Prozesses der Verlustreduktion überwacht werden, bei dem üblicherweise kurzfristig angestrebte Zielwerte sowie der langfristig zu erreichende Zielwert der Verlusthöhe formuliert werden (GIZ, 2011).

Der beschriebene Ansatz lässt sich auch auf die scheinbaren Verluste anwenden. In Abbildung 3.12 sind die vier etablierten Gegenmaßnahmen zur Reduktion dieser Verluste dargestellt. Diese werden in Abschnitt 3.5 näher erläutert. Im Unterschied zu den realen Verlusten, bei denen alle vier Maßnahmen Einfluss auf die Häufigkeit, Leckrate und Laufzeit der Leckagen haben, bezieht sich jede der vier Maßnahmen zur scheinbaren Verlustreduktion auf eine Ursache dieser Verluste. Daher ist die ökonomisch optimalste Höhe der scheinbaren Wasserverlustmenge (englisch: *Economic Level of Apparent Losses, ELAL*) jeweils separat für jede der Maßnahmen zu ermitteln, da bisher kein etablierter Ansatz für ein einzelnes, zusammenfassendes *ELAL* existiert (Thornton u. a., 2008). Ein weiterer Nachteil ist, dass im Fall der scheinbaren Verluste die Schaffung der erforderlichen Datengrundlage für die Erstellung der Kostenfunktionen sehr komplex und mit enormen Aufwand verbunden ist. Daher existieren oftmals nur Referenz- oder Schätzwerte. Beispielsweise gibt es zur Abschätzung der unvermeidbaren jährlichen scheinbaren Wasserverlustmenge (englisch: *Unavoidable Annual Apparent Losses, UAAL*) bisher lediglich einen prozentualen Referenzwert (*RAAL*, siehe Abschnitt 3.4.5.3) .

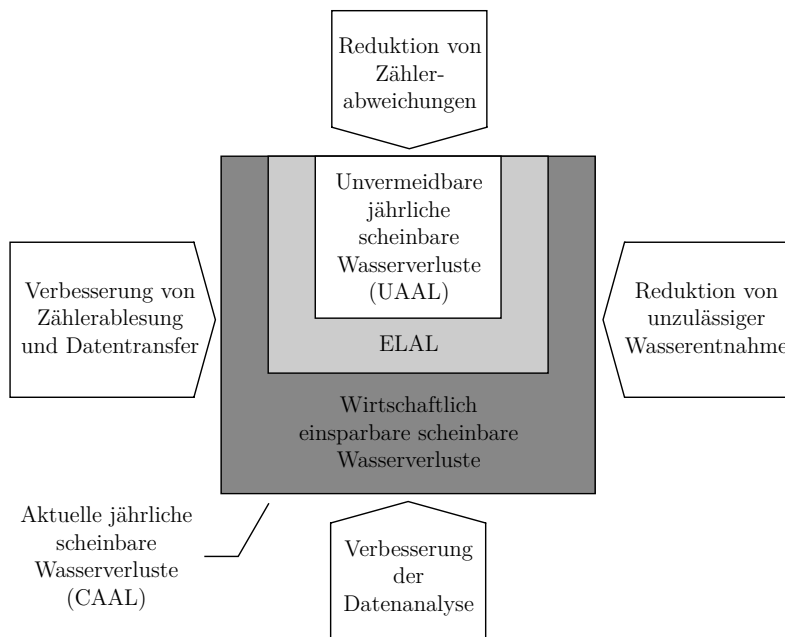


Abbildung 3.12: Vier-Säulen-Konzept der Gegenmaßnahmen zur scheinbaren Wasserverlustreduktion nach Knobloch (2014)

3.5 Gegenmaßnahmen zur Wasserverlustreduktion

3.5.1 Allgemeines

Da in jedem Versorgungssystem unterschiedliche Faktoren die Höhe der realen und scheinbaren Verluste beeinflussen, müssen diese Faktoren zunächst eindeutig identifiziert werden. Anschließend ist jeweils individuell zu entscheiden, ob eine oder die Kombination von mehreren Gegenmaßnahmen zur effektiven und wirtschaftlichen Wasserverlustreduktion erforderlich ist. In Systemen mit kontinuierlicher Versorgung spielen beispielsweise die scheinbaren Wasserverluste in der Regel eine untergeordnete Rolle gegenüber den realen Verlusten. In Entwicklungs- und Schwellenländern dagegen machen die scheinbaren Verluste oftmals einen signifikanten Teil der Wasserverluste aus, insbesondere in intermittierend betriebenen Systemen mit privaten Speichertanks im Kundenbereich sowie geringem Anteil an ordnungsgemäß funktionierenden Kundenwasserzählern (Mutikanga, 2012). In den beiden folgenden Abschnitten werden die jeweils vier international etablierten Gegenmaßnahmen zur Reduktion realer und scheinbarer Wasserverluste kurz vorgestellt. Ausführliche Beschreibungen finden sich bezüglich der realen Wasserverlustreduktion beispielsweise in Thornton u. a. (2008) und bezüglich der scheinbaren Wasserverlustreduktion in AWWA (2009) oder Vermersch u. a. (2016).

3.5.2 Reale Wasserverlustreduktion

3.5.2.1 Aktive Leckkontrolle

Die aktive Leckkontrolle dient der möglichst raschen Kenntnisnahme und Ortung von Leckagen im Leitungsnetz, um deren Laufzeiten so gering wie möglich zu halten. Kenntnisnahme und Ortung können durch regelmäßige Inspektion des Leitungsnetzes oder die kontinuierliche Messung und Analyse der relevanten Parameter Durchfluss, Druck und Geräuschpegel erfolgen. Grundsätzlich wird zur Verbesserung der Effektivität der aktiven Leckkontrolle die Unterteilung des Netzes in möglichst kleinräumige, hydraulisch voneinander isolierte Messzonen mit definierten Einspeisepunkten empfohlen. Dadurch können Leckagen schneller erkannt und geortet sowie Zonen mit hohen Wasserverlusten priorisiert werden. Die Effektivität der Leckkontrolle hängt darüber hinaus von der verfügbaren technischen Ausrüstung sowie der Erfahrung des eingesetzten Personals in der Leckortung ab (GIZ, 2011).

Im Rahmen der Inspektionen werden sichtbare Leckagen visuell und versteckte Leckagen mit entsprechenden Ortungsverfahren entdeckt. Bei elektro-akustischen Verfahren kommen Geräte wie Bodenmikrofon oder Geräuschlogger zum Einsatz. Werden zwei Geräuschlogger jeweils am Anfang und Ende eines Leitungsabschnitts am Rohr selbst oder an Armaturen montiert, empfangen diese im Falle einer Leckage ein akustisches Signal. Dieses wird durch das aus einer Leckage ausströmende Wasser verursacht. Durch Korrelation wird die Laufzeitdifferenz des Signals zwischen beiden Loggern ermittelt, wodurch auf die Entfernung der Leckage von den Installationsorten der Logger geschlossen werden (Thornton u. a., 2008).

Ist das von Leckagen ausgesandte Signal für eine signifikante Geräuschemission zu schwach, kommen nicht-akustischen Verfahren zur Anwendung. Dazu zählen der sogenannte *Step Test* sowie der Einsatz von Tracer-Gas oder eines Bodenradars (Thornton u. a., 2008). Bei einem *Step Test* werden in einer Messzone, deren Zufluss mittels eines Durchflussmessgeräts kontinuierlich gemessen und aufgezeichnet wird, sukzessive Leitungsabschnitte in den verbrauchsarmen Nachtstunden über Schieber von der Messzone getrennt. Eine signifikante Absenkung des gemessenen Durchflusses deutet dann auf eine Leckage in dem gerade geschlossenen Leitungsabschnitt hin. Im Nachgang dieses Verfahrens müssen zur genauen Lokalisation der Leckagen Verfahren wie das akustische Bodenmikrofon eingesetzt werden. Der Einsatz von Tracer-Gas erfordert die temporäre Isolation eines Leitungsabschnitts, um dort ein Gasgemisch einzubringen. Tritt das Gas aus einer Leckage aus und erreicht die Oberfläche, wird dies mittels eines hochsensiblen Gasdetektors erfasst. Das Bodenradar sendet elektromagnetische Wellen aus. Diese werden u.a. von Unregelmäßigkeiten im umgebenden Boden, die von Leckagen hervorgerufen werden, reflektiert und aufgezeichnet (Eyuboglu und Al-Shukti, 2003). Die genannten nicht-akustischen Verfahren eignen sich insbesondere in Systemen mit sehr niedrigem Versorgungsdruck und intermittierend betriebenen Systemen. Nachteil dieser Verfahren ist, dass sie wie im Fall des Tracer-Gases speziell ausgebildetes Personal erfordern und in der Regel mit hohem Aufwand verbunden sind (GIZ, 2011).

3.5.2.2 Reparaturmanagement

Das Reparaturmanagement steht wie die aktive Leckkontrolle in direktem Zusammenhang mit der Laufzeit von Leckagen. Nach der Ortung sollte die Laufzeit durch eine möglichst unverzügliche Reparatur so kurz wie möglich gehalten werden. Neben der Geschwindigkeit spielt auch die Qualität der durchgeführten Reparaturen eine wichtige Rolle. Werden die Reparaturen nicht sachgemäß durchgeführt, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass an der reparierten Leckagestelle wieder ein Schaden entsteht (Trow und Farley, 2004).

Geschwindigkeit und Qualität der Reparaturen hängen u.a. von der Verfügbarkeit von geschultem Personal und deren technischer Ausrüstung sowie von der Effizienz der organisatorischen und betrieblichen Ablaufprozesse innerhalb eines Versorgungsunternehmens ab. Prozessbeteiligte sind neben dem die Reparaturen ausführenden Personal in der Regel der Kundenservice, der über Leckagen im Kundenbereich informiert wird, die Leitstelle, die die Anweisung zur Reparatur gibt sowie die Lagerverwaltung, die das Reparaturmaterial lagert und bei Bedarf nachordert (GIZ, 2011).

3.5.2.3 Druckmanagement

Wie in Abschnitt 3.2.1 erläutert, hängt die Leckrate von bestehenden Leckagen in erheblichem Maße vom anstehenden Versorgungsdruck ab. Des Weiteren steigt mit zunehmendem Druck auch die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von neuen Leckagen. Nichtsdestotrotz wird in vielen Versorgungssystemen weltweit vor allem auf die Einhaltung eines Mindestversorgungsdrucks und weniger auf die Vermeidung von unnötig hohen Drücken geachtet. Ziel des Druckmanagements ist daher, den Versorgungsdruck auf ein optimales Niveau zu reduzieren. Dabei soll einerseits der erforderliche Druck zur ausreichenden Versorgung der Kunden gewährleistet und andererseits die Leckrate bestehender sowie die Eintrittswahrscheinlichkeit neuer Leckagen reduziert werden (GIZ, 2011).

Für die effiziente Anwendung des Druckmanagements wird zunächst die Einrichtung von Druckzonen empfohlen. In diesen kann dann je nach gegebenen Randbedingungen (z.B. Topographie) der jeweilige Versorgungsdruck auf ein Optimum reduziert werden. Dazu werden in der Regel Druckreduzierventile an den Zuflussleitungen in die Zonen installiert. Die Ventile stellen sicher, dass unabhängig vom Eingangsdruck des Ventils der Ausgangsdruck einen bestimmten Wert nicht übersteigen kann. Gängige Ausführungsformen sind Membran- oder Ringkolbenventile (GIZ, 2011).

Das Druckmanagement gilt als eine der effektivsten Maßnahmen, da dadurch grundsätzlich die Leckrate aller bestehenden Leckagen im Versorgungsgebiet verringert wird. Dies gilt insbesondere auch für Kleinstleckagen, die in der Regel nicht wirtschaftlich detektiert und repariert werden können und somit eine hohe Laufzeit aufweisen. Außerdem wird durch die Verringerung und Dämpfung von hohen

Druckschwankungen im Versorgungssystem die Lebensdauer der Anlagenkomponenten verlängert (Trow und Farley, 2004).

3.5.2.4 Infrastrukturmanagement

Der Fokus eines nachhaltigen Infrastrukturmanagements liegt auf der Sicherstellung einer möglichst langen Lebensdauer sowie dem Erhalt der Integrität und Funktionalität aller Anlagenkomponenten eines Versorgungssystems. Zur Gewährleistung eines niedrigen Wasserverlustniveaus ist daher die zielgerichtete Instandsetzung mit einer langfristigen und proaktiven Rehabilitationsplanung und -umsetzung ein Schlüsselfaktor. So sind beispielsweise bei der Planung von Leitungserneuerungen oder -rehabilitationen die aktuellen Schadensraten sowie die Prognosen zur zukünftigen Zustandsentwicklung von Rohrleitungen unterschiedlicher Materialgruppen zu berücksichtigen. Dabei sollten Leitungsabschnitte mit hoher Schadensrate und somit hohen Wasserverlustmengen durch Leckagen priorisiert werden (Trow und Farley, 2004).

Von entscheidender Bedeutung für das Infrastrukturmanagement ist die Verfügbarkeit der erforderlichen Datengrundlage. Diese umfasst u.a. Daten zu Lage, Alter und Material der Anlagenkomponenten, Schadensstatistiken und Reparaturdokumentationen, Betriebsdaten wie Versorgungsdrücke und Durchflussmengen sowie Vermögenswerte der Anlagenkomponenten (GIZ, 2011).

3.5.3 Scheinbare Wasserverlustreduktion

3.5.3.1 Reduktion von Zählerabweichungen

Zur Reduktion der scheinbaren Wasserverluste durch Zählerabweichungen sollte die Unterregistrierung der eingesetzten Zähler zur Messung der Systemeinspeisung und Netzabgabe minimiert werden. Dazu sollten die Zähler stichprobenartig in regelmäßigen Intervallen auf ihre Funktionalität sowie die Messung innerhalb der zulässigen Fehlergrenzen im Prüfstand evaluiert werden. Basierend auf den Untersuchungsergebnissen kann dann eine effiziente und wirtschaftlich optimierte Strategie für den turnusmäßigen Zähleraustausch ausgearbeitet und umgesetzt werden. Nicht mehr ordnungsgemäß funktionierende Zähler sollten umgehend ausgetauscht werden. Darüber hinaus sollten die Zähler hinsichtlich dem ordnungsgemäßen Einbau und der korrekten Dimensionierung überprüft werden, da diese Faktoren ebenfalls die Messgenauigkeit und die Langlebigkeit der Zähler beeinflussen. Bei der Dimensionierung ist darauf zu achten, dass diese entsprechend den vorherrschenden Durchflussverhältnissen in den entsprechenden Leitungen erfolgt ist (AWWA, 2009).

In intermittierenden Versorgungssystemen mit privaten Speichertanks im Kundenbereich kann es aufgrund der geringen, von den eingesetzten Zählern meist nicht registrierten Durchflüssen zu erheblichen scheinbaren Wasserverlusten kommen (siehe Abschnitt 3.2.2). Eine technische Möglichkeit stellen diesbezüglich Einbauten zur Reduktion ungemessener Wassermengen (englisch: *Unmeasured Flow Reducer*,

UFR) dar, die durch Druckdifferenz gesteuert das Wasser chargenweise durch den Zähler leiten. Dadurch soll sichergestellt werden, dass der Durchfluss stets über dem Mindestdurchfluss des Zählers liegt (Fantozzi, 2009). Allerdings ist, insbesondere in Entwicklungsländern, die Wirtschaftlichkeit eines flächendeckenden Einsatzes von *UFR* in intermittierend betriebenen Systemen fraglich.

3.5.3.2 Verbesserung von Zählerablesung und Datentransfer

Im Ablaufprozess von der Zählerablesung bis zur Speicherung der Daten in den entsprechenden Datenbanken des Versorgungsunternehmens können Fehler zu scheinbaren Wasserverlusten führen. Beispielsweise können fehlerhafte Ablesungen, der Verlust von Ablesedaten oder Fehler bei der Zuordnung der Daten zu einer fehlerbehafteten Kundenabrechnung und somit einer zu geringen in Rechnung gestellten Wassermenge führen. Daher sollten für den gesamten Ablaufprozess gewisse Qualitätsstandards sowie Prozesse zur Überwachung der korrekten Datenerfassung eingeführt werden. Dabei können Fließschemata helfen, Schwachstellen in den Abläufen zu identifizieren (AWWA, 2009).

Zur Vermeidung von Ablesefehlern sollte zunächst sichergestellt werden, dass die Kundenwasserzähler leicht und wenn möglich auch ohne Anwesenheit des Kunden zugänglich ist. Dadurch soll die Quote der nicht ablesbaren Zähler, deren Verbrauch geschätzt werden müsste, minimiert werden. Der Ableseprozess selbst kann durch automatisierte Zählerfernablesesysteme (englisch: *Automatic Meter Reading, AMR*) verbessert und beschleunigt werden. Bei dem Prozess des Datentransfers und der Datenspeicherung sollten die abgelesenen Zählerdaten auf Plausibilität und Vollständigkeit überprüft werden. Die Plausibilitätsprüfung kann durch Abgleich mit den vorangegangenen Ablesedaten der jeweiligen Kunden erfolgen. Nicht abgelesene Kundenzähler sollten identifiziert und die Ablesung zeitnah nachgeholt werden (Vermersch u. a., 2016).

3.5.3.3 Verbesserung der Datenanalyse

Bei der Datenanalyse sollten Abgrenzungsfehler vermieden und die Daten der Netzeinspeisung und Netzabgabe hinsichtlich ihrer Genauigkeit geprüft werden. Dazu sollten alle Daten auf einen einheitlichen Betrachtungszeitraum umgerechnet werden. Werden die Daten der Kundenabrechnung zur Bestimmung der Netzabgabe verwendet, ist darauf zu achten, dass diese den tatsächlich gemessenen Abgaben entsprechen. So kann beispielsweise der in der Kundendatenbank gelistete Wert der Netzabgabe aufgrund von gewährten Rabatten manipuliert sein (AWWA, 2009). Zudem sind die bei Kunden ohne Zählermessung angegebenen Werte hinsichtlich ihrer Plausibilität zu prüfen. Oftmals wird hierbei der durchschnittliche Verbrauch der gemessenen Kunden angesetzt. Dies kann bei volumenabhängigen Tarifen jedoch zu einer Unterschätzung der ungemessenen Netzabgabe führen, da bei ungemessenen Kunden kein finanzieller Anreiz zum Wassersparen besteht und somit deren

Verbrauch deutlich höher als bei gemessenen Kunden liegen kann (Vermersch u. a., 2016).

3.5.3.4 Reduktion von unzulässiger Wasserentnahme

Die Reduktion von unzulässigen Wasserentnahmen erfordert deren Detektion und die Durchsetzung von entsprechenden Maßnahmen wie beispielsweise der Außerbetriebnahme der entsprechenden Anschlussleitungen und dem Verhängen von Bußgeldern. Für die Detektion bietet sich zunächst die Analyse der Kundendatenbank an, um anschließend die Situation bei verdächtigen Kunden vor Ort zu überprüfen. Beispielsweise deutet bei registrierten Hausanschlüssen die mehrmalige Messung von sehr wenig bis gar keinem Verbrauch in permanent bewohnten Häusern auf einen möglichen Wasserdiebstahl hin. Bezüglich nicht registrierter Anschlüsse kann ein Abgleich mit Adress- und Verbrauchsdaten von Strom- oder Gasversorgern Aufschluss über Kunden mit unzulässiger Wasserentnahme aus dem Leitungsnetz geben. Im Anschluss an die Auswertungen sollten dann Felduntersuchungen zum Auffinden von unzulässigen Wasserentnahmestellen erfolgen. Ein weiterer Ansatz kann die Einführung eines Amnestieprogramms für die freiwillige Meldung von unzulässiger Wasserentnahme und der anschließenden Registrierung als Kunde sein (AWWA, 2009).

Grundsätzlich sollte auch die Motivation der Kunden mit unzulässiger Wasserentnahme eruiert werden. Ist beispielsweise der aktuell gültige Wassertarif für diese Kunden nicht bezahlbar, sollte über eine Anpassung des Tarifs diskutiert werden (Carteado und Vermersch, 2016).

4 Intermittierende Wasserverteilung am Fallbeispiel Tiruvannamalai

4.1 Überblick

In diesem Kapitel werden die typischen Randbedingungen sowie die Auswirkungen und Ursachen eines intermittierend betriebenen Wasserverteilungssystems erläutert. Die Ausführungen erfolgen am Beispiel der indischen Stadt Tiruvannamalai, in der das *WaLUE*-Verbundvorhaben und die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methodik der angepassten Wasserverlustbilanzierung umgesetzt wurden. In Abschnitt 4.2 wird zunächst die Stadt Tiruvannamalai vorgestellt. Anschließend erfolgt in Abschnitt 4.3 die Beschreibung des Wasserversorgungssystems von der Gewinnung bis zu den Hausanschlüssen der Verbraucher. In den Abschnitten 4.4 und 4.5 werden die Organisation des technischen Betriebs der Wasserversorgung sowie die Umsetzung der intermittierenden Betriebsweise und deren Auswirkung auf das Verbraucherverhalten der Kunden beschrieben. Anschließend erfolgt eine Darstellung der Ursachen und Auswirkungen einer intermittierenden Wasserverteilung in Abschnitt 4.6, wobei am Fallbeispiel Tiruvannamalai auf deren kausalen Zusammenhänge eingegangen wird. Angesichts der weltweiten Verbreitung der intermittierenden Wasserverteilung stellt Abschnitt 4.7 abschließend den Bedarf angepasster Lösungen, beispielsweise im Bereich des Wasserverlustmanagements, zur Minimierung der negativen Auswirkungen auf die Verbraucher dar.

4.2 Projektstadt Tiruvannamalai

4.2.1 Geografische Einordnung

Die Stadt Tiruvannamalai liegt im südindischen Bundesstaat Tamil Nadu, etwa 200 Kilometer südwestlich von Chennai. Die Stadt befindet sich unmittelbar östlich des Annamalai Berges (ca. 814 müNN), einem Ausläufer der an Indiens Ostküste verlaufenden Gebirgskette Eastern Ghats. Die Topographie des Stadtgebiets, das insgesamt eine Fläche von ca. 13,64 km² umfasst, ist relativ flach. Der höchste Punkt liegt im Westen an den Ausläufen des Annamalai Berges auf ca. 230 müNN, der tiefste Punkt im östlichsten Teil der Stadt auf ca. 160 müNN. Das vorherrschende tropische Savannenklima bringt ganzjährig relativ hohe Temperaturen und trockene Luft mit sich. Die Temperaturen reichen von ca. 19 Grad Celsius in den Wintermonaten bis 45 Grad Celsius in den Sommermonaten. Wintermonate sind Dezember bis

Februar, während April bis Juli zu den Sommermonaten gezählt werden. Die Höhe der jährlichen Niederschläge wird im Wesentlichen vom Nordost-Monsun (Oktober bis Dezember) und Südwestmonsun (Juni bis September) und deren Ausprägung beeinflusst. Die durchschnittliche Niederschlagsmenge der letzten zehn Jahre betrug ca. 1040 mm pro Jahr (Bal u. a., 2015; GOTN, 2017).

Tiruvannamalai ist eine der bedeutendsten Tempelstädte Tamil Nadus. Die Tempelanlage Arunachaleswarar liegt im Stadtzentrum und ist, ebenso wie der als heilig geltende Annamalai Hügel, jedes Jahr das Ziel Hunderttausender Pilger. Größere Einrichtungen sind zwei Krankenhäuser, zahlreiche Schulen sowie eine staatliche Kunsthochschule. In der Stadt gibt es keine nennenswerte Industrie. Die Ökonomie der Stadt basiert vornehmlich auf Handels- und Gewerbeaktivitäten. Vor allem rund um die Tempelanlage im Stadtzentrum haben sich unzählige Kleinstgewerbe angesiedelt. Eine bedeutende Einnahmequelle der Stadt sind die Pilger und Touristen aus dem In- und Ausland, welche die Stadt neben dem heiligen Tempel und Berg vor allem wegen des im Südwesten der Stadt gelegenen Ashram, einem großen spirituellen Begegnungszentrum, besuchen (Anna University, 2006).

4.2.2 Demografie

Nach Angaben des jüngsten Zensus aus dem Jahr 2011 hat die Stadt Tiruvannamalai ca. 145.300 Einwohner (GOI, 2011). Historisch betrachtet hat sich die Einwohnerzahl in einem Jahrhundert von 1901 bis 2011 mehr als verachtfacht, mit dekadischen Wachstumsraten zwischen 3 und 46 % (Anna University, 2006). Abbildung 4.1 zeigt die historische Entwicklung der stark wachsenden Bevölkerung sowie die Prognose für die Jahre 2025 und 2040 unter Berücksichtigung der jüngsten Wachstumsrate von ca. 11 % (2001 bis 2011). Die Bevölkerungsdichte Tiruvannamalais ist sehr hoch und ergibt sich nach Abzug der unbebauten Stadtflächen am Annamalai Berg von der Gesamtfläche zu ca. 16.200 Einwohnern pro km^2 .

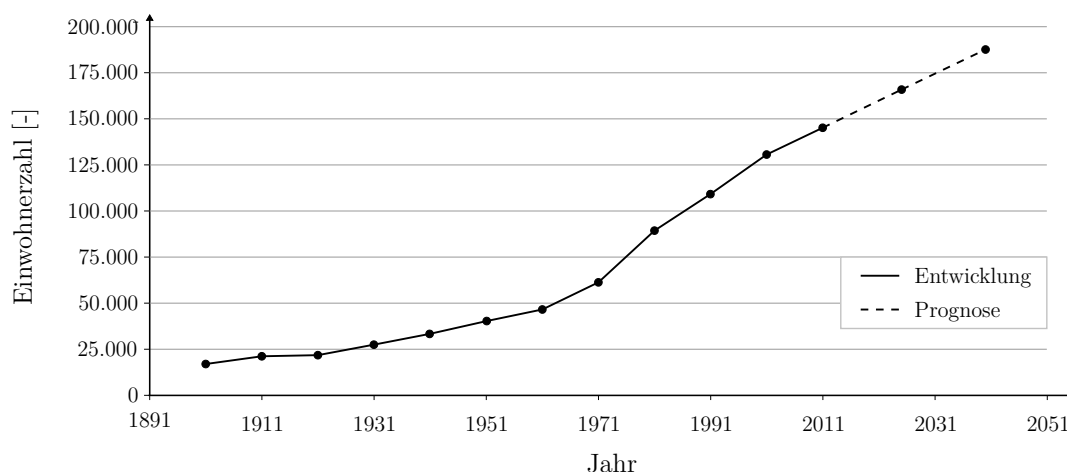


Abbildung 4.1: Bevölkerungsentwicklung und -prognose in Tiruvannamalai (Anna University, 2006)

4.3 Wasserversorgungssystem Tiruvannamalai

Das bestehende Wasserversorgungssystem wurde im Zeitraum 2011 bis 2013 durch entsprechende Infrastrukturmaßnahmen erweitert und teilweise umstrukturiert. Ziel war dabei einerseits die Deckung des gestiegenen Wasserbedarfs der aktuellen sowie zukünftig prognostizierten Bevölkerung und andererseits die Verbesserung der Versorgungsqualität hinsichtlich der Versorgungsdauer und dem Versorgungsdruck. Die bedeutendsten Infrastrukturmaßnahmen umfassten eine signifikante Erhöhung der Wassergewinnungs- und Aufbereitungskapazitäten, den Bau einer zusätzlichen Zubringerleitung und Pumpstation im Stadtgebiet sowie die Errichtung von drei zusätzlichen Wassertürmen. Durch Umstrukturierungsmaßnahmen wurden die bestehenden sechs Versorgungszonen in insgesamt elf Zonen mit jeweils einem Hochbehälter bzw. Wasserturm unterteilt. Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten des Versorgungssystems dargestellt.

Wassergewinnung und -aufbereitung: Die Wassergewinnung erfolgt aus zwei Bezugsquellen. Als Hauptgewinnung dient das Oberflächenwasser des Flusses Then-Pennaiyar, der ca. 23 km südwestlich der Stadt verläuft und an der Entnahmestelle durch einen Damm aufgestaut wird. Das Flusswasser wird nahe der Gewinnung durch Flockung und Sedimentation sowie anschließende Filtration unter Zugabe von Aluminium-Sulfat und Chlor aufbereitet. Mit dem aufbereiteten Wasser werden drei parallele Zubringersysteme gespeist, die das Wasser zu den Pumpstationen im Stadtgebiet transportieren. Als zweite Gewinnung dienen zwei Schacht- und sieben Bohrbrunnen nahe dem See Samudram Eri, der am südwestlichen Rand der Stadt liegt und während der Regenzeit Wasser führt. Von der Gewinnung wird das Rohwasser unaufbereitet von der Pumpstation Samudram Eri zum einen direkt in die unmittelbar angrenzende Versorgungszone eingespeist und zum anderen in einen Wasserturm im Stadtgebiet zur Weiterverteilung gefördert (SPT, 2010). Zum Ende des *WaLUE*-Projekts wurde mit dem Bau eines Wasserturms in der angrenzenden Versorgungszone begonnen, um zukünftig auch dort die Wasserförderung von der Wasserverteilung hydraulisch zu trennen.

Pumpstationen, Speicherbehälter und Versorgungszonen: Im Stadtgebiet wird das Wasser von den drei zentralen Pumpstationen Anna Nagar (1995 Scheme), Anna Nagar (2013 Scheme) und Somavarakulam zu den jeweiligen Hochbehältern und Wassertürmen in den Versorgungszonen gefördert. Von dort erfolgt die gravitäre und intermittierende Versorgung der Haushalte in den Zonen. An den Hängen des Annamalai Berges im Westen der Stadt wird dabei das natürliche Gefälle zur Versorgung über Hochbehälter genutzt. Im restlichen Stadtgebiet wurden Wassertürme mit mittleren Wasserspiegellagen zwischen 10 bis 12 m über Geländehöhe errichtet. Abbildung 4.2 gibt einen Überblick über die Lage der Versorgungszonen sowie der Pumpstationen und Behälter im Stadtgebiet.

4 Intermittierende Wasserverteilung am Fallbeispiel Tiruvannamalai

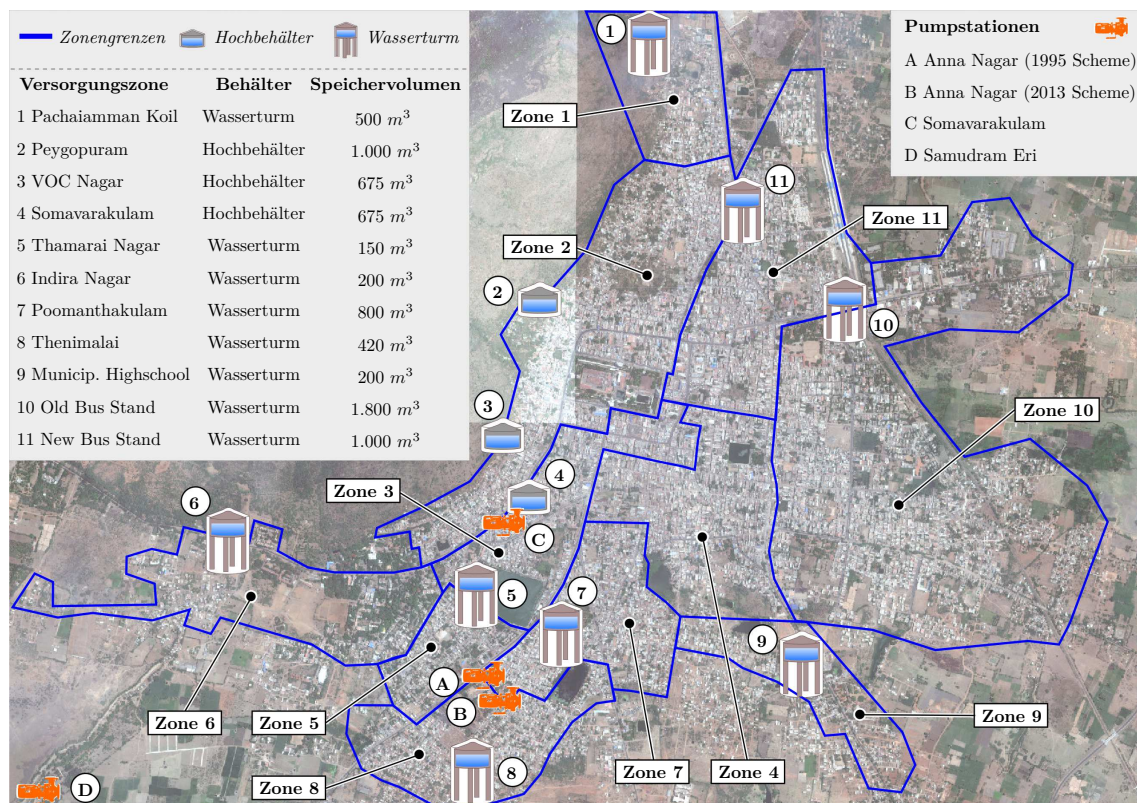


Abbildung 4.2: Versorgungszone sowie Lage der Pumpstationen und Speicherbehälter in Tiruvannamalai

Leitungsnetz: Das Leitungsnetz des Wasserverteilungssystems besaß vor den Erweiterungsmaßnahmen eine Gesamtlänge von ca. 96 km. Davon waren 67 km aus PVC, 10 km aus Asbestzement und 19 km aus Gusseisen, mit Durchmessern zwischen DN80 und DN400. Laut Planung war im Rahmen der Verbesserungsmaßnahmen die Erweiterung und teilweise Erneuerung des Leitungsnetzes geplant (SPT, 2010). Allerdings existieren keine Dokumentationen über tatsächlich erfolgte Maßnahmen und somit auch keine aktuellen Bestandspläne. Dies ist nach Angaben der Stadtverwaltung Tiruvannamalai auf die Tatsache zurückzuführen, dass in der Vergangenheit verschiedene externe Baufirmen mit der Anpassung und Erweiterung des Leitungsnetzes beauftragt wurden und es keine übergeordnete und nachhaltige Dokumentation auf Seiten der Stadtverwaltung gab.

Hausanschlüsse: Insgesamt waren nach Angaben der Stadtverwaltung Tiruvannamalai (2013a) zu Beginn des *WaLUE*-Projekts ca. 16.940 Hausanschlüsse registriert, davon 16.760 private und 180 gewerbliche Anschlüsse (Stand Dezember 2013). Laut dem Zensus aus dem Jahr 2011 umfasste das Stadtgebiet Tiruvannamalais insgesamt 34.380 Grundstücke (GOI, 2011). Auch wenn nicht bekannt ist, ob alle Grundstücke bewohnt und wie die Besitzverhältnisse waren, lässt sich anhand der Zahlen eine vergleichsweise geringe Anschlussrate erkennen. Die meisten angeschlos-

senen Haushalte speichern das Wasser aufgrund der intermittierenden Versorgung in einem oder mehreren privaten Speichertanks (siehe Abschnitt 4.4.2).

4.4 Technischer Betrieb der Wasserversorgung

4.4.1 Organisation

Für den Betrieb der Wasserversorgung ist die Stadtverwaltung Tiruvannamalai zuständig. Größere Umbau- oder Erweiterungsmaßnahmen werden zunächst unter Leitung der bundesstaatlichen Behörde TWAD (englisch: *Tamil Nadu Water Supply and Drainage*) Board durchgeführt. Nach Abschluss der Arbeiten ist dann wiederum die Stadtverwaltung für den Betrieb der Anlagenkomponenten zuständig.

Innerhalb der Stadtverwaltung ist der Betrieb der Wasserversorgungsanlagen Aufgabe der Ingenieursabteilung (*Engineering Section*), die zusätzlich auch für das Straßennetz, die Stromversorgung und das Abwassersystem zuständig ist. Die Abteilung besteht auf Führungsebene aus einem leitenden Ingenieur (*Municipal Engineer*) und seinen beiden assistierenden Ingenieuren (*Assistant Engineer*). Das ausführende Personal besteht aus zahlreichen Bedienpersonen (*Operators*), welche die Anlagenkomponenten bedienen. Darüber hinaus ist weiteres Personal wie Elektriker, Mechaniker oder Tankwagenfahrer in der technischen Abteilung der Stadtverwaltung angestellt.

Instandhaltungsarbeiten werden von einer lokalen Baufirma im Auftrag der Stadtverwaltung durchgeführt. Nach eigenen Angaben ist die Firma täglich mit einem Team von ca. 15 bis 20 Arbeitern im Einsatz. Die Arbeiten erfolgen jedoch nur im Fall von offensichtlichen Schäden oder Funktionsuntüchtigkeiten von Anlagenkomponenten. Personal und Geräte für eine aktive Leckkontrolle sind nicht vorhanden. Bei einer sichtbaren Leckage wird im Regelfall der *Operator* der betroffenen Versorgungszone von den Bewohnern informiert. Dieser meldet den Vorfall einem der beiden *Assistant Engineers* der Stadtverwaltung, der daraufhin die Baufirma kontaktiert und diese mit der Behebung des Schadens beauftragt. Nach Beendigung der Arbeiten werden die Arbeiten vom *Assistant Engineer* überprüft und der Aufwand und Arbeitseinsatz (Arbeitskräfte, Geräte, Aushubarbeiten, Material, etc.). Die Dokumentation wird dann in der Ingenieursabteilung der Stadtverwaltung archiviert, jedoch für keine Zustandsdokumentation und -analysen verwendet.

4.4.2 Intermittierende Betriebsweise

Die Wasserverteilung in Tiruvannamalai ist intermittierend, d.h. die Leitungsnetze in den einzelnen Versorgungszonen werden nur zeitweise mit Wasser beschickt. Je nach Größe der Zonen werden entweder das gesamte Gebiet zur gleichen Zeit oder hydraulisch isolierte Subzonen alternierend versorgt. Die Versorgung erfolgt über die Hochbehälter und Wassertürme in den jeweiligen Zonen, die täglich mit Wasser von den Pumpstationen befüllt werden. Die Pumpanlagen im Stadtgebiet werden in der Regel kontinuierlich betrieben und befüllen jeweils mehrere Behälter.

Die intermittierende Versorgung der jeweiligen Zonen erfolgt durch Öffnen der Absperrschieber an den Ausflussleitungen der Behälter. Wie auch bei der Behälterfüllung soll laut Stadtverwaltung die Einspeisung in die Zone zu festgelegten Zeiten erfolgen. Während den Felderhebungen vor Ort wurden jedoch zum Teil erhebliche Abweichungen vom Zeitplan bzw. keine einheitlichen Versorgungsschemata und somit eine eher intuitive Betriebsweise festgestellt.

Als Reaktion auf die intermittierende Versorgung haben nahezu alle an die öffentliche Wasserversorgung angeschlossenen Haushalte private Speichertanks installiert. Ziel ist dabei die Speicherung der zeitlich limitiert abgegebenen Wassermengen, um möglichst rund um die Uhr Wasser im Privatbereich zur Verfügung zu haben. Die Ausführungen der privaten Wasserspeicherung im Stadtgebiet können in vier typische Konfigurationen, die in der intermittierenden Versorgung angewandt werden, unterschieden werden. Diese sind in Abbildung 4.3 schematisch dargestellt. Das Wasser wird meist in Tanks auf den Hausdächern gespeichert, um von dort die gravitäre Versorgung des Haushalts zu ermöglichen. Je nach anstehendem Versorgungsdruck kann das Wasser aus dem öffentlichen Leitungsnetz direkt in die Dachtanks fließen (Konfiguration 1) oder muss in diese über externe Pumpen gefördert werden. In letzterem Fall wird weiter unterschieden in die direkte Förderung aus dem Leitungsnetz (Konfiguration 2) oder aus einem zusätzlichen Grundtank auf Geländehöhe (Konfiguration 3). Außerdem installieren manche Haushalte lediglich einen Grundtank, aus dem das gespeicherte Wasser mittels Gefäßen entnommen wird (Konfiguration 4). Im Pilotgebiet erfolgte die häusliche Wasserspeicherung und -versorgung überwiegend gemäß Konfiguration 3 (siehe Abschnitt 6.3).

Um den Einfluss der intermittierenden Versorgung auf die Verbraucher näher zu untersuchen, wurden im Rahmen dieser Arbeit Wasserzähler an den Dachtanks von Stichprobenhaushalten mit Datenloggern ausgestattet. Die Logger zeichneten über einen Messzeitraum von ca. 18 Monaten das stündliche aus den Dachtanks entnommene Verbrauchsvolumen auf. Dadurch lassen sich Verbrauchsganglinien entwickeln, die die mittleren stündlichen Verbrauchsvolumina als prozentuale Anteile am durchschnittlichen Verbrauchsvolumen an einem Tag darstellen. Abbildung 4.4 zeigt die durchschnittliche Verbrauchsganglinie basierend auf den Messdaten von 78 Stichprobenhaushalten in einer Versorgungszone mit 3.086 Einwohnern in Tiruvannamalai. Zum Vergleich ist in der Abbildung zusätzlich die Ganglinie einer kontinuierlich versorgten Zone in Stuttgart mit ca. 4.000 Einwohnern dargestellt (Mutschmann u. a., 2014). Es ist deutlich zu erkennen wie ähnlich der Verlauf beider Ganglinien ist, mit einem ausgeprägt hohen Verbrauch in den Morgenstunden nach dem Aufstehen sowie einem weiteren Hoch in den Abendstunden. Somit kann festgehalten werden, dass die intermittierende Betriebsweise des Verteilungsnetzes keine Auswirkungen auf das Verbraucherverhalten in Tiruvannamalai hat, da dieses durch die private Wasserspeicherung und -versorgung qualitativ dem Verbraucherverhalten bei einer kontinuierlichen Versorgung entspricht.

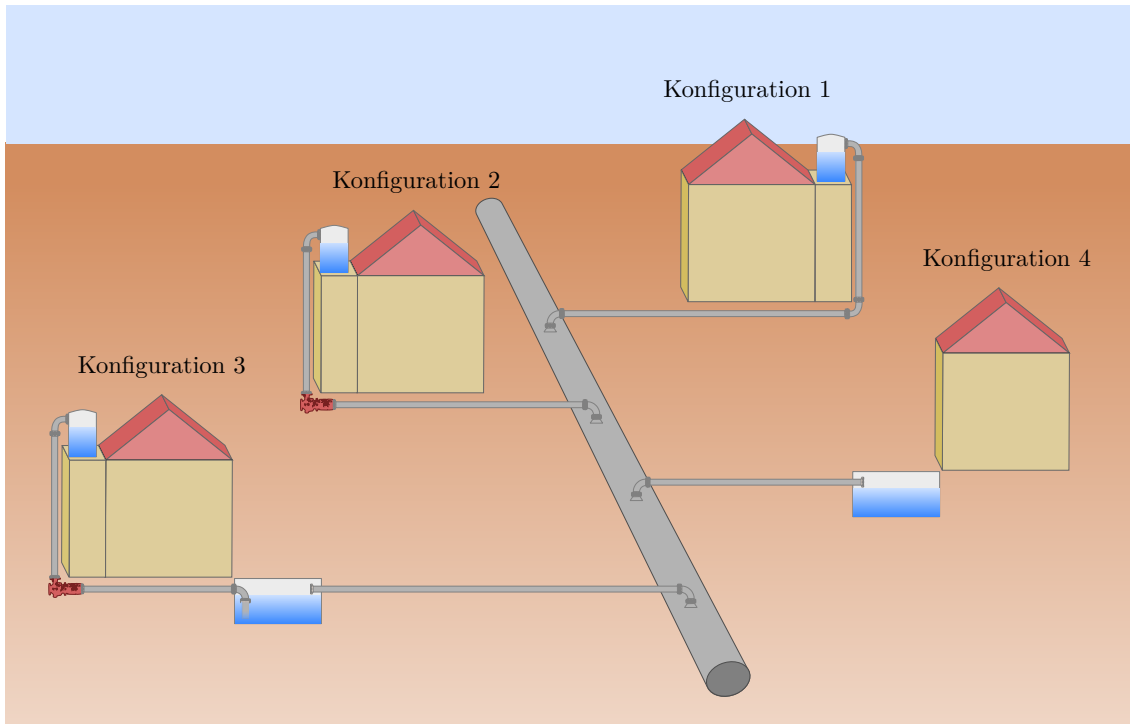


Abbildung 4.3: Ausführungen von Hausinstallationen zur Wasserspeicherung

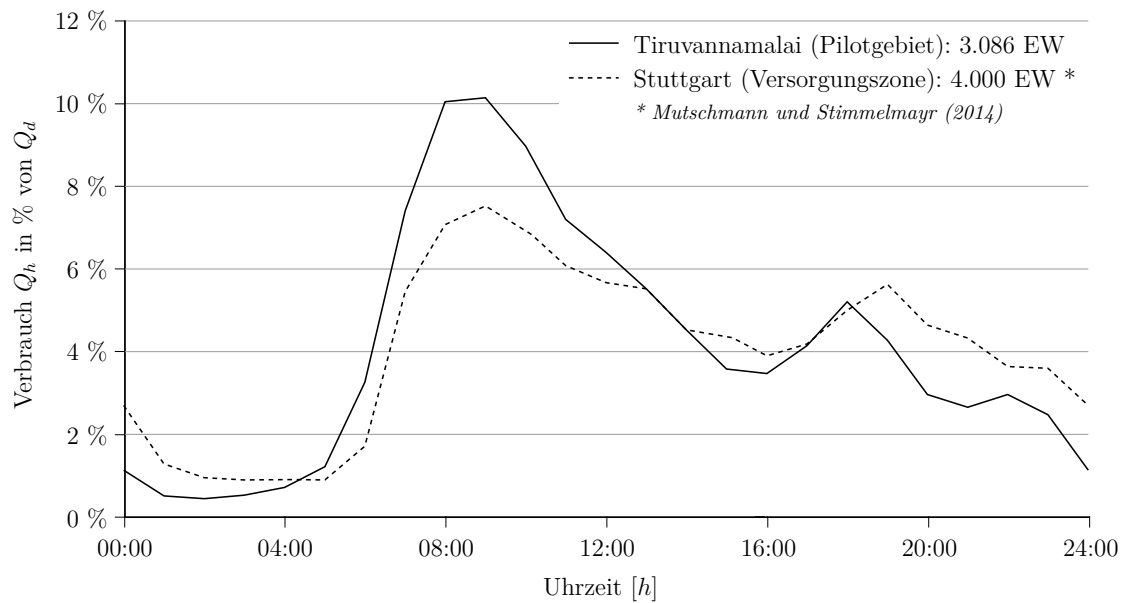


Abbildung 4.4: Vergleich der Verbrauchsganglinien in der intermittierenden (Tiruvannamalai) und kontinuierlichen Versorgung (Beispiel Stuttgart)

4.5 Wassertarif

In Tiruvannamalai wird, wie in den meisten indischen Städten, ein mengenunabhängiger Fixtarif angewandt. Darüber hinaus werden Einnahmen über eine in die Grundstückssteuer integrierte Wassersteuer generiert. Bei dem Fixtarif wird zwischen privaten Haushalten und gewerblicher Nutzung unterschieden. Für Privathaushalte beträgt der monatliche Fixtarif derzeit 100 INR (ca. 1,3 Euro) und für das Gewerbe 250 INR (ca. 3,2 Euro). Laut Wasserversorgungssatzung, dem sogenannten Bye-Law der Stadtverwaltung Tiruvannamalai (2013b), ist der Fixtarif auf ein monatliches Verbrauchsvolumen von $7,5 \text{ m}^3$ pro Anschluss ausgelegt. Auf Nachfrage bei der Stadtverwaltung konnte jedoch keine Auskunft über den Ursprung dieses festgelegten Verbrauchswertes gegeben werden. Im Vergleich mit nationalen Durchschnittswerten, die in Abschnitt 2.7.4 ausgeführt sind, ist der Wassertarif in Tiruvannamalai als sehr gering einzustufen.

Eine Analyse der verfügbaren Jahresabschlüsse durch den *WaLUE*-Projektpartner *IEEM* ergab, dass u.a. aufgrund der geringen Fixtarife in Kombination mit der mangelhaften Zahlungsmoral der Verbraucher (weniger als 50 % bezahlte Rechnungen) lediglich 30 bis 40 % der Kosten durch Einnahmen in der Wasserversorgung in den betrachteten Jahren 2013 bis 2018 gedeckt waren (Rudolph u. a., 2019). Daher ist die Stadtverwaltung auf staatliche Subventionen zur Aufrechterhaltung des derzeitigen Betriebs und Instandhaltung ihres Wasserversorgungssystems angewiesen.

4.6 Ursachen und Auswirkungen der intermittierenden Wasserverteilung

Klingel (2010) stellte in seiner systematischen Betrachtung der Mängel von Verteilungssystemen in Entwicklungsländern fest, dass die Ursachen und Auswirkungen der intermittierenden Wasserverteilung untereinander in kausalen Wechselbeziehungen stehen. Daher ist eine klare Abgrenzung nicht möglich, da eine Auswirkung der intermittierenden Verteilung zugleich eine Ursache darstellen kann, die wiederum zu einer intermittierenden Verteilung führt. Auch Galaitsi u. a. (2016) kommen basierend auf einer umfassenden Literaturstudie zu dem Ergebnis, dass die in intermittierend betriebenen Verteilungssystemen vorherrschenden Bedingungen über kausale Wirkungsketten miteinander in Beziehung stehen.

Basierend auf diesen Ansätzen gibt Abbildung 4.5 einen Überblick ausgewählter kausaler Wirkungsketten in der intermittierenden Wasserverteilung mit Bezug zur Fallstudie Tiruvannamalai. Es werden zum einen technische Aspekte beleuchtet, bei denen oftmals eine mangelhafte Datenhaltung sowie ein mangelhaftes Systemkonzept und -planung die Ausgangslage für einen in der Folge mangelhaften Betrieb und Instandhaltung der Wasserverteilungssysteme bilden. Zum anderen werden die sozioökonomischen Auswirkungen in Bezug zum Einfluss der intermittierenden Versorgung auf die Kunden, den Wassertarif sowie das verfügbare Budget des Wasserversorgers betrachtet. Neben den technisch-ökonomischen Gründen kann sich eine

intermittierende Wasserverteilung auch zwangsweise aus einem limitierten Dargebot an verfügbaren und erschließbaren Wasserressourcen ergeben. Diese physische Wasserknappheit ist jedoch in Tiruvannamalai nicht gegeben und wird daher in den weiteren Ausführungen nicht weiter behandelt.

Gemäß dem Ansatz von Klingel (2010) enden die in Abbildung 4.5 dargestellten Wirkungsketten mit den drei wesentlichen Mängeln der intermittierenden Verteilung in Bezug zu den grundlegenden Aufgaben der Wasserversorgung. Diese sind die mangelhafte Bereitstellung einer ausreichenden Wasserquantität, eine mangelhafte Wasserqualität sowie eine ungerechte Wasserversorgung, in der ein ungleicher und beschränkter Wasserzugang für die Verbraucher herrscht. In den folgenden Abschnitten werden die dargestellten Ursachen und Auswirkungen am Fallbeispiel Tiruvannamalai näher beschrieben, wobei insbesondere auf die Wirkungsketten im Rahmen eines mangelhaften Betriebs und Instandhaltung eingegangen wird.

4.6.1 Mangelhafte Datenhaltung

Die Verfügbarkeit einer umfassenden Datengrundlage (z.B. aktuelle Bestandspläne, Betriebsdaten) ist essentiell für eine ordnungsgemäße Planung und Analyse sowie den Betrieb und die Instandhaltung von Wasserverteilungssystemen, um dadurch eine kontinuierliche Wasserversorgung nachhaltig gewährleisten zu können (Myers, 2003; Klingel, 2010). In Tiruvannamalai existiert keine Dokumentation der aktuellen Versorgungsinfrastruktur und im gesamten Versorgungsgebiet ist keine Messtechnik zur Erfassung der relevanten Betriebsdaten installiert. Es liegen lediglich nicht georeferenzierte Planungsdaten eines Ingenieurbüros aus dem Jahr 2010 vor, das mit der Entwurfsplanung zur Erneuerung und Erweiterung des bestehenden Versorgungssystems beauftragt war. Begehungen vor Ort zusammen mit dem zuständigen *Operator* zur Datenverifizierung ergaben jedoch, dass z.B. in Bezug zum Rohrleitungsnetz das Material, der Durchmesser und die Längen der tatsächlich verlegten Leitungen teilweise nicht mit diesen Planungsdaten übereinstimmten.

4.6.2 Mangelhaftes Systemkonzept und -planung

Das Systemkonzept stellt die Anordnung der einzelnen Pumpanlagen, Speicherbehälter und Leitungsnetz dar. Ein übergeordnetes Konzept, das die örtlichen Randbedingungen sowie die aktuellen und zukünftigen Entwicklungen im Versorgungsgebiet berücksichtigt, ist Voraussetzung für eine vollumfänglich funktionierende Wasserversorgung (Klingel, 2010). Gerade in Bezug zu Erweiterungen von Verteilungssystemen, die aufgrund des enormen Bevölkerungszuwachses vor allem in urbanen Gebieten erforderlich sind, erfolgen Planung und Umsetzung dieser Maßnahmen oftmals nicht unter Berücksichtigung des übergeordneten Systemkonzepts und der hydraulischen Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems (McIntosh, 2003; Andey und Kelkar, 2007).

In Tiruvannamalai wurde bei der Planung von Erweiterungs- und Erneuerungsmaßnahmen im Jahr 2010 zwar das bestehende Systemkonzept berücksichtigt

und Maßnahmen zur Verbesserung der hydraulischen Leistungsfähigkeit erarbeitet, schlussendlich wurde jedoch gerade im Hinblick auf die Leistungssteigerung des Leitungsnetzes kaum eine Maßnahme umgesetzt. Ein Grund war die in der Realität weitaus komplexere und undurchschaubare Netztopologie mit unzähligen zusätzlichen Rohrleitungen und somit Vermaschungen des Leitungsnetzes. Dies wurde in den Planungsentwürfen bei der anhand von hydraulischen Rohrnetzberechnungen durchgeführten Auslegung des verbesserten Verteilungssystems nicht berücksichtigt. Die Planungsdokumente stellten somit eher eine Zielvorstellung des zukünftigen, kontinuierlich betriebenen Verteilungssystems dar, die jedoch im Rahmen der Maßnahmenumsetzung in den Jahren 2011 bis 2013 nur in begrenztem Umfang (z.B. Bau von zusätzlichen Wassertürmen) realisiert wurde. Auch eine Betriebsstrategie zur Einführung einer kontinuierlichen Versorgung in Tiruvannamalai nach Umsetzung der vorgeschlagenen Maßnahmen war nicht Teil der Planungsprozesse.

4.6.3 Mangelhafter Betrieb und Instandhaltung

Dem zuständigen Personal der Stadtverwaltung Tiruvannamalais fehlen die erforderlichen Systemkenntnisse, um das Wasserverteilungssystem ordnungsgemäß zu betreiben und instand zu halten und somit eine kontinuierliche Wasserversorgung gewährleisten zu können. Dieser Umstand ergibt sich zum einen durch die oben beschriebene mangelhafte Datenhaltung sowie die komplexe Struktur des Verteilungssystems (Abbildung 4.5). Zum anderen sind sowohl die Anzahl als auch die Qualifikation des Personals nicht ausreichend, um eine kontinuierliche Versorgung gemäß einer auf die hydraulische Leistungsfähigkeit der einzelnen Anlagenkomponenten abgestimmten, übergeordneten Betriebs- und Instandhaltungsstrategie umzusetzen. In Tiruvannamalai wird daher das Verteilungssystem intuitiv und ohne Kontrolle der relevanten Betriebsparameter wie der Einspeisemengen, Netzabgaben oder Versorgungsdauer und -drücke im System intermittierend betrieben.

Durch die intermittierende Verteilung erfolgt nur eine beschränkte Wasserabgabe an die Verbraucher. Je nachdem, wie groß die Einschränkung ist, kann die Quantität der abgegebenen Wassermengen mangelhaft mit erheblichem negativen Einfluss auf die Verbraucher sein (Totsuka u. a., 2004). Dies war, zumindest in dem untersuchten Pilotgebiet in Tiruvannamalai, nicht der Fall. Bis auf wenige Ausnahmen wurde dort bei Stichprobenhaushalten die Versorgung mit einer ausreichenden Wassermenge gemessen.

Unter hydraulischen Gesichtspunkten hat die intermittierende Betriebsweise aufgrund der alternierenden Befüllung und Entleerung erhebliche Druckschwankungen und -stöße im Leitungsnetz zur Folge. Dadurch sind die Rohrleitungen einer erhöhten Belastung ausgesetzt, was eine erhöhte Anzahl von Rohrschäden bedingt (Charalambous und Laspidou, 2017). In Kombination mit der mangelhaften Instandhaltung des Leitungsnetzes, bei der in Tiruvannamalai lediglich gemeldete Schäden mit zum Teil erheblicher Zeitverzögerung repariert werden, ergibt sich ein mangelhafter Zustand des Verteilungssystems. Die Folge sind erhöhte Wasserverluste, die bei entsprechendem Ausmaß eine kontinuierliche Versorgung unmöglich machen. Die hohen Ver-

luste werden zusätzlich durch die erhöhte Wasserverschwendung im Kundenbereich verstärkt, die sich aufgrund der häuslichen Speicherung von möglichst viel Wasser während der kurzen Versorgungsperioden ergibt (siehe Abschnitt 3.2.3). Als Antwort auf die hohen Verluste und die Verschwendung reagieren die Versorgungsunternehmen, wie auch in Tiruvannamalai, oftmals mit einer intermittierenden Verteilung, um durch eine zeitlich begrenzte Beschickung der Leitungsnetze die Leckagemengen und die verschwendeten Wassermengen zu reduzieren (Klingel, 2010). Langfristig gesehen führt jedoch genau diese Betriebsweise zu einer weiteren Verschlechterung des Systemzustands mit den daraus resultierenden negativen Folgen (Abbildung 4.5).

Eine weitere potentielle Auswirkung der intermittierenden Wasserverteilung ist eine mangelhafte Wasserqualität (Kumpel und Nelson, 2014). Wie in Abschnitt 3.2.4 beschrieben ist aufgrund der erhöhten Anzahl an Leckagestellen die Gefahr einer Verunreinigung und Kontamination des Wassers gegeben, insbesondere durch Schmutzeintrag in das zwischen zwei Versorgungsperioden entleerte Leitungssystem. Zu weiteren Qualitätsminderungen kommt es im Fall von Stagnation des Wassers im Leitungsnetz und in den häuslichen Speichertanks. Im Leitungsnetz sind die Versorgungsdrücke aufgrund der hohen und zeitgleich stattfindenden Wasserentnahmen der Verbraucher sowie der zu Beginn der Versorgung luftgefüllten Leitungen gering. Die hohen Entnahmen führen zu sehr hohen Durchflüssen und somit hohen Druckverlusten, die durch Lufteinschlüsse in der bewegten Wassersäule noch verstärkt werden. Die Versorgungsdrücke können dadurch zum Teil so gering sein, dass das Wasser in gewissen Leitungsabschnitten stagniert und die Wasserqualität durch die hohen Verweilzeiten negativ beeinflusst wird (Abbildung 4.5).

Neben Qualitätsminderungen in den Leitungssystemen kann es auch in den häuslichen Speichertanks aufgrund Überdimensionierung und unzureichender Desinfektion zu einer Verkeimung des gespeicherten Wassers kommen. Die Verkeimung wird durch hohe Temperaturen noch verstärkt, wenn wie in Tiruvannamalai insbesondere die Tanks auf den Flachdächern der Haushalte der direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind. Ein Großteil der Bevölkerung im Untersuchungsgebiet Tiruvannamalais vertraut nicht darauf, dass das aus dem Leitungsnetz entnommene Wasser eine Trinkwasserqualität aufweist. Daher wird das Wasser entweder abgekocht oder die Verbraucher investieren in Filteranlagen, die in die Hausinstallation integriert werden. Zudem beziehen einige Verbraucher ihr Trinkwasser aus alternativen Quellen, beispielsweise dem Kauf von abgepacktem Trinkwasser.

Durch die sehr hohen Wasserentnahmen sowie Wasserverluste und die damit verbundenen niedrigen Drücke ist in der intermittierenden Wasserverteilung eine ungleiche Versorgung der Verbraucher gegeben (Marchis u. a., 2010). In der Regel können die näher an der Einspeisequelle gelegenen Haushalte, wo ein höherer Versorgungsdruck herrscht, mehr Wasser entnehmen als die weiter entfernten Haushalte. Dies kann dazu führen, dass für die weiter entfernten Verbraucher kein ausreichender Druck mehr zur Verfügung steht, um eine adäquate Versorgung zu gewährleisten. Die Problematik soll anhand von Abbildung 4.6 veranschaulicht werden. In dieser ist für einen bestimmten Versorgungszeitpunkt der von einem Wasserturm bereitgestellte Versorgungsdruck an den Haushalten für die kontinuierliche sowie intermittie-

4.6 Ursachen und Auswirkungen der intermittierenden Wasserverteilung

rende Wasserverteilung schematisch dargestellt. In der kontinuierlichen Verteilung, bei der in der Regel lediglich eine geringe Wassermenge zeitgleich von den Haushalten entnommen wird, ist der Druck jederzeit für alle Hausanschlüsse ausreichend für eine ordnungsgemäße Wasserversorgung. Durch die in der intermittierenden Wasserverteilung zeitgleich stattfindenden hohen Entnahme- und Verlustmengen sinkt der Versorgungsdruck sehr rasch ab, wodurch dieser in der beispielhaften Darstellung nicht mehr zur Füllung des nur mit einem Dachtank ausgestatteten, vom Wasserturm aus an dritter Stelle gelegenen Haushalts ausreicht.

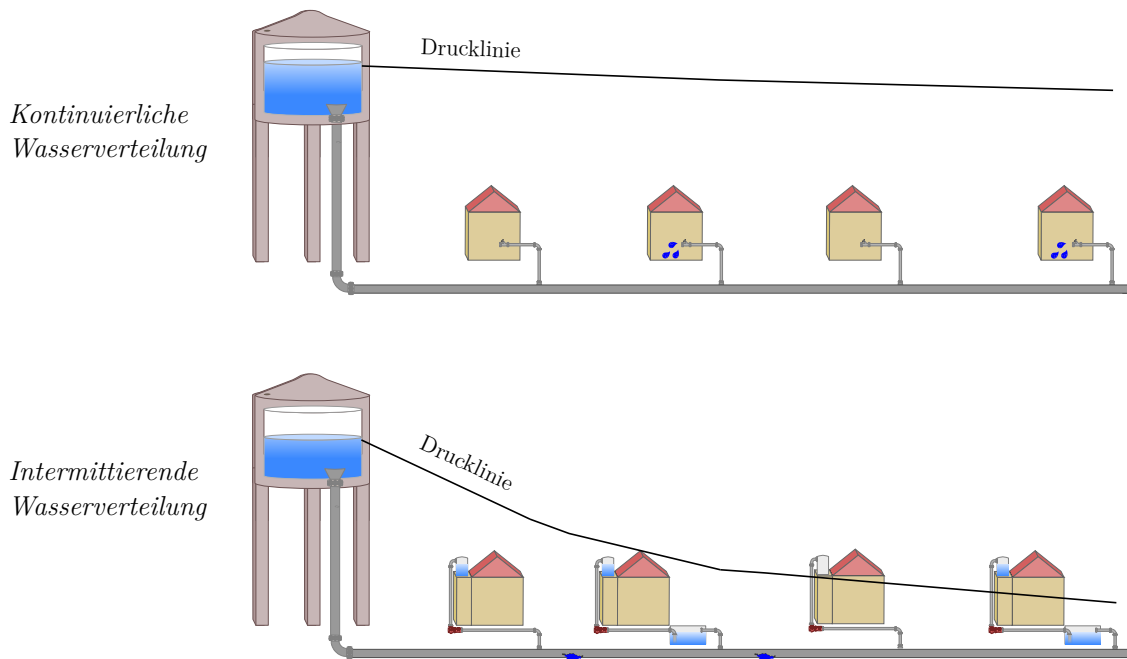


Abbildung 4.6: Schematischer Vergleich der Versorgungsdrücke in der kontinuierlichen und intermittierenden Wasserverteilung

Im Untersuchungsgebiet in Tiruvannamalai, wo die Versorgungsdrücke bei stichprobenartigen Messungen zwischen 0,5 und 5 *mWS* lagen, wurde kein beschränkter Wasserzugang der weiter entfernten Haushalte festgestellt. Bei Stichprobenmessungen an ausgewählten Haushalten wurden jedoch zum Teil erhebliche Unterschiede hinsichtlich der entnommenen Wassermengen beobachtet (siehe Abschnitt 6.6.2.2). Auch gab es bei Begehungen vor Ort vereinzelt Beschwerden an den zuständigen *Operator* über eine generell bzw. zeitweise ungenügende Wasserversorgung. Manche Haushalte hatten private Pumpen installiert, um über diese mehr Wasser aus dem Leitungsnetz zu entnehmen, was zu Lasten der Versorgung der benachbarten Haushalte geht.

Die intermittierende Versorgung und ihre negativen Folgen belasten auch das Verhältnis von Wasserversorgungsunternehmen und Verbrauchern. Sind die Verbraucher mit einer unzuverlässigen Versorgung sowie den dadurch erforderlichen Investitionskosten für private Speichertanks und Filteranlagen konfrontiert, ist oftmals eine

geringe Kundenzufriedenheit die Folge (Galaiti u. a., 2016). Daraus ergibt sich eine geringe Bereitschaft der Kunden, einen zur Gewährleistung einer ordnungsgemäßen Wasserversorgung erforderlichen, höheren Wassertarif zu bezahlen. In Tiruvannamalai ist der aktuelle Wassertarif sehr gering. Dennoch werden die Wasserrechnungen von vielen Kunden erheblich verspätet oder gar nicht bezahlt. Das daraus resultierende geringe Budget für die Wasserversorgung trägt schlussendlich zu dem mangelhaften Betrieb und Instandhaltung des Wasserversorgungssystems bei (Abbildung 4.5).

4.7 Bedarf angepasster Lösungen für die intermittierende Wasserverteilung

Anhand der beschriebenen Wirkungsketten ist ersichtlich, dass einige Ursachen und Auswirkungen der intermittierenden Wasserverteilung einen negativen Kreislauf bilden, aus dem sich viele Versorgungsunternehmen selbst kaum befreien können. Somit bedarf es eines ganzheitlichen, mehrdimensionalen Ansatzes zur Verbesserung der Versorgungssituation in intermittierend betriebenen Verteilungssystemen. Dieser muss sowohl von allen Beteiligten auf politischer und institutioneller Ebene als auch von den einzelnen Versorgungsunternehmen und ihren Kunden getragen und aktiv mitgestaltet werden. Als technische Lösungsansätze stehen im Grunde zwei Herangehensweisen zur Verfügung, entweder die Optimierung der intermittierenden Verteilung oder die schrittweise Überführung einer intermittierenden zu einer kontinuierlichen Verteilung.

Für den ersten Ansatz entwickelten Vairavamoorthy u. a. (2001) und Totsuka u. a. (2004) Richtlinien für eine Anpassung des Systemkonzepts, um in intermittierenden Wasserverteilungssystemen durch eine entsprechende Zonierung und individuell ermittelte Versorgungsdauern eine möglichst gleiche Druckverteilung und somit gerechtere Versorgung mit adäquaten Wassermengen in den einzelnen Zonen zu gewährleisten.

Die Ansätze nach Klingel (2010) und Myers (2003) für die Einführung einer kontinuierlichen Versorgung basieren zunächst auf einer angepassten Erhebung der erforderlichen Daten über das Verteilungssystem, um mit den gewonnenen Systemkenntnissen die sukzessive Umsetzung einer kontinuierlichen Versorgung in hydraulisch getrennten Zonen zu realisieren. Für die erfolgreiche Umsetzung sind u.a. die Ausstattung aller Hausanschlüsse mit Zählern, die Entfernung von illegalen Hausanschlüssen, die Reduktion von Wasserverlusten, Schulungen des Betriebspersonals in der kontinuierlichen Betriebsweise sowie die Anpassung der Tarifgestaltung und Sensibilisierungskampagnen der Verbraucher zum sparsamen Umgang mit der kontinuierlich verfügbaren Wassermenge unerlässlich.

Auch wenn grundsätzlich die Einführung einer kontinuierlichen Verteilung die einzige dauerhafte und nachhaltige Lösung für die Gewährleistung einer einwandfreien Wasserversorgung darstellt, ist in zahlreichen Entwicklungs- und Schwellenländern

die intermittierende Verteilung der Regelfall statt die Ausnahme. In Indien beispielsweise ist bis auf sehr wenige Ausnahmen keine kontinuierliche Wasserversorgung der Verbraucher in den städtischen Gebieten gegeben. Genaue Daten über die weltweite Verbreitung dieser Betriebsweise sind nicht verfügbar, jüngste Schätzungen von Charalambous und Lapidou (2017) gehen jedoch davon aus, dass ca. 1,3 Milliarden Menschen intermittierend mit Wasser versorgt werden. Daher ist ein hoher Bedarf angepasster Lösungen für einen verbesserten Betrieb und Instandhaltung von intermittierenden Verteilungssystemen gegeben, um für die betroffenen Verbraucher die negativen Auswirkungen so gut wie möglich zu minimieren (Vairavamoorthy u. a., 2008).

Dabei spielt ein effektives Wasserverlustmanagement eine entscheidende Rolle, da Wasserverluste, wie in Abbildung 4.5 verdeutlicht, zugleich eine der Hauptursachen sowie -auswirkungen der intermittierenden Wasserverteilung sind und einen erheblichen negativen Einfluss auf die Quantität und Qualität der an die Verbraucher abgegebenen Wassermengen haben. Eine große Herausforderung ist hierbei, die in Abschnitt 3.5 beschriebenen und in der kontinuierlichen Wasserversorgung erfolgreich angewandten Gegenmaßnahmen zur Reduktion realer Wasserverluste zielführend in intermittierend betriebenen Systemen anzuwenden (Dhigade u. a., 2014).

Diesbezüglich sollten im Rahmen des *WaLUE*-Verbundvorhabens die Technologien der Gegenmaßnahmen durch die involvierten Industriepartner angepasst und deren Anwendbarkeit im Verteilungssystem Tiruvannamalais demonstriert werden (siehe Abschnitt 1.3). Trotz intensiver Bemühungen konnten jedoch in der Projektlaufzeit weder die Entwicklung und pilothafte Umsetzung einer an die vorherrschenden Randbedingungen angepassten aktiven Leckkontrolle noch die Einführung eines Infrastrukturmanagements inklusive einer angepassten Rehabilitationsstrategie abgeschlossen werden. Die Gründe hierfür waren bei der aktiven Leckkontrolle die zu geringen Versorgungsdrücke, permanent geöffnete Hausanschlüsse sowie fehlende Rohrnetzpläne, die die Ortung von Leckagen an Rohrleitungen durch den Einsatz von Geräuschloggern verhinderten (Noß und Schubert, 2017). Zur Einführung eines Infrastrukturmanagements und die Entwicklung einer Rehabilitationsstrategie fehlte die dazu erforderliche Datengrundlage wie beispielsweise aktuelle Bestandspläne sowie Angaben zu den Vermögenswerten der einzelnen Anlagenkomponenten der Wasserversorgung (Scheday und Kugler, 2018). Für die erstmalige Erhebung dieser Daten fehlten die dazu erforderlichen personellen und finanziellen Ressourcen bei der Stadtverwaltung Tiruvannamalai. Die Einführung eines Druckmanagements zur Wasserverlustreduktion wurde von den beteiligten Projektpartnern angesichts der ohnehin sehr niedrigen Versorgungsdrücke im Verteilungssystem Tiruvannamalais bereits zu Projektbeginn als nicht zielführend erachtet. Die Ergebnisse des *WaLUE*-Projekts zeigten somit deutlich, wie groß die Herausforderung und die zu überwindenden Probleme sind, um Wasserverluste in intermittierend betriebenen Verteilungssystemen zu reduzieren.

Ungeachtet dieser Herausforderungen sollte das beteiligte Personal eines Versorgungsunternehmens zunächst in der Lage sein, die aktuelle Wasserverlustsituation in einem intermittierend betriebenen Verteilungssystem analysieren und bewerten zu

können. Ein entscheidender Schritt ist dabei die Bestimmung der einzelnen Verlustkomponenten im Rahmen der Wasserverlustbilanzierung, um darauf basierend die Wasserverluste zielgerichtet durch geeignete Maßnahmen zu reduzieren (siehe Abschnitt 3.4). Das diesbezüglich von der IWA entwickelte, standardisierte Verfahren der Wasserbilanzerstellung ist jedoch in vielen intermittierend betriebenen Verteilungssystemen aufgrund der vorherrschenden Randbedingungen nicht schlüssig anwendbar. Daraus ergibt sich der Bedarf einer auf dem IWA-Verfahren aufbauenden, jedoch an die vorherrschenden Randbedingungen dieser Verteilungssysteme angepassten Methodik der Wasserverlustbilanzierung, deren Entwicklung und pilothafte Umsetzung in den beiden folgenden Kapiteln beschrieben ist.

5 Entwicklung der angepassten Wasserverlustbilanzierung

5.1 Überblick

In Abschnitt 5.2 werden zunächst die limitierenden Randbedingungen intermittierend betriebener Wasserverteilungssysteme identifiziert, die eine schlüssige Anwendung der IWA-Wasserbilanz verhindern. Anschließend wird in Abschnitt 5.3 auf bestehende Modifikationsansätze der IWA-Bilanz eingegangen, die jedoch die identifizierten Randbedingungen nicht umfassend adressieren. Diese werden in der im Rahmen dieser Arbeit angepassten Wasserbilanz berücksichtigt, die in Abschnitt 5.4 erläutert wird. Abschnitt 5.5 beschreibt anschließend die Verfahren zur Ermittlung der Bilanzkomponenten, die ebenfalls an die Randbedingungen intermittierend betriebener Verteilungssysteme angepasst werden mussten. Zur Bewertung der angepassten Bilanzkomponenten wurden zwei Kennzahlen entwickelt, die in Abschnitt 5.6 vorgestellt werden. In Abschnitt 5.7 wird abschließend das für die regelmäßige Erstellung der angepassten Wasserbilanz entwickelte Werkzeug beschrieben.

5.2 Limitierte Anwendbarkeit der IWA-Wasserbilanz

Für die schlüssige Anwendung der IWA-Wasserbilanz zur Quantifizierung und Bewertung von Wasserverlusten müssen bestimmte technische und betriebswirtschaftliche Voraussetzungen im Wasserversorgungssystem gegeben sein. Jedoch sind in zahlreichen Systemen weltweit, vor allem in Entwicklungsländern, diese Voraussetzungen nicht erfüllt. Die drei wesentlichen limitierenden Randbedingungen sind die intermittierende Betriebsweise, fehlende Wasserzähler sowie die Abrechnung der Kunden mittels Fixtarif. Diese Randbedingungen, die in Abhängigkeit zueinander stehen, verhindern direkt oder indirekt die ordnungsgemäße und aussagekräftige Erstellung und Anwendung der IWA-Bilanz, wie im Folgenden näher beschrieben wird.

Intermittierende Betriebsweise: Zahlreiche Studien und Projektberichte belegen, dass im Vergleich zur kontinuierlichen Versorgung in intermittierend betriebenen Systemen mehr Wasser verschwendet wird. Die Verschwendung erfolgt, wie in Abschnitt 3.2.3 beschrieben, vor allem durch die Entleerung der häuslichen Speicherbehälter vor einer Versorgungsperiode, um Raum für frisches Wasser zu schaffen. Bei fehlenden Wasserzählern im Kundenbereich wird diese verschwendete Wassermenge ebenso wie die tatsächlich verbrauchte Menge nicht erfasst und

auch in der Komponente *Authorised Consumption* der IWA-Bilanz nicht explizit berücksichtigt.

Für den Fall, dass Wasserzähler zur Verbrauchsmessung im Leitungsnetz installiert sind, hat die intermittierende Betriebsweise Einfluss auf die Zählergenauigkeiten. Neben dem beschleunigten Verschleiß der vornehmlich eingesetzten mechanischen Zähler durch die ständig wechselnden Druck- und Durchflussverhältnisse wird die Höhe der Messabweichung durch die Strömung von Luft beeinflusst, die zwischen zwei Versorgungsperioden in das intermittierend betriebene Leitungsnetz eingetragen wird. Die durch die intermittierende Betriebsweise bedingte Messabweichung ist nicht in der IWA-Methodik zur Ermittlung der Verbrauchsmengen berücksichtigt.

Fehlende Kundenwasserzähler: In zahlreichen Wasserverteilungssystemen, vor allem in Entwicklungs- und Schwellenländern, sind aufgrund von politischen, institutionellen, finanziellen oder sozialen Rahmenbedingungen keine Messeinrichtungen installiert. Beispielsweise war bei vergangenen politischen Wahlen im indischen Projektgebiet die Verhinderung der Einführung von Wasserzählern und somit einer verbrauchsgerechten Abrechnung ein populäres Wahlversprechen von lokalen Politikern. Auf institutioneller Ebene herrscht oftmals Skepsis oder Unwissenheit gegenüber der Notwendigkeit und dem Nutzen von flächendeckenden Messeinrichtungen im Leitungsnetz für die Gewährleistung eines ordnungsgemäßen und kostendeckenden Betriebs (Kingdom u. a., 2006). Wie in Abschnitt 2.7.3 beschrieben, werden in vielen Wasserversorgungsunternehmen, vor allem in staatlicher Hand, finanzielle Defizite im Betrieb durch Quersubventionierungen ausgeglichen. Somit fehlt der Anreiz für die Einführung eines flächendeckenden Zählerwesens und kostendeckenden Wassertarifs (Agrawal, 2008). Doch auch wenn auf institutioneller Ebene der flächendeckende Einsatz von Wasserzählern gefordert wird, setzen Wasserversorgungsunternehmen diese Forderung teilweise nicht um. Im indischen Projektgebiet beispielsweise fehlen der zuständigen Stadtverwaltung die finanziellen und personellen Ressourcen für die Installation, Betrieb und Wartung von Messeinrichtungen sowie dem turnusmäßigen Ablesen der Wasserzähler.

Nicht zuletzt scheitert die Installation von Kundenwasserzählern oftmals am Widerstand der Bevölkerung. Gründe hierfür sind u.a. die oft verbreitete Meinung, dass Wasser ein menschliches Grundbedürfnis ist und daher auch kostenlos oder nur zu einem sehr geringen Fixpreis ohne Verbrauchskontrolle verfügbar sein sollte. Ein weiterer Grund ist die Unzufriedenheit über die Versorgungssituation und somit der Weigerung, einen dem gemessenen Volumen entsprechenden und kostendeckenden Wasserpreis zu bezahlen (Agrawal, 2008; Amiraly und Kanniganti, 2011; RIC, 2018).

In Wasserverteilungssystemen ohne Kundenwasserzähler ist eine der wichtigsten Voraussetzungen für die schlüssige Anwendung der IWA-Wasserbilanz nicht gegeben. Diese basiert auf der möglichst genauen Quantifizierung der gesamten Wasserverbrauchsmenge der Kunden (Bilanzkomponente *Authorised Consumption*) und deren Aufteilung in die gemessene und nicht gemessene Verbrauchsmenge (Bilanzkomponenten *Metered/Unmetered Consumption*). Zudem folgt die IWA-

Bilanz dem Prinzip, dass zwischen Rohrnetzeinspeisung und Kundenwasserzähler bilanziert wird. Was nach erfolgreicher Wasserlieferung und entsprechender Abrechnung im Kundenbereich nach dem Zähler geschieht, liegt demnach außerhalb des Verantwortungsbereichs des Wasserversorgers. Diese klare Abgrenzung ist bei fehlenden Kundenwasserzählern nicht möglich.

Fixtarif: In zahlreichen Wasserverteilungssystemen weltweit wird anstelle eines dem gemessenen Wasservolumen entsprechenden Tarifs ein Fixtarif (englisch: *flat-rate-tariff*) unabhängig vom Verbrauchsvolumen angewandt. Ein Nachteil der Abrechnung mittels Fixtarif ist der fehlende finanzielle Anreiz für die Kunden, ihren Verbrauch möglichst gering zu halten und die Verschwendung von Wasser z.B. durch überlaufende Speicherbehälter oder permanent geöffnete Wasserhähne zu vermeiden ((Hoehn, 2011). Die verschwendete Wassermenge geht zu Lasten des Versorgers, wird jedoch in der IWA-Bilanz nicht gesondert ausgewiesen.

Eine weitere Limitation hinsichtlich der Anwendbarkeit der IWA-Bilanz ergibt sich durch die Ausgestaltung des Fixtarifs. Dieser ist meist auf ein theoretisches oder durch Annahmen festgelegtes fixes Wasservolumen in einem Zeitabschnitt, z.B. 15 m^3 pro Monat und Hausanschluss, ausgelegt. Dieses Volumen wird somit in Rechnung gestellt und von den Kunden bezahlt, entspricht jedoch in den meisten Fällen nicht deren tatsächlichen Verbrauchsvolumina. In der IWA-Bilanz wird allerdings angenommen, dass das gemessene und in Rechnung gestellte Verbrauchsvolumen (Komponente *Billed Metered Consumption*) dem Einkünfte generierenden Volumen (Komponente *Revenue Water*) entspricht. Diese Annahme ist für Verteilungssysteme mit Fixtarif und fehlender Verbrauchsmessung nicht allgemein gültig.

Zusammengefasst haben die Randbedingungen intermittierende Betriebsweise, fehlende Kundenwasserzähler sowie Anwendung eines Fixtarifs vor allem Einfluss auf die Bestimmung der Komponenten des Wasserverbrauchs der IWA-Bilanz und limitieren daher deren Anwendung. Die Komponente *Authorised Consumption* enthält Wasserverschwendung im Kundenbereich, die zu Lasten des Versorgers gehen. Die Komponenten *Billed/Unbilled Metered Consumption* lassen sich aufgrund fehlender bzw. fehlerbehafteter Kundenwasserzähler nicht bzw. nicht korrekt ermitteln. Und schließlich kann das Einkünfte generierende Wasservolumen nicht direkt aus der Bilanz abgeleitet werden, da das Volumen der Komponente *Revenue Water* nicht dem Volumen der Komponente *Billed Authorised Consumption* entspricht.

5.3 Modifikationsansätze der IWA-Wasserbilanz

Die Modifikation der IWA-Wasserbilanz zur zielführenden Anwendung in Wasserverteilungssystemen mit bestimmten Randbedingungen ist bisher nur in sehr wenigen Ansätzen und Fallstudien behandelt worden.

Die AWWA (2009) skizziert in ihrem Handbuch M36 eine Wasserbilanz, welche die Verschwendung im Kundenbereich neben dem nutzbringenden Verbrauch als separate Komponente ausweist. Hierbei wird jedoch vornehmlich auf Leckagen durch z.B. defekte Toilettenspülungen oder undichte Wasserhähne Bezug genommen, deren Durchflussraten oftmals unter dem Anlaufdurchfluss von Kundenwasserzählern liegen und somit nicht registriert werden. In der Bilanz wird diese Verschwendung als Sub-Komponente des *Revenue Water* dargestellt, das jedoch in der Realität dem Versorger keine Einkünfte generiert und somit dem Volumen des *Non-Revenue Water* zuzuordnen ist. In Abbildung 5.1 ist die entsprechende Erweiterung der IWA-Bilanz hinsichtlich der Komponenten *Wastage* und *Usage* dargestellt.

Zwei weitere Modifikationsansätze von Seago und McKenzie (2007) und Kanakoudis und Tsitsifli (2010) beziehen sich auf eine detailliertere Kategorisierung der Komponente *Revenue Water* unter Berücksichtigung der nationalen Wassergebührenpolitik und ihrer Folgen in Südafrika bzw. Griechenland. Abbildung 5.1 zeigt die beiden Modifikationen der Wasserbilanz. Seago und McKenzie (2007) passten diese im Zuge einer landesweiten Erhebung über *Non-Revenue Water* hinsichtlich der betriebswirtschaftlichen Rahmenbedingungen südafrikanischer Wasserversorgungsunternehmen an. Die Komponente *Revenue Water* wird in die drei Sub-Komponenten *Free Basic Water*, *Recovered Revenue Water* und *Non-recovered Revenue Water* unterteilt. Dabei umfasst die Komponente *Recovered Revenue Water* das Volumen, das den Kunden in Rechnung gestellt, von diesen bezahlt wird und somit dem Versorger Einkünfte generiert. Die Komponente *Non-recovered Revenue Water* umfasst das in Rechnung gestellte Volumen, das jedoch vom Kunden nicht bezahlt wird. Ein relativ hoher Anteil der einkommensschwachen Haushalte ist nicht in der Lage, das Wasservolumen, das oftmals aufgrund von Leckagen oder Wasserverschwendung innerhalb der Grundstücksgrenzen über die kostenlose Basisversorgung hinaus verbraucht wird, zu bezahlen. Formal wird dieses Volumen als abgerechnet angenommen und daher ebenfalls dem *Revenue Water* zugeordnet, generiert aber in der Realität keine Einkünfte für den Versorger. Die Komponente *Free Basic Water* umfasst das Volumen der auf nationaler Ebene beschlossenen, kostenlosen Basisversorgung für einkommensschwache Haushalte ($6 \text{ m}^3/\text{Monat}$). Dieses Volumen wird vom Staat subventioniert und nicht direkt von den Kunden an den Versorger bezahlt. Daher wird dieses Volumen als separate Sub-Komponente des *Revenue Water* in der modifizierten Wasserbilanz ausgewiesen (McKenzie u. a., 2012).

Auf dieser Modifikation aufbauend passten Kanakoudis und Tsitsifli (2010) die Wasserbilanz an die von den meisten griechischen Wasserversorgungsunternehmen praktizierte Gebührenpolitik an. Alle Kunden zahlen einen Mindestbetrag, der einem bestimmten Wasservolumen entspricht. Somit entrichten Kunden, deren gemessenes Verbrauchsvolumen geringer ist als das dem Mindestbetrag entsprechende Volumen, eigentlich eine zu hohe Wassergebühr. Die Differenz dieser beiden Volumina wird in der modifizierten Wasserbilanz als Komponente *Minimum Charge Difference* dem *Revenue Water* zugeordnet, da durch dieses in Rechnung gestellte aber nicht an die Kunden abgegebene Wasservolumen zusätzliche Einnahmen generiert werden. Die

Komponenten *Recovered Revenue Water* und *Non-recovered Revenue Water* wurden aus der Modifikation von Seago und McKenzie (2007) übernommen.

IWA-Wasserbilanz nach Lambert und Hirner (2000)				Modifikation von AWWA (2009)	Modifikation von Seago und Mckenzie (2007)	Modifikation von Kanakoudis und Tsitsifli (2010)
System Input Volume	Authorised Consumption	Billed Authorised Consumption	Revenue Water	Usage (within customer properties)	Free Basic Water	Minimum Charge Difference
					Recovered Revenue Water	Recovered Revenue Water
		Wastage (plumbing leaks)	Non-recovered Revenue Water	Non-recovered Revenue Water		
	Water Losses	Unbilled Authorised Consumption	Non-Revenue Water	Non-Revenue Water	Non-Revenue Water	Non-Revenue Water
		Apparent Losses				
		Real Losses				

Abbildung 5.1: Modifikationen der IWA-Wasserbilanz durch AWWA (2009), Seago und McKenzie (2007) sowie Kanakoudis und Tsitsifli (2010)

Die beschriebenen Modifikationsansätze beziehen sich lediglich auf eine detailliertere Kategorisierung der Komponente *Revenue Water*. Diese wird entweder in Bezug auf die vom Kundenwasserzähler nicht registrierte Verschwendung durch defekte Hausinstallationen oder auf die vorherrschende Wassertarifpolitik in den Pilotstudien genauer analysiert. Die Auswirkung der oben skizzierten und in Entwicklungsländern häufig anzutreffenden technischen und betriebswirtschaftlichen Randbedingungen wie die intermittierende Betriebsweise ohne Kundenwasserzähler oder die Abrechnung über Fixtarife und der damit einhergehenden vorsätzlichen Wasserverwendung im Kundenbereich werden in den Ansätzen nicht oder nur in begrenztem Umfang berücksichtigt. Daher steht eine ganzheitliche Anpassung der IWA-Wasserbilanz an diese in vielen Entwicklungs- und Schwellenländern anzutreffenden Randbedingungen noch aus.

5.4 Anpassung der IWA-Wasserbilanz

In Abbildung 5.2 ist die im Rahmen des Projekts entwickelte Wasserbilanz dargestellt. Bei dieser wurden das grundlegende Prinzip, die Struktur sowie die englischsprachige Terminologie der IWA-Bilanz aufgrund ihrer weltweiten Verbreitung und Anwendung beibehalten. Das Volumen der Systemeinspeisung in das Versorgungsgebiet bzw. eine Versorgungszone wird wie in der IWA-Bilanz unterschieden in die verschiedenen Teilvolumina der Wasserabgabe und der Wasserverluste sowie in Einkünfte und keine Einkünfte generierenden Volumina. Jedoch sind einige Anpassungen der Bilanz zur schlüssigen Anwendung in Wasserverteilungssystemen mit den im vorangegangenen Kapitel genannten Randbedingungen erforderlich.

Eine bedeutende Änderung gegenüber der IWA-Bilanz ist die Unterscheidung zwischen dem effektiv an den Kunden abgegebenen Wasservolumen und dem tatsächlichen Verbrauchsvolumen im Kundenbereich. Daher wird in den ersten Ebenen der angepassten Bilanz der Begriff *Supply* für das an die Kunden abgegebene Wasservolumen verwendet, um dieses Volumen eindeutig vom tatsächlichen Verbrauchsvolumen *Consumption* abzugrenzen. Diese Unterscheidung ist wichtig, da die beiden genannten Volumina sich aufgrund von Wasserverschwendung im Kundenbereich zum Teil erheblich voneinander unterscheiden können. Dies wird in der IWA-Bilanz nicht berücksichtigt, da in dieser durchgehend der Begriff *Consumption* für die an die Kunden abgegebene Wassermenge verwendet wird. Formal gesehen ist zwar das Volumen der Wasserverschwendung innerhalb des Kundenbereichs über den Fixtarif abgerechnet und damit autorisiert. Nichtsdestotrotz sollte dieses zu Lasten des Versorgers gehende Volumen ermittelt werden, um das Potential zur Wasserverlustreduktion abschätzen und die aktuelle Tarifgestaltung prüfen zu können.

In der angepassten Wasserbilanz wird somit die Komponente *System Input Volume* Q_{SIV} unterteilt in *Authorised Supply* Q_S und *Water Losses* Q_L . *Authorised Supply* Q_S beinhaltet die gesamte Rohrnetzabgabe und wird weiter unterschieden in *Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS} und *Unbilled Authorised Supply* Q_{US} . Q_{BS} umfasst das gesamte Wasservolumen, das an die den Fixtarif zahlenden Kunden effektiv abgegeben und daher als abgerechnet angenommen wird. Dieses Volumen wird dann weiter unterteilt in das Volumen der beiden Sub-Komponenten *Consumption* Q_{BSC} und *Wastage* Q_{BSW} . Volumina, die an nicht abgerechnete Kunden, Einrichtungen oder öffentlichen Zapfstellen abgegeben oder vom Wasserversorgungsunternehmen für den Eigenbedarf, z.B. Leitungsspülungen, genutzt werden, sind in Übereinstimmung mit der IWA-Bilanz unter der Komponente *Unbilled Authorised Supply* Q_{US} zusammengefasst. Auf eine Unterscheidung in gemessene und ungemessene Komponenten der Netzabgabe wird in der angepassten Bilanz verzichtet. Da keine flächendeckende Abdeckung des Versorgungsgebiets mit Kundenwasserzählern zur Messung des abgegebenen Wasservolumens vorhanden ist, kann diese Zuordnung in der Bilanz nicht schlüssig erfolgen.

Die Komponenten *System Input Volume* Q_{SIV} , *Water Losses* Q_L und *Real Water Losses* Q_{RL} ändern sich gegenüber der IWA-Bilanz nicht, da in intermittierend betriebenen Wasserversorgungssystemen dieselben Verlustarten wie bei der kon-

tinuierlichen Versorgung auftreten. Die Komponente *Apparent Water Losses* Q_{AL} umfasst im Gegensatz zur IWA-Bilanz lediglich die Sub-Komponente *Unauthorised Consumption* Q_{ALC} . Die beiden anderen Sub-Komponenten *Metering Inaccuracies* und *Systematic Data Handling Errors* sind in der angepassten Bilanz nicht aufgeführt. Grund dafür sind die fehlenden Wasserzähler bei den Kunden und die damit nicht auf Zählerablesungen basierenden Kundenabrechnung. Nichtsdestotrotz sollten bekannte Zählerabweichungen, Schleichverluste, Abgrenzungsverluste sowie Datenhandhabungsfehler bereits bei der Quantifizierung von *System Input Volume* Q_{SIV} und *Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS} berücksichtigt werden.

Eine weitere wichtige Anpassung ist aufgrund der Ausgestaltung des Fixtarifs erforderlich. Wie bereits beschrieben, ist dieser meist auf ein bestimmtes Volumen pro Abrechnungszeitraum festgelegt, das jedoch unabhängig vom tatsächlich an die Kunden abgegebenen Wasservolumen ist. Um dennoch die Komponenten der Einkünfte (*Revenue Water* Q_{RW}) sowie der keine Einkünfte generierenden Wasservolumina (*Non-Revenue Water* Q_{NRW}) ermitteln und mit den anderen Bilanzkomponenten vergleichen zu können, werden alle sich je nach Ausgestaltung des Fixtarifs ergebenden Szenarien in die angepasste Wasserbilanz integriert (Abbildung 5.2).

Bei Szenario 1 wird genau das an die Kunden abgegebene Wasservolumen in Rechnung gestellt und von diesen bezahlt. Somit entspricht das Volumen von *Revenue Water* Q_{RW} dem von *Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS} . In Szenario 2 wird den Kunden mehr als das effektiv abgegebene Wasservolumen in Rechnung gestellt und von diesen bezahlt. Dadurch ist das Volumen von Q_{RW} größer als das von Q_{BS} . Die Differenz zwischen beiden Volumina wird in der angepassten Bilanz als Komponente *Excess Revenue Water* Q_{ERW} angegeben. Dieses Volumen wurde in der Realität nicht an die Kunden abgegeben, sondern diesen nur in Rechnung gestellt. Dies führt zu einem Überschuss des Einkommen generierenden Wasservolumens. Bei Szenario 3 wird den Kunden weniger als das effektiv abgegebene Wasservolumen in Rechnung gestellt und von diesen bezahlt. Daher ist das Volumen von Q_{RW} kleiner als das von Q_{BS} . Die Differenz der beiden Volumina wird als Komponente *Billed Non-Revenue Water* Q_{BNRW} in der angepassten Bilanz ausgewiesen. Diese stellt den Teil des an die Kunden abgegebenen Wasservolumens dar, der dem Versorger keine Einkünfte generiert, aus dessen Sicht aber über den Fixtarif als abgerechnet gilt. Abbildung 5.3 veranschaulicht die drei Szenarien.

Mit Hilfe der angepassten Wasserbilanz können somit zum einen die Bilanzkomponenten quantifiziert werden, die für die technischen Bereiche des Wasserversorgers besonders relevant sind, wie z.B. Wasserverluste im Verteilungssystem und im Kundenbereich (Wasserverschwendung). Zum anderen kann evaluiert werden, ob der Wasserversorger die Kunden gemäß dem tatsächlich abgegebenen Wasservolumen abrechnet oder zu viel oder zu wenig Wasservolumen in Rechnung stellt. Diesbezüglich ist zu beachten, dass bei Szenario 2 der Wasserversorger durch das Volumen des *Excess Revenue Water* Q_{ERW} das insgesamt abgerechnete Wasservolumen „künstlich“ vergrößern und damit seine Bilanz hinsichtlich dem Volumen des *Non-Revenue Water* Q_{NRW} beschönigen kann (Abbildung 5.2). Aus technischer Sicht bleiben jedoch die Volumina von *Unbilled Authorised Supply* Q_{US} und der *Water Losses* Q_L ,

5.5 Verfahren zur Ermittlung und Bewertung der Bilanzkomponenten

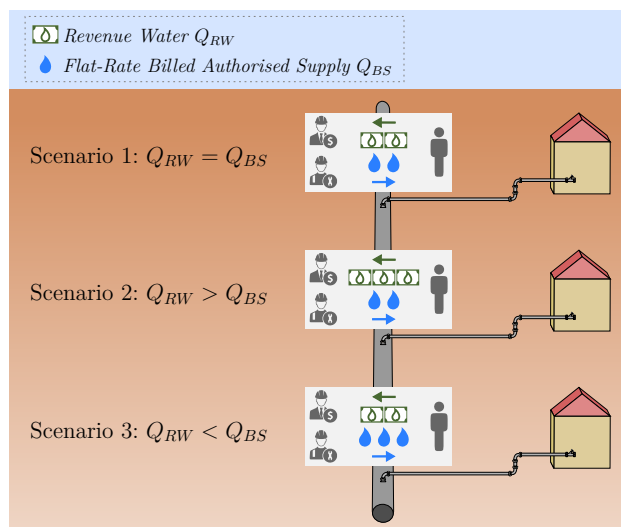


Abbildung 5.3: Mögliche Szenarien bezüglich des Verhältnisses von Q_{RW} und Q_{BS}

deren Reduktion das Ziel des Versorgers sein sollte, unverändert. Daher sollte im Hinblick auf die Entwicklung einer Strategie zur Wasserverlustreduktion aus technischer Sicht das tatsächliche Volumen der *Water Losses* Q_L und nicht das des *Non-Revenue Water* Q_{NRW} im Fokus stehen.

Außerdem sind hinsichtlich der Komponente *Revenue Water* Q_{RW} folgende Aspekte zu beachten: Vor allem in Entwicklungsländern ist der Fixtarif zum Teil deutlich zu gering ausgelegt. Dadurch sind die Kapital-, Betriebs-, Wartungs- und Verwaltungskosten des Wasserversorgers nicht gedeckt und Subventionierungen erforderlich. Demzufolge kann der Erlös durch das *Revenue Water* Q_{RW} nicht mit dem Erlös gleichgesetzt werden, der zur Kostendeckung oder Gewinnerwirtschaftung notwendig wäre. Außerdem sollte berücksichtigt werden, dass unter Umständen ein Teil des Volumens von Q_{RW} , das den Kunden in Rechnung gestellt wird, von diesen aufgrund mangelhafter Zahlungsmoral oder zu geringem Einkommen nicht oder erheblich zeitverzögert, evtl. erst im nächsten Bilanzzeitraum, bezahlt wird (Wyatt, 2010). Dies bedeutet, dass das innerhalb eines Bilanzzeitraums Erlöse generierende Wasservolumen in der Realität geringer sein kann als das in diesem Zeitraum in Rechnung gestellte Wasservolumen.

5.5 Verfahren zur Ermittlung und Bewertung der Bilanzkomponenten

5.5.1 Zielsetzung

Die Konzeption einer angepassten Wasserbilanz erfordert auch die Entwicklung angepasster Verfahren zur Ermittlung und Bewertung der einzelnen Bilanzkomponenten. Dabei sind zwingend die technischen, institutionellen und finanziellen Rand-

bedingungen der entsprechenden Wasserverteilungssysteme zu berücksichtigen, die Einfluss auf die Anwendbarkeit der Verfahren haben. Dazu zählen die bislang fehlende Erfassung der Betriebsdaten zur Wasserverlustbilanzierung, die oftmals eingeschränkten finanziellen und personellen Ressourcen der Wasserversorgungsunternehmen sowie der Einfluss der intermittierenden Betriebsweise auf die in der Wasserversorgung eingesetzte Messtechnik.

Um die entsprechenden Messdaten für die Verfahren zur Komponentenermittlung zu erheben, sollte ein Monitoringsystem konzipiert werden, das mit möglichst geringen Einsatzmitteln zu implementieren und betreiben ist. Mit diesem Monitoringsystem sollen die Systemeinspeisung, die Rohrnetzabgabe sowie die im Kundenbereich tatsächlich verbrauchten sowie verschwendeten Wassermengen möglichst genau erfasst werden. Des Weiteren sollte ein Werkzeug bereitgestellt werden, mit dessen Hilfe die regelmäßig erhobenen Daten des Monitoringsystems zur regelmäßigen Wasserbilanzerstellung ausgewertet werden können.

5.5.2 Stichprobenmessung und Einfluss von Luft auf Zählermessungen

5.5.2.1 Allgemeines

Das Monitoringsystem zur Messung der Rohrnetzabgabe sowie des häuslichen Verbrauchs und Verschwendung (Bilanzkomponenten *Flat-Rate Billed Authorised Supply*, *Consumption* und *Wastage*) basiert auf einer repräsentativen Stichprobenmessung in ausgewählten Haushalten, um den Aufwand zur Installation und der regelmäßigen Auslesung von Kundenwasserzählern zu reduzieren. Anschließend werden die Messwerte auf das gesamte Bilanzierungsgebiet mittels statistischer Stichprobenverfahren hochgerechnet.

Bei der Anwendung dieses Verfahrens muss darauf geachtet werden, dass die Messung so genau wie möglich erfolgt, da sich Messabweichungen auf das Ergebnis der statistischen Hochrechnung und schlussendlich auf die Bilanzergebnisse auswirken. Daher sollten bekannte Messabweichungen der eingesetzten Kundenwasserzähler bereits bei der Anwendung der statistischen Schätzverfahren berücksichtigt und deren Ergebnisse diesbezüglich korrigiert werden. Ein wichtiger Aspekt ist hierbei die intermittierende Betriebsweise mit alternierender Befüllung und Entleerung des Leitungsnetzes, wodurch die Messgenauigkeit der Wasserzähler aufgrund der Luftströmung in den Rohrleitungen beeinflusst wird.

Im folgenden Abschnitt wird daher zunächst auf die Anwendung von statistischen Stichprobenverfahren sowie die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen zur Messabweichung durch Luftströmung eingegangen. Im Anschluss daran werden dann die angepassten Verfahren zur Ermittlung der entsprechenden Bilanzkomponenten in den Abschnitten 5.5.3 bis 5.5.9 vorgestellt.

5.5.2.2 Statistische Stichprobenverfahren

Das Hauptziel der induktiven Statistik ist nach Toutenburg und Heumann (2008), „durch geeignete Verfahren von der Stichprobe auf die Grundgesamtheit zu schließen und die Sicherheit der Schlussfolgerung abzuschätzen [...]“. Im Rahmen dieser Arbeit sollte anhand von Stichprobenmessungen bei ausgewählten Haushalten die gesamte Rohrnetzabgabe an die Kunden geschätzt und die Genauigkeit dieser Schätzung bewertet werden. Zur Anwendung statistischer Stichprobenverfahren muss zunächst das zu untersuchende Merkmal der Grundgesamtheit bestimmt werden, über das eine Aussage getätigt werden soll. Zudem muss der Umfang der Grundgesamtheit bekannt sein, aus der die Stichprobe gezogen wird. Im Anwendungsfall ist das zu untersuchende Merkmal die Rohrnetzabgabe an die Haushalte im Bilanzierungsgebiet und -zeitraum. Die Grundgesamtheit ist die Gesamtanzahl der Haushalte, an die eine Rohrnetzabgabe erfolgt.

Stichprobenverfahren bezeichnen die Vorgehensweise, mit der eine Stichprobe aus der Grundgesamtheit ausgewählt wird. Um Rückschlüsse von der Stichprobe auf das zu untersuchende Merkmal der Grundgesamtheit ziehen zu können, auch statistische Inferenz genannt, muss die Auswahl der Stichprobe repräsentativ und zufällig sein. Repräsentativität bedeutet, dass die Stichprobe eine möglichst ähnliche Zusammensetzung wie die Grundgesamtheit besitzt. Diese Zusammensetzung bezieht sich auf relevante Merkmale, von denen angenommen wird, dass sie Einfluss auf das zu untersuchende Merkmal haben (Bortz und Döring, 2006). Im Anwendungsfall wird beispielsweise angenommen, dass das Merkmal Haushaltsgröße, d.h. die Anzahl der Bewohner, Einfluss auf die Höhe der Rohrnetzabgabe an die einzelnen Haushalte hat. Somit sollte die Zusammensetzung der ausgewählten Haushalte in der Stichprobe möglichst der in der Grundgesamtheit in Bezug auf die Haushaltsgrößen ähneln.

Bei Gewährleistung einer zufälligen Stichprobenauswahl kann für jedes Element der Grundgesamtheit eine Wahrscheinlichkeit angegeben werden, dass dieses Element in eine Stichprobe aufgenommen wird. Ebenso kann für jede mögliche Stichprobe die Wahrscheinlichkeit quantifiziert werden, aus der Grundgesamtheit gezogen zu werden. Somit lassen sich mittels der Wahrscheinlichkeitsrechnung statistische Rückschlüsse auf Merkmale der Grundgesamtheit ziehen (Kauermann und Küchenhoff, 2011). Die zuletzt genannte Bedingung kann jedoch in der Praxis selten erfüllt werden (Bortz und Döring, 2006).

Im Anwendungsfall müssten beispielsweise alle Haushalte mit Kundenwasserzähler zur Messung der Rohrnetzabgabe ausgestattet sein, um jede beliebige und zufällige Zusammensetzung der Stichprobe zur Schätzung der Rohrnetzabgabe zu ermöglichen. Dies ist im gegebenen Fall aufgrund der in Abschnitt 5.2 beschriebenen Randbedingungen nicht möglich. Außerdem wäre bei einer flächendeckenden Messung an allen Haushalten die Ermittlung der gesamten Rohrnetzabgabe direkt möglich und würde den Einsatz von Stichprobenverfahren hinfällig machen. Um dennoch die Bedingungen einer repräsentativen und zufälligen Stichprobe im Anwendungsfall so gut wie möglich zu erfüllen, muss bei der Auswahl der Stichprobenhaushalte darauf geachtet werden, dass das Auswahlverfahren nicht in direktem

Zusammenhang mit dem zu untersuchenden Merkmal der Rohrnetzabgabe steht und somit das Ergebnis des statistischen Verfahrens verzerrt (Kauermann und Küchenhoff, 2011). Beispielsweise sollte die Auswahl der Haushalte nicht basierend auf einer möglichen Vorkenntnis oder Erwartungswerten bezüglich der Höhe der Rohrnetzabgabe an einzelne Haushalte erfolgen.

Einfache Zufallsstichprobe: Das Verfahren der einfachen Zufallsstichprobe stellt die fundamentalste Form der Stichprobenverfahren dar und ist Basis weiterer, komplexerer Verfahren. Die Anwendung dieses Verfahrens basiert auf den Voraussetzungen, dass jedes Element der Grundgesamtheit die gleiche Auswahlwahrscheinlichkeit hat und die Auswahl der Stichprobe aus der Grundgesamtheit jeweils unabhängig voneinander erfolgt. Die Stichprobenauswahl gleicht einem Zufallsexperiment, bei dem sich bei gleichen Wiederholungsbedingungen verschiedene Ergebnisse aufgrund des Zufalls ergeben können (Toutenburg und Heumann, 2008). Somit wird das zu untersuchende Merkmal in der Grundgesamtheit vom Umfang N als Zufallsvariable X angesehen, deren wahre Verteilung und wahren Verteilungsparameter wie z.B. der Mittelwert oder die Varianz unbekannt ist. Um diese Verteilung bzw. Verteilungsparameter der Grundgesamtheit schätzen zu können, wird eine Zufallsstichprobe vom Umfang n aus der Grundgesamtheit ausgewählt. Dadurch entsteht eine zufällige Auswahl von Merkmalsträgern X_1, \dots, X_n aus der Grundgesamtheit, wobei den Ausprägungen der Merkmalsträger reelle Werte x_i zugeordnet werden (Kohn, 2005). Im Anwendungsfall sind die Merkmalsträger die einzelnen Haushalte, an die eine Rohrnetzabgabe erfolgt, und die Merkmalsausprägung ist der mögliche Wert der Rohrnetzabgabe an den jeweiligen Haushalt, z.B. 120 Liter am Tag.

Um nun anhand genau einer Stichprobe, wie in den meisten Anwendungsfällen gegeben, eine Schätzung der unbekannt Parameter der Grundgesamtheit unter Angabe der Schätzgenauigkeit durchführen zu können, ist zunächst die Betrachtung eines theoretischen Verteilungsmodells erforderlich (Auer und Rottmann, 2015). Dieses soll im Folgenden näher erläutert werden, da das Verständnis dieses Modells essentiell für die korrekte Interpretation von Ergebnissen ist, die basierend auf Stichprobenverfahren ermittelt wurden.

Für das theoretische Verteilungsmodell wird angenommen, dass alle möglichen Stichproben vom Umfang n aus der Grundgesamtheit N ausgewählt werden können. Ebenso seien die Verteilungsparameter der Grundgesamtheit, der Mittelwert μ und die Varianz σ^2 bzw. die Standardabweichung σ bekannt. Für jede zufällige Stichprobenauswahl wird nun mittels einer Stichprobenfunktion eine zusammenfassende Kenngröße, beispielsweise der Stichprobenmittelwert, ermittelt. Die Stichprobenfunktion ist selbst eine Zufallsvariable, da sie je nach realisierter Stichprobe unterschiedliche Werte annehmen kann. Die Menge aller ermittelter Stichprobenmittelwerte bildet daher eine Wahrscheinlichkeitsverteilung, die die Variation des Stichprobenmittelwerts abbildet (Auer und Rottmann, 2015). Diese Verteilung ist aufgrund des zentralen Grenzwertsatzes bekannt. Dieser besagt, dass sich bei ausreichend großem Stichprobenumfang die Verteilung einer Zufallsvariablen, in diesem Fall des

Stichprobenmittelwerts, approximativ einer Normalverteilung annähert, und zwar unabhängig von der Verteilung der Grundgesamtheit. Als Faustregel wird für einen ausreichend großen Stichprobenumfang in der Literatur meist $n > 30$ angegeben (Bortz und Döring, 2006; Auer und Rottmann, 2015). Der zentrale Grenzwertsatz besagt außerdem, dass bei wiederholten Stichproben der Erwartungswert des Mittelwerts $E(\bar{X})$ über all diese Stichproben hinweg dem Mittelwert μ der Grundgesamtheit entspricht (Gleichung 5.1). Des Weiteren stimmt die Standardabweichung $\sigma_{\bar{X}}$ der Stichprobenverteilung des Mittelwerts, auch Standardfehler genannt, mit der Standardabweichung der Grundgesamtheit σ , dividiert durch die Wurzel des Stichprobenumfangs n , überein (Gleichung 5.2). Mit zunehmendem Stichprobenumfang nimmt daher der Standardfehler des Stichprobenmittels ab (Kohn, 2005).

$$E(\bar{X}) = \mu \quad (5.1)$$

$$\sigma_{\bar{X}} = \sqrt{\frac{\sigma^2}{n}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (5.2)$$

Dies soll anhand eines Beispiels, angelehnt an ein Beispiel aus Bortz und Döring (2006), verdeutlicht werden. Gegeben sei eine Grundgesamtheit an Haushalten in einem Versorgungsgebiet, an die eine Rohrnetzabgabe erfolgt. Der bekannte Mittelwert der Rohrnetzabgabe in Liter pro Tag und Haushalt sei $\mu = 120$, die Varianz sei $\sigma^2 = 150$. Die in Abbildung 5.4 (oben) dargestellte Wahrscheinlichkeitsverteilung der Grundgesamtheit bezüglich des Merkmals Rohrnetzabgabe ist im Beispiel unregelmäßig und etwas linkssteil, daher nicht normalverteilt (Abbildung 5.4 oben). Aus der Grundgesamtheit werden nun wiederholt Stichproben von unterschiedlichem Umfang gezogen, zunächst mit $n = 2$. Anschließend wird für jede gezogene Stichprobe der Mittelwert \bar{x}_i ermittelt und daraufhin die Wahrscheinlichkeitsverteilung aller Mittelwerte gebildet. Der gleiche Prozess wird nun mit Stichproben vom Umfang $n = 5$ sowie $n = 20$ durchgeführt. Betrachtet man nun die jeweiligen Verteilungen der Stichprobenmittelwerte in Abbildung 5.4 (unten), so ist ersichtlich, dass zunächst unabhängig vom Stichprobenumfang die Verteilungen der Stichprobenmittelwerte um den wahren Mittelwert der Grundgesamtheit, in diesem Fall 120 Liter pro Tag und Haushalt, konzentriert sind. Außerdem ist zu erkennen, dass mit zunehmendem Stichprobenumfang die Verteilung der Stichprobenmittelwerte eine geringere Streuung um den Mittelwert aufweist, d.h. eine geringere Standardabweichung besitzt, und sich immer mehr einer Normalverteilung annähert (Bortz und Döring, 2006).

Diese angenäherte Normalverteilung kann nun zur Angabe von Wahrscheinlichkeiten genutzt werden. In Abbildung 5.5 (oben) ist die standardisierte Form der Normalverteilung von Stichprobenmittelwerten gegeben. Die Form der Kurve wird durch die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f(\bar{X})$ der Normalverteilung, deren exakte Formel nicht relevant für diese Arbeit ist und daher nicht ausformuliert wird, sowie die bekannten Parameter μ und σ der Grundgesamtheit bestimmt. Die resultierende Form ist glockenförmig und symmetrisch um das Maximum, den Mittel-

5 Entwicklung der angepassten Wasserverlustbilanzierung

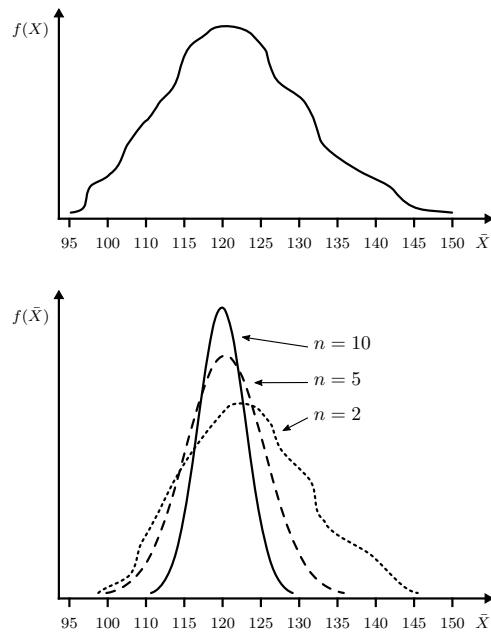


Abbildung 5.4: Verteilung der Rohrnetzabgabe in der Grundgesamtheit (oben) sowie der Stichprobenmittelpunkte (unten) nach Bortz und Döring (2006)

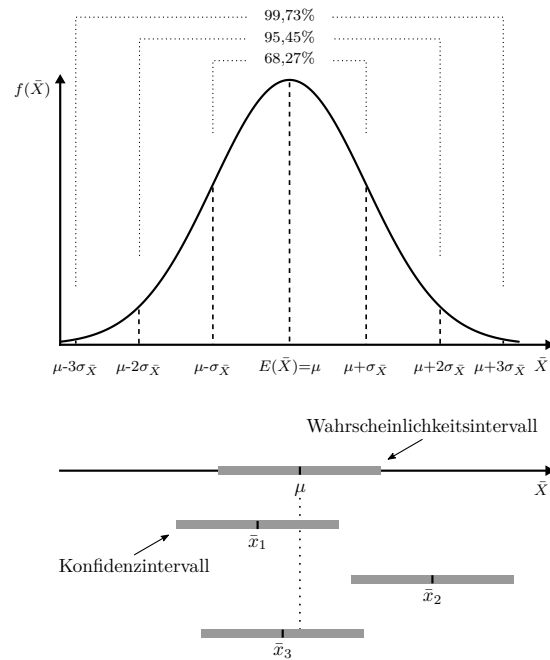


Abbildung 5.5: Standardform der Normalverteilung (oben) sowie Konfidenzintervalle von Stichprobenmittelpunkten (unten)

wert μ . Anhand der Flächenanteile unterhalb des Funktionsgraphen kann nun die Wahrscheinlichkeit angegeben werden, mit der Stichprobenmittelpunkte von zukünftigen Stichproben in einen bestimmten Wertebereich um den wahren Mittelwert μ der Grundgesamtheit enthalten sein werden (Auer und Rottmann, 2015). Dieser Bereich wird Wahrscheinlichkeitsintervall genannt, dessen obere und untere Grenze in Abhängigkeit der gewünschten Wahrscheinlichkeit als ein Vielfaches des Standardfehlers $\sigma_{\bar{X}}$ angegeben werden kann:

- Das Intervall mit der Abweichung $\pm \sigma_{\bar{X}}$ vom Erwartungswert $E(\bar{X})$ (entspricht Mittelwert μ der Grundgesamtheit) enthält 68,27 % aller Stichprobenmittelpunkte.
- Das Intervall mit der Abweichung $\pm 2\sigma_{\bar{X}}$ vom Erwartungswert $E(\bar{X})$ enthält 95,45 % aller Stichprobenmittelpunkte.
- Das Intervall mit der Abweichung $\pm 3\sigma_{\bar{X}}$ vom Erwartungswert $E(\bar{X})$ enthält 99,73 % aller Stichprobenmittelpunkte.

Diese Wahrscheinlichkeitsaussage über die Lage von Mittelwerten zukünftiger Stichproben bei bekannten Parametern der Grundgesamtheit kann nun auch für den umgekehrten Fall angewandt werden. In diesem Fall ist von Interesse, in welchem Intervall um den Mittelwert \bar{x}_i einer realisierten Stichprobe sich der wahre, unbekannte Mittelwert μ mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit befindet. Dieses In-

tervall, das als Konfidenzintervall bezeichnet wird, besitzt die gleiche Breite wie das entsprechende Wahrscheinlichkeitsintervall, da die Breite nur von dem Standardfehler $\sigma_{\bar{x}}$ des Stichprobenmittelwerts und nicht von der Lage von μ abhängt (Klemm, 2002).

Dies soll anhand von Abbildung 5.5 (unten) verdeutlicht werden. In dieser ist zunächst das Wahrscheinlichkeitsintervall um den wahren Mittelwert μ der Grundgesamtheit mit den entsprechenden Intervallgrenzen in Abhängigkeit der gewählten Wahrscheinlichkeit, in diesem Fall 95 %, abgebildet. Nun wird eine zufällige Stichprobe realisiert, der entsprechende Mittelwert \bar{x}_1 sowie das zugehörige 95%-Konfidenzintervall mit derselben Breite wie das Wahrscheinlichkeitsintervall von μ ermittelt und ebenfalls abgebildet. Daraus ist ersichtlich, dass sich der wahre Mittelwert μ der Grundgesamtheit innerhalb des Konfidenzintervalls um den Mittelwert \bar{x}_1 der Stichprobe befindet, falls sich der Mittelwert \bar{x}_1 der Stichprobe im Wahrscheinlichkeitsintervall vom wahren Mittelwert μ der Grundgesamtheit befindet. Werden nun unzählig viele Stichproben realisiert und um deren Mittelwerte jeweils das 95%-Konfidenzintervall bildet, so werden 95 % der Stichproben den unbekanntem Mittelwert μ der Grundgesamtheit in ihrem Konfidenzintervall enthalten und 5 % nicht (Klemm, 2002). Das Verständnis dieser Aussage ist elementar für die Interpretation einer Schätzung von unbekanntem Parametern einer Grundgesamtheit anhand einer Stichprobe und soll daher anhand von Abbildung 5.5 (unten) weiter verdeutlicht werden. In dieser sind die Realisierungen von zwei weiteren zufälligen Stichproben mit den Stichprobenmittelwerten \bar{x}_2 und \bar{x}_3 und den entsprechenden 95%-Konfidenzintervallen gegeben. Daraus wird ersichtlich, dass der Stichprobenmittelwert \bar{x}_3 den unbekanntem Parameter μ der Grundgesamtheit mit seinem Konfidenzintervall überdeckt, während sich im Fall des Stichprobenmittelwerts \bar{x}_2 der Parameter μ außerhalb von dessen Konfidenzintervall befindet. Bei der Betrachtung und Interpretation des Konfidenzintervalls einer realisierten Stichprobe muss daher immer bedacht werden, dass dieses Intervall den wahren Parameter entweder enthält oder nicht. Es kann lediglich eine Aussage darüber getroffen werden, wie wahrscheinlich jeweils eine der beiden Möglichkeiten ist.

Basierend auf den in den vorherigen Abschnitten vermittelten Kenntnissen des theoretischen Normalverteilungsmodells können nun anhand einer empirischen Stichprobe die unbekanntem Parameter der Merkmalsverteilung in der Grundgesamtheit mittels geeigneter Verfahren geschätzt und die Genauigkeit der Schätzungen quantifiziert werden. Als Schätzverfahren dienen die Punkt- und Intervallschätzung. Im Rahmen dieser Verfahren werden Schätzfunktionen bestimmt, die die realisierten Merkmalsausprägungen der Stichprobe vom Umfang n zu konkreten Schätzwerten für die unbekanntem Parameter der Grundgesamtheit verdichten. Die Schätzfunktion, die die Vorschrift zur Berechnung des Schätzwerts darstellt, wird mit einem Dach notiert. Bei der Punktschätzung werden in den meisten Anwendungsfällen der Stichprobenmittelwert sowie die Stichprobenvarianz zur Schätzung der unbekanntem Parameter in der Grundgesamtheit ermittelt (Toutenburg und Heumann, 2008). Die in Gleichung 5.3 gegebene Schätzfunktion $\hat{\mu}$ dient der Ermittlung des bestmöglichen Schätzwerts für den Mittelwert μ der Grundgesamtheit. Der Schätzwert ist

der Stichprobenmittelwert \bar{x} , der anhand der Merkmalsausprägungen x_1, \dots, x_n einer realisierten Stichprobe vom Umfang n gemäß Gleichung 5.3 berechnet wird.

$$\hat{\mu} = \bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.3)$$

Mittels der Schätzfunktion $\hat{\sigma}^2$ wird die Varianz der Grundgesamtheit σ^2 durch den Wert der Stichprobenvarianz s^2 sowie dem bekannten Umfang der Grundgesamtheit N und dem Stichprobenumfang n gemäß Gleichung 5.4 geschätzt. Die Stichprobenvarianz ist die mittlere quadratische Abweichung der Merkmalsausprägungen x_1, \dots, x_n der realisierten Stichprobe vom Stichprobenmittelwert \bar{x} und damit ein Maß für die Streuung der einzelnen Merkmalsausprägungen.

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{N-n}{N} \cdot s^2 = \frac{N-n}{N} \cdot \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (5.4)$$

Da die Punktschätzung aufgrund der Zufallsauswahl der Stichprobe stets mit einem zufälligen Fehler behaftet ist, wird diese mit der Angabe eines Konfidenzintervalls (Intervallschätzung) ergänzt. Dazu wird zunächst der Standardfehler $\hat{\sigma}_{\bar{x}}$ des Stichprobenmittelwerts gemäß Gleichung 5.5 ermittelt. Anschließend werden unter Annahme der Normalverteilung des Stichprobenmittelwerts die obere und untere Grenze des Konfidenzintervalls $[g_u(\bar{x}), g_o(\bar{x})]$ für eine gegebene Wahrscheinlichkeit ermittelt. Für die in den meisten Anwendungsfällen angegebene Wahrscheinlichkeit von 95 % erfolgt dies gemäß Gleichung 5.6. Dieses Intervall soll den unbekanntem, wahren Mittelwert der Grundgesamtheit mit einer hohen Wahrscheinlichkeit von 95 % enthalten. Das Konfidenzintervall dient somit der Beschreibung der Genauigkeit einer Schätzung. Je schmaler das Intervall, desto geringer ist der Standardfehler und somit genauer die Schätzung und umgekehrt.

$$\hat{\sigma}_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\hat{\sigma}^2}{n}} = \sqrt{\frac{N-n}{N} \cdot \frac{s^2}{n}} \quad (5.5)$$

$$[g_u(\bar{x}), g_o(\bar{x})]_{95\%} = [\bar{x} - 1,96 \cdot \hat{\sigma}_{\bar{x}}, \bar{x} + 1,96 \cdot \hat{\sigma}_{\bar{x}}] \quad (5.6)$$

Geschichtete Zufallsstichprobe: Im Vergleich zur einfachen Zufallsstichprobe wird bei der geschichteten Zufallsstichprobe die Grundgesamtheit in disjunkte, d.h. nicht überlappende, Teilgrundgesamtheiten (Schichten) aufgeteilt. Anschließend wird in jeder dieser Teilgrundgesamtheiten eine separate einfache Zufallsstichprobe ausgewählt. Zur Schätzung der Parameter der Grundgesamtheit werden die ermittelten Werte der einzelnen Stichproben zu Gesamtschätzwerten zusammengefasst. Die Schichtung erfolgt anhand eines zusätzlichen Merkmals, das mit dem zu untersuchenden Merkmal in Zusammenhang steht und dessen Verteilung in der Grundgesamtheit bekannt sein muss (Kauermann und Küchenhoff, 2011). Im Anwendungsfall wird beispielsweise davon ausgegangen, dass die Haushaltsgröße im Zusammenhang

mit der Höhe der Rohrnetzabgabe an die jeweiligen Haushalte steht. So wird an einen Haushalt mit einer Größe von zehn Personen in der Regel eine höhere Rohrnetzabgabe erfolgen als an einen Haushalt mit nur einer Person. Daher wird die Grundgesamtheit aller Haushalte, an die eine Rohrnetzabgabe erfolgt, in mehrere Schichten unterteilt, beispielsweise in Schicht 1 mit einem bis drei Personen, Schicht 2 mit vier bis sechs Personen und Schicht 3 mit sieben oder mehr Personen pro Haushalt.

Ziel der geschichteten Zufallsstichprobe ist die Erhöhung der Schätzgenauigkeit durch eine geeignete Schichtung. Diese soll derart erfolgen, dass zum einen die Merkmalsausprägungen innerhalb jeder Schicht möglichst ähnlich sind und somit die Standardabweichung bzw. der Standardfehler innerhalb jeder Schicht gering ist. Zum anderen sollen die Unterschiede zwischen den Schichten möglichst groß sein, d.h. dass zwischen den Stichprobenmittelwerten der einzelnen Schichten möglichst große Unterschiede bestehen (Heeringa u. a., 2010).

Ein weiterer Vorteil der geschichteten gegenüber der einfachen Zufallsstichprobe ist der Schutz vor einer sehr unausgewogenen Stichprobe. In Bezug zum Beispiel im vorherigen Abschnitt kann es bei einer einfachen Zufallsstichprobe dazu kommen, dass in der ausgewählten Stichprobe kein Haushalt mit sieben oder mehr Personen vertreten ist, obwohl diese Haushalte möglicherweise einen erheblichen Anteil an der Grundgesamtheit ausmachen. Dies würde zu einer reduzierten Repräsentativität der Stichprobe führen. Bei der geschichteten Stichprobe dagegen wird aus jeder Schicht eine Zufallsstichprobe ausgewählt und somit sichergestellt, dass jede Schicht der Grundgesamtheit in der gesamten Stichprobe vertreten ist (Lohr, 2009).

Die Auswahl einer geschichteten Zufallsstichprobe soll anhand des in Abbildung 5.6 dargestellten Beispiels verdeutlicht werden. In diesem ist auf der linken Seite eine Grundgesamtheit mit einem Gesamtumfang N von 14 Merkmalsträgern gegeben. Die Grundgesamtheit wird nun anhand eines zusätzlichen Merkmals in vier Schichten unterteilt und die Merkmalsträger entsprechend zugeordnet. Dadurch ergeben sich die entsprechenden Teilgrundgesamtheiten mit den Umfängen N_1, \dots, N_4 . Die Merkmalsträger werden mit X_{hi} notiert. Der Index h gibt dabei an, in welcher Schicht ($h = 1, \dots, H$) der Merkmalsträger sich befindet. Der Index i kennzeichnet den Merkmalsträger als i tes Element innerhalb einer Schicht. Aus jeder Teilgrundgesamtheit wird nun jeweils eine einfache Zufallsstichprobe, im Folgenden Teilstichprobe genannt, vom Umfang n_h ausgewählt. Im Beispiel werden zufällig vier Teilstichproben mit einem Gesamtumfang von $n = 7$ gezogen, wobei die Stichprobenumfänge n_1, \dots, n_4 der einzelnen Schichten proportional zu den Umfängen der Teilgrundgesamtheiten (Verhältnis 1:2) sind.

Anhand der realisierten Merkmalsträger x_{hi} der Teilstichproben wird nun durch die Schätzfunktion $\hat{\mu}$ der Schätzwert \bar{x}_{GS} , der Gesamtmittelwert der geschichteten Stichprobe, gemäß Gleichung 5.7 ermittelt. Dazu wird für jede Schicht vom Umfang n_h der jeweilige Mittelwert \bar{x}_h berechnet. Anschließend wird der Gesamtmittelwert

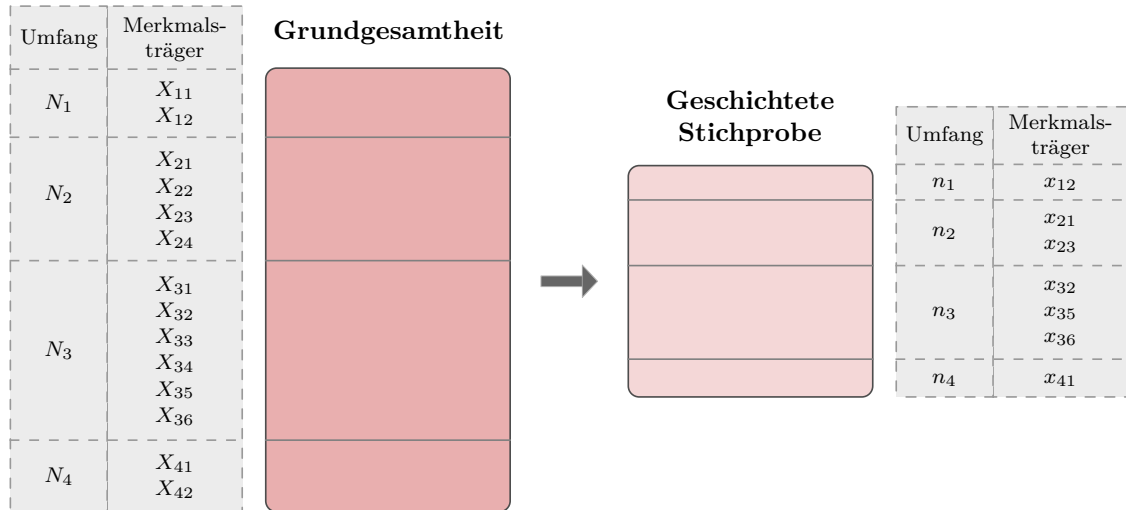


Abbildung 5.6: Ziehung einer geschichteten Zufallsstichprobe

der Stichprobe bestimmt, indem die gewichtete Summe der Mittelwerte über alle Schichten H gebildet wird.

$$\hat{\mu}_{GS} = \bar{x}_{GS} = \sum_{h=1}^H \frac{N_h}{N} \cdot \bar{x}_h = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^{n_h} \frac{N_h}{N} \cdot \frac{x_{hi}}{n_h} \quad (5.7)$$

Durch die Gewichtung mit der relativen Schichtungsgröße N_h/N wird der Schätzwert \bar{x}_{GS} im Falle von unausgewogenen Teilstichproben automatisch korrigiert (Holt und Smith, 1979). Wenn beispielsweise eine Teilgrundgesamtheit N_2 im Vergleich zu einer Teilgrundgesamtheit N_1 nur sehr wenige Merkmalsträger besitzt und aus beiden Teilgrundgesamtheiten Stichproben mit dem gleichen Umfang ausgewählt werden, wäre in der geschichteten Stichprobe die Teilgrundgesamtheit N_1 unter- und die Teilgrundgesamtheit N_2 überrepräsentiert. Diese Verzerrung des Schätzwertes wird durch den Gewichtungsfaktor N_h/N korrigiert.

Um den Standardfehler der geschichteten Stichprobe zu bestimmen, wird zunächst über die in Gleichung 5.8 gegebene Schätzfunktion $\hat{\sigma}_{h,GS}^2$ der Schätzwert $s_{h,GS}^2$ für die Varianz in den einzelnen Schichten bestimmt.

$$\hat{\sigma}_{h,GS}^2 = \frac{N_h - n_h}{N_h} \cdot s_{h,GS}^2 = \frac{N_h - n_h}{N_h} \cdot \frac{1}{n_h - 1} \cdot \sum_{i=1}^{n_h} (x_{hi} - \bar{x}_h)^2 \quad (5.8)$$

Der Standardfehler $\hat{\sigma}_{\bar{x},GS}$ der geschichteten Stichprobe kann dann gemäß Gleichung 5.9 berechnet werden.

$$\hat{\sigma}_{\bar{x},GS} = \sqrt{\sum_{h=1}^H \left(\frac{N_h}{N}\right)^2 \cdot \frac{\hat{\sigma}_{h,GS}^2}{n_h}} = \sqrt{\sum_{h=1}^H \left(\frac{N_h}{N}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{n_h} - \frac{1}{N_h}\right) \cdot s_{h,GS}^2} \quad (5.9)$$

Bei Betrachtung von Gleichung 5.9 wird deutlich, dass der Standardfehler nur von den Varianzen $s_{h,GS}^2$ innerhalb der einzelnen Schichten abhängt, während der Standardfehler der einfachen Zufallsstichprobe sowohl die Varianz innerhalb als auch zwischen den einzelnen Schichten beinhaltet. Somit wird bei geeigneter Schichtung eine höhere Präzision der Schätzung aufgrund eines reduzierten Standardfehlers erreicht (Heeringa u. a., 2010).

Bei der geschichteten Zufallsstichprobe ist neben der Festlegung der Schichten auch die Aufteilung des Stichprobenumfangs auf die einzelnen Schichten von Bedeutung. Dabei wird häufig die proportionale Aufteilung angewandt, bei der die Teilstichprobenumfänge proportional zu den Schichtgrößen N_h in der Grundgesamtheit sind. Somit hat jeder Merkmalsträger die gleiche Auswahlwahrscheinlichkeit, um für die Stichprobe ausgewählt zu werden (Heeringa u. a., 2010).

Im Anwendungsfall jedoch waren die Schichtgrößen N_h erst nach der Auswahl der Stichprobenhaushalte zur Messung der Rohrnetzabgabe bekannt und daher folgte die Auswahl der Haushalte dem Prinzip einer einfachen Zufallsstichprobe. Um nach Erhebung der Schichtgrößen dennoch eine mögliche Erhöhung der Schätzgenauigkeit durch den Schichtungseffekt im Vergleich zur einfachen Zufallsstichprobe zu überprüfen, kann auf das Prinzip der nachträglich geschichteten Zufallsstichprobe zurückgegriffen werden (Holt und Smith, 1979). Dabei werden die zufällig ausgewählten Merkmalsträger der Stichprobe nach ihrer Auswahl den einzelnen Schichten zugeordnet. In diesem Fall ist jedoch die Aufteilung der Stichprobe auf die einzelnen Schichten zufällig und nicht proportional. Diese Zufälligkeit kann Auswirkungen auf die Stichprobenvarianz haben. Allerdings zeigen Holt und Smith (1979), dass sich bei ausreichendem Stichprobenumfang n die resultierende Aufteilung der Stichprobe einer proportionalen Aufteilung annähert. Daher ist die Berechnung des Standardfehlers gemäß Gleichung 5.9 auch für die nachträglich geschichtete Stichprobe zulässig.

Das Konfidenzintervall um den Mittelwert \bar{x}_{GS} der nachträglich geschichteten Stichprobe wird wie im Fall der einfachen Zufallsstichprobe in Abhängigkeit der gewünschten Wahrscheinlichkeit ermittelt. Unter Annahme der Normalverteilung des Stichprobenmittelwerts wird die untere und obere Grenze des 95%-Konfidenzintervalls $[g_u(\bar{x}), g_o(\bar{x})]_{95\%,GS}$ gemäß Gleichung 5.10 bestimmt.

$$[g_u(\bar{x}_{GS}), g_o(\bar{x}_{GS})]_{95\%,GS} = [\bar{x}_{GS} - 1,96 \cdot \hat{\sigma}_{\bar{x},GS}, \bar{x}_{GS} + 1,96 \cdot \hat{\sigma}_{\bar{x},GS}] \quad (5.10)$$

Im Abgleich mit dem ermittelten Konfidenzintervall der einfachen Zufallsstichprobe kann nun evaluiert werden, ob die nachträgliche Schichtung der Zufallsstichprobe zu dem gewünschten Schichtungseffekt mit einem geringeren Standardfehler und somit zu einer präziseren Schätzung des unbekanntem Mittelwerts der Grundgesamtheit führt.

Stichprobenumfang: Im Rahmen der Stichprobenverfahren stellt sich auch die Frage nach der Größe des Stichprobenumfangs. Anhand der Gleichungen 5.5 und 5.6 für die einfache Zufallsstichprobe sowie der Gleichungen 5.9 und

5.10 für die nachträglich geschichtete Zufallsstichprobe ist ersichtlich, dass mit zunehmendem Stichprobenumfang n bzw. n_h die Standardfehler kleiner und die Konfidenzintervalle somit schmaler werden. Dies führt schlussendlich zu einer Erhöhung der Schätzgenauigkeit. Daher ist aus rein statistischer Sicht eine möglichst große Stichprobe aus der Grundgesamtheit auszuwählen. Allerdings müssen in der Praxis auch stets vor allem die zeitlichen und finanziellen Rahmenbedingungen der Umsetzung einer Stichprobenauswahl berücksichtigt werden (Bortz und Döring, 2006). Die Festlegung des Stichprobenumfangs ist somit eine Abwägung zwischen gewünschter Genauigkeit der Schätzung und der Umsetzbarkeit in der Praxis.

Der erforderliche Stichprobenumfang n für eine gewünschte Genauigkeit der Schätzung lässt sich bei Kenntnis der Varianz σ^2 rechnerisch ermitteln. In vielen Anwendungsfällen ist σ^2 jedoch unbekannt und kann auch nicht durch die Stichprobenvarianz s^2 geschätzt werden, da die Bestimmung des Stichprobenumfangs naturgemäß vor der Realisierung der Stichprobe erfolgt. Somit liegen keine Werte zur Ermittlung der Stichprobenvarianz vor. Um dennoch den Stichprobenumfang approximativ bestimmen zu können, kann beispielsweise eine Pilotstichprobe von geringem Umfang ausgewählt und daraus der Wert für s^2 ermittelt werden. Eine weitere Alternative ist, auf Werte aus vorherigen oder ähnlichen Stichprobenerhebungen zurückzugreifen (Lohr, 2009; Kauermann und Küchenhoff, 2011).

Ist jedoch eine formale Herleitung des erforderlichen Stichprobenumfangs nicht möglich, muss dieser abgeschätzt werden. Dabei sollten zum einen die Repräsentativität der Stichprobe gewährleistet sein und zum anderen die oben erwähnten Rahmenbedingungen zur Umsetzung der Stichprobenauswahl berücksichtigt werden. Im Anwendungsfall beispielsweise war die Durchführung einer Pilotstichprobe vor der eigentlichen Stichprobenauswahl aus finanziellen und zeitlichen Gründen nicht möglich. Darüber hinaus waren keine Messwerte für die Rohrnetzabgabe aus vorherigen Studien im Pilotgebiet bzw. aus vergleichbaren Studien für Wasserverteilungssysteme mit den in Abschnitt 5.2 beschriebenen Randbedingungen verfügbar. Die dementsprechende Bestimmung des Stichprobenumfangs sowie die Umsetzung der Stichprobenauswahl im Pilotgebiet wird in Abschnitt 6.4.3 beschrieben.

Zusammenfassung Stichprobenverfahren: Stichprobenverfahren dienen dazu, anhand einer repräsentativen und zufälligen Stichprobe Rückschlüsse auf ein zu untersuchendes Merkmal einer Grundgesamtheit zu ziehen, beispielsweise die Rohrnetzabgabe an Haushalte in einem Versorgungsgebiet. Bei den Verfahren werden durch Punktschätzung (Mittelwert, Varianz) und Intervallschätzung (Konfidenzintervall) die bestmöglichen Schätzwerte für die unbekannt Parameter der Grundgesamtheit ermittelt. Dabei wird der geschätzte Mittelwert mit der Angabe eines Konfidenzintervalls ergänzt, um die Genauigkeit der Schätzung bewerten zu können. Ein 95%-Konfidenzintervall besagt beispielsweise, dass bei der Realisation von unzählig vielen Stichproben 95 % davon den wahren, unbekannt Mittelwert der Grundgesamtheit in ihrem Konfidenzintervall enthalten werden.

Bei den Verfahren können u.a. eine einfache oder geschichtete Zufallsstichprobe ausgewählt, die entsprechenden Punkt- und Intervallschätzungen durchgeführt und

abschließend die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Genauigkeit bewertet werden. Während bei der einfachen Zufallsstichprobe die Stichprobe aus der Grundgesamtheit ausgewählt wird, erfolgt bei der geschichteten Zufallsstichprobe zunächst die Unterteilung der Grundgesamtheit in mehrere Schichten. Dadurch entstehen mehrere Teilgrundgesamtheiten, aus denen dann jeweils eine zufällige Teilstichprobe ausgewählt wird. Ziel der Schichtung ist die Gewährleistung einer repräsentativen Stichprobe sowie die Erhöhung der Schätzgenauigkeit.

Um eine bestimmte Schätzgenauigkeit zu erreichen, ist ein dementsprechender Stichprobenumfang erforderlich. In der Praxis lässt sich dieser Umfang jedoch meistens nicht vor der Stichprobenauswahl formal herleiten und exakt bestimmen. Daher muss der erforderliche Umfang geschätzt werden, wobei vor allem zeitliche und finanzielle Randbedingungen, die den realisierbaren Stichprobenumfang begrenzen, berücksichtigt werden müssen.

5.5.2.3 Experimentelle Untersuchung der Messabweichung durch Luftstrom

Die intermittierende Betriebsweise von Wasserverteilungssystemen mit alternierender Befüllung und Entleerung führt zum Eintrag von Luft in die Rohrleitungsnetze. Sind die zeitlichen Abstände zwischen einer Entleerung und der anschließenden Befüllung groß genug, kann sich das Rohrleitungsnetz größtenteils bzw. vollständig entleeren. Grund hierfür sind die privaten Speichertanks im Kundenbereich, in denen die Kunden möglichst viel Wasser aus dem Leitungsnetz für eine möglichst kontinuierliche häusliche Wasserversorgung speichern (Marchis u. a., 2010). Zudem tragen bestehende Leckagen im Leitungsnetz zu einer Entleerung der Rohrleitungen bei. Bei einer erneuten Befüllung des Leitungsnetzes muss das Luftvolumen zwangsweise aus den Leitungen ausgetragen werden. Neben dem Austritt aus möglichen Entlüftungsventilen sowie Leckagen wird dies vor allem über die Hausanschlüsse erfolgen. Dadurch ergibt sich ein Luftstrom durch die Hauswasserzähler, der im Fall von den in der Wasserversorgung häufig eingesetzten mechanischen Einstrahl-Flügelradzählern zu einer Messabweichung der Zähler führt. Da bezüglich der Quantifizierung der Messabweichung durch Luftstrom keine Studien existierten, wurden im Rahmen dieser Arbeit die Konzeption und Umsetzung einer experimentellen Studie zur Untersuchung dieses Phänomens begleitet. Die folgenden Ausführungen und Abbildungen basieren größtenteils auf der vom Verfasser dieser Arbeit als Co-Autor getätigten Veröffentlichung (Walter u. a., 2016).

Versuchskonzeption und -ablauf: Der Prozess der Füllung des Leitungsnetzes sowie der dadurch bedingte Luftaustrag wurden in einem Experiment idealisiert nachgestellt. Dabei beschränkte sich die Betrachtung auf den Füllungsprozess einer Hausanschlussleitung, d.h. der Luftstrom in der Versorgungsleitung wurde nicht untersucht. Parameter der Untersuchung waren der anstehende Leitungsdruck sowie das Luftvolumen in der Anschlussleitung oberstrom des Flügelradzählers, da nur dieses Volumen durch den Zähler ausgetragen wird und somit eine Messabweichung bewirkt. Beide Parameter wurden zur Untersuchung

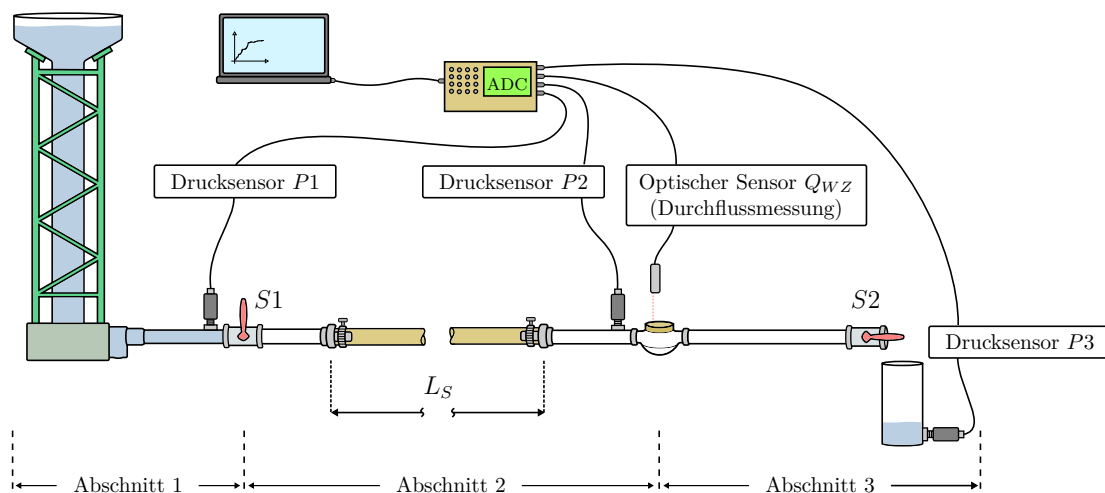


Abbildung 5.7: Versuchsaufbau und Messkonzeption

ihres Einflusses auf die Messabweichung im Rahmen des Experiments variiert und während einzelner Messungen vereinfacht als konstant angenommen.

In Abbildung 5.7 ist der Aufbau des Versuchs, bei dem der Luftstrom aufgrund der Bewegung der Wassersäule durch eine Hausanschlussleitung während dem Füllungsprozess beobachtet wurde, schematisch dargestellt. Die Hausanschlussleitung hatte einen Durchmesser von $1,95\text{ cm}$ bzw. $3/4$ Zoll, da in der Fallstudie in Indien der Großteil der Anschlussleitungen diesen Durchmesser aufwies. Die Messstrecke des Versuchsstands war in mehrere Abschnitte untergliedert. Der erste Abschnitt wurde unterstrom durch den Schieber $S1$ begrenzt, dieser trennte vor Beginn einer Messung den wassergefüllten Teil der Anschlussleitung von dem luftgefüllten Teil unterstrom des Schiebers. Der zweite Abschnitt verlief von Schieber $S1$ bis zum Wasserzähler WZ und stellte den luftgefüllten Leitungsabschnitt dar, aus dem mit Beginn der Bewegung der Wassersäule das entsprechende Luftvolumen durch den Zähler ausgetragen wurde. Zur Variation des Luftvolumens konnten über Rohrfittings faserverstärkte PVC-Schläuche mit variierenden Längen L_S in diesen Abschnitt eingesetzt werden. Der dritte Abschnitt beinhaltete den Teil der Anschlussleitung unterstrom des Wasserzählers mit dem Schieber $S2$. Unterstrom des Schiebers $S2$ wurde ein Tank mit definierter Geometrie installiert, in dem das während einer Messung durch die Anschlussleitung geflossene Wasservolumen aufgefangen wurde. Oberstrom der eigentlichen Messstrecke war diese über einen Abzweig mit einem Wasserturm von 15 m Höhe verbunden, bei dem der Wasserspiegel und somit der in der Messstrecke anstehende Druck stufenlos bis zu maximal $1,5\text{ bar}$ eingestellt werden konnte.

Die Messtechnik umfasste neben einem Einstrahl-Flügelradzähler drei Drucksensoren sowie einen optischen Sensor. Der gemäß DIN (2014) geeichte, trockenlaufende Einstrahl-Flügelradzähler vom Typ ETKD-N der Firma ZENNER International GmbH & Co. KG besaß die Baugröße $Q_3 = 2,5$ sowie die Genauigkeitsklasse

R80H40V und entsprach den in der Fallstudie in Indien eingebauten Hauswasserzählern. Der optische Sensor diente der Ermittlung des Durchflusses Q_{WZ} , der vom Wasserzähler gemessen wurde. Dazu wurde der Durchlauf der einzelnen Rippen des Anlaufsterns des Zählers detektiert und über die Drehfrequenz der Durchfluss bestimmt. Zwei der drei piezoresistiven Drucksensoren dienten der Druckmessung in der Rohrleitung. Dabei war der Drucksensor $P1$ oberstrom des Schiebers $S1$ und der Drucksensor $P2$ oberstrom des Wasserzählers eingebaut. Der dritte Drucksensor $P3$ war am Tank unterstrom der Rohrleitung installiert und diente der Ermittlung des Wasserspiegels. Dadurch konnte das im Verlauf einer Messung in den Tank geflossene Volumen exakt bestimmt werden. Alle analogen Daten der installierten Messgeräte wurden synchron über einen Analog-Digital-Wandler (ADC) mit einer Auflösung von 12 Bits und einer Abtastfrequenz von 1.000 Hz aufgezeichnet und digitalisiert.

Der Versuchsablauf soll anhand einer exemplarischen Messung, die bei einer eingebauten Schlauchlänge $L_S = 5 \text{ m}$ durchgeführt wurde und deren Messergebnisse in Abbildung 5.8 dargestellt sind, beschrieben werden.

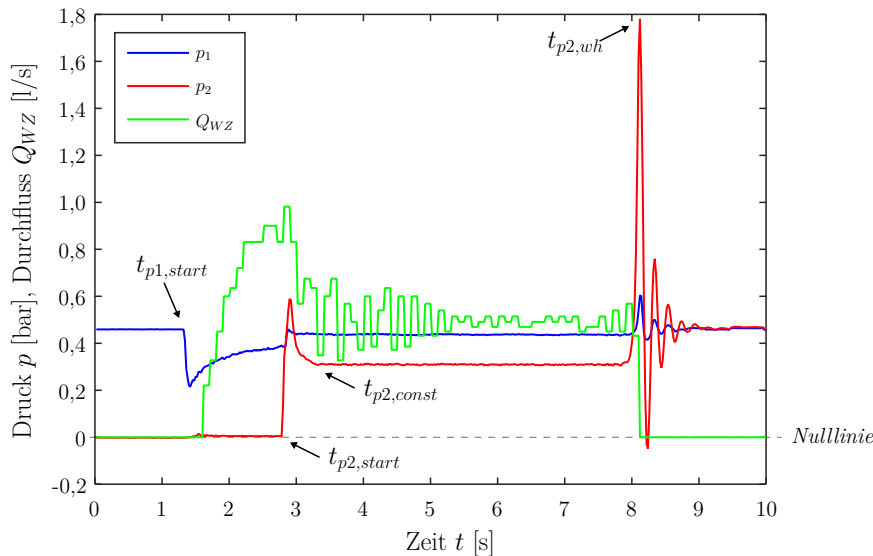


Abbildung 5.8: Druck- und Durchflussverlauf der exemplarischen Messung

Zunächst werden die zeitlichen Druckverläufe $p(t)$ an den Sensoren $P1$ und $P2$ betrachtet:

- *Zeitpunkt $t = 0 \text{ s}$:* Zu Beginn einer Messung steht, bei geschlossenem Schieber $S1$, im wassergefüllten Abschnitt der statische Druck durch den eingestellten Wasserspiegel im Wasserturm an. Im Beispiel betrug $p_{1,stat} = 0,46 \text{ bar}$. Im Bereich unterstrom von Schieber $S1$ herrscht der atmosphärische Druck $p_2 = p_{atm}$.
- *Zeitpunkt $t_{p1,start} = 1,34 \text{ s}$:* Bei Öffnung des Schiebers $S1$ beginnt die Wassersäule ihre Bewegung nach unterstrom. Dadurch fällt der Druck $p1$ zu diesem Zeitpunkt abrupt ab.

5 Entwicklung der angepassten Wasserverlustbilanzierung

- *Zeitpunkt* $t_{p2,start} = 2,80$ s: Bei Ankunft der Wasserfront am Wasserzähler steigt der Druck in der Leitung schlagartig an, was am Drucksensor $P2$ unmittelbar oberstrom des Zählers registriert wird. Der deutliche Ausschlag des Drucks bei $P2$ ist mit dem Auftreten von Druckstößen zu erklären, die beim Aufschlag der Wassersäule auf die Membran des Drucksensors sowie auf das Flügelrad des Zählers erfolgen.
- *Zeitpunkt* $t_{p2,const} = 3,32$ s: Zu diesem Zeitpunkt ist der Druck in der Anschlussleitung konstant.
- *Zeitpunkt* $t_{p2,wh} = 8,12$ s: Die Messung endet mit dem Schließen des Schiebers $S2$. Beim Schließen erfolgen erneut Druckstöße in der Leitung, die beim Sensor $P2$ einen deutlich höheren Ausschlag des Drucks hervorrufen als bei $P1$. Grund hierfür ist die dämpfende Wirkung des PVC-Schlauchs auf die Druckstoßausbreitung vom geschlossenen Schieber $S2$ aus zum Sensor $P1$.

Im Folgenden wird nun der in Abbildung 5.8 dargestellte Verlauf des gemessenen Durchflusses $Q_{WZ}(t)$ am Wasserzähler näher betrachtet:

- *Zeitpunkt* $t = 0$ s: Zu Beginn einer Messung herrscht bei geschlossenem Schieber $S1$ kein Durchfluss in der Leitung.
- *Zeitpunkt* $t = 1,62$ s: Unmittelbar nach Öffnung des Schiebers $S1$ wird am Wasserzähler ein Durchfluss aufgrund des Luftstroms registriert, der sich durch die am Schieber $S1$ in Bewegung setzende Wassersäule ergibt.
- *Zeitpunkt* $t_{p2,start} = 2,80$ s: Bis zu diesem Zeitpunkt steigt der Durchfluss abrupt und liegt bis zum Erreichen dieses Zeitpunkts deutlich höher als in dem nachfolgenden Zeitabschnitt, bei dem die Leitung mit Wasser gefüllt ist. Der hohe Durchfluss am Wasserzähler ergibt sich aus der hohen Geschwindigkeit der sich in Bewegung setzenden Wassersäule, die sich auf das Luftvolumen oberstrom des Wasserzählers überträgt.
- *Zeitpunkt* $t = 5,0$ s: Bis zu diesem Zeitpunkt verringert sich der Durchfluss aufgrund des Druckverlusts infolge des Aufschlages der Wasserfront auf das Zählerrad. Es ist eine Oszillation des Durchflusses erkennbar. Mögliche Gründe dafür können die inhomogene Geschwindigkeitsverteilung im angeströmten Zählerquerschnitt, der Impuls des Eintreffens der Wasserfront oder eingetragene Luftblasen im vorderen Teil der Wassersäule sein. Ab dem Zeitpunkt $t = 5,0$ s ist der Durchfluss relativ konstant.
- *Zeitpunkt* $t_{p2,wh} = 8,12$ s: Mit dem Schließen des Schiebers $S2$ fällt der Durchfluss abrupt auf den Nullwert ab.

Messabweichung durch Luftstrom: Im Zuge einer Messung nach dem im vorherigen Abschnitt beschriebenen Versuchsablauf ergab sich eine Messabweichung bezüglich dem vom Wasserzähler registrierten Wasservolumen V_{WZ} im Vergleich zu

dem tatsächlich durch den Zähler geflossenen Wasservolumen V_{real} . Letzteres umfasste zum einen das während der Messung in den Tank unterstrom der Anschlussleitung geflossene Wasservolumen. Dieses konnte über die Differenz zwischen dem vom Drucksensor $P3$ gemessenen Wasserspiegel zu Beginn und am Ende der Messung sowie der bekannten Tankgeometrie ermittelt werden. Zum anderen beinhaltete V_{real} das Volumen, das durch den Wasserzähler, jedoch aufgrund des Schließens von Schieber $S2$ nicht in den Tank geflossen war. Dieses Volumen konnte anhand der bekannten Länge des Abschnittes zwischen dem Wasserzähler und dem geschlossenen Schieber $S2$ sowie dem Leitungsquerschnitt berechnet werden.

Die ermittelte Messabweichung setzt sich aus mehreren Teilkomponenten mit unterschiedlichen Ursachen für die jeweilige Abweichung zusammen. Neben der Messabweichung durch Luftstrom, die als E_{air} definiert wurde, entstehen Messabweichungen durch die folgenden Ursachen:

- Impuls der aufschlagenden Wassersäule auf das Flügelrad.
- Eingetragene Luftblasen im vorderen Teil der Wassersäule.
- Instationärer Fließzustand und die damit verbundenen Trägheitskräfte der Flügelradbewegung.
- Stationärer Fließzustand, in dem eine zulässige Messabweichung innerhalb der gemäß den technischen Vorschriften festgelegten Grenzen vorliegt.
- Nachlaufverhalten des Zählers beim abrupten Stopp des Durchflusses mit Schließen des Schiebers $S2$.

Die Messergebnisse zeigten jedoch, dass die Summe der gelisteten Messabweichungen lediglich einen vernachlässigbar geringen Anteil ausmacht und sich die gesamte Messabweichung maßgeblich aufgrund der Messabweichung durch Luftströmung E_{air} ergibt. Diese ließ sich anhand der im Rahmen einer Messung erhobenen Daten eindeutig von den übrigen Teilkomponenten der gesamten Messabweichung trennen, da mit $t_{p1,start}$ und $t_{p2,start}$ die Zeitpunkte des Starts und des Endes des reinen Luftstroms durch den Zähler ermittelt werden konnten. Durch Integration des Durchflusses $Q_{WZ}(t)$ über diese Zeitspanne konnte das Volumen von E_{air} im Rahmen einer Messung bestimmt werden.

Um nun den Einfluss der Parameter Druck sowie Luftvolumen oberstrom des Wasserzählers auf die Höhe der Messabweichung E_{air} zu untersuchen, wurden beide Parameter im Rahmen von zwei Messreihen A und B variiert. Tabelle 5.1 gibt eine Übersicht über die untersuchten Versuchsparameter. Für beide Messreihen wurde jeweils ein baugleicher und geeichter Einstrahl-Flügelradzähler verwendet. Zur Variation des Luftvolumens oberhalb des jeweiligen Wasserzählers wurden Schläuche mit Längen zwischen 1 und 25 Metern eingesetzt, wobei in Messreihe A sechs und in Messreihe B acht verschiedene Schlauchlängen L_S untersucht wurden. Die daraus resultierenden Luftvolumina V_{air} im gesamten luftgefüllten Abschnitt oberstrom des Wasserzählers sind ebenfalls in Tabelle 5.1 angegeben. Der statische Druck $p_{1,stat}$ wurde von 0,1 bis maximal 1,0 *bar* in Schritten von 0,1 *bar* variiert. Höhere Drücke wurden nicht untersucht, da sich zum einen während der Messungen zeigte, dass es bei einem Druck von mehr als 1 *bar* zu derartigen Geschwindigkeitsänderungen des

Flügelrads kommt, dass diese einen erheblichen Messfehler in der Durchflussermittlung des Zählers bedingen. Zum anderen herrschen während der Füllung von Hausanschlussleitungen in intermittierend betriebenen Wasserverteilungssystemen durchwegs kleine Drücke und Druckgradienten. In Tiruvannamalai wurden beispielsweise ein maximaler Versorgungsdruck von 0,5 bar an den Anschlussleitungen gemessen.

Während der Messungen zeigte sich, dass bei niedrigen Drücken und einer nicht vollständig trockenen Zählermesskapsel der Wasserfilm in der Kapsel das Anlaufverhalten des Flügelrades bei Luftstrom beeinträchtigt. Daher wurde in jeder Messreihe neben der trockenen Messkapsel auch der Fall einer nassen Messkapsel bei Drücken von 0,1 bis 0,5 bar untersucht. Für jede mögliche Kombination der Versuchsparameter wurden jeweils drei Messungen durchgeführt und die Ergebnisse gemittelt.

Tabelle 5.1: Übersicht der Versuchsparameter

Reihe	Messkapsel	L_S [m]	V_{air} [l]	$p_{1,stat}$ [bar]
A	trocken	1; 2; 3; 5; 10;	0,48; 0,78; 1,08; 1,67;	0,1; 0,2; ...; 0,9; 1,0
	nass	25	3,17; 7,65	0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5
B	trocken	1; 2; 3; 5; 10;	0,48; 0,78; 1,08; 1,67;	0,1; 0,2; ...; 0,9; 1,0
	nass	15; 20; 25	3,17; 4,66; 6,15; 7,65	0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5

Die Ergebnisse und Auswertungen der Messungen sollen im Folgenden für den Fall der trockenen Messkapsel ausführlicher beschrieben werden, für den Fall der nassen Messkapsel folgt anschließend eine kurze Zusammenfassung. In Abbildung 5.9 sind die Ergebnisse der beiden Messreihen A und B bei trockener Messkapsel dargestellt. Die Diagramme zeigen die Messabweichung E_{air} in Abhängigkeit des Luftvolumens V_{air} für die untersuchten Drücke $p_{1,stat}$. Die Stützpunkte der Graphen entsprechen dabei jeweils den sechs bzw. acht untersuchten Luftvolumina V_{air} der Messreihen A und B. Für beide Messreihen zeigte sich, dass E_{air} größtenteils unabhängig vom anstehenden Druck $p_{1,stat}$ in der Anschlussleitung ist und somit nur vom Luftvolumen V_{air} oberstrom des Zählers abhängt. E_{air} vergrößert sich nahezu linear mit zunehmendem V_{air} , lediglich im unteren Bereich bei $V_{air} < 1,08$ l ist der Zusammenhang nicht linear. Im Fall von $p_{1,stat} = 0,1$ bar ist mit zunehmendem Luftvolumen V_{air} eine leichte Abweichung im Zusammenhang von E_{air} und V_{air} im Vergleich zu den Graphen der anderen untersuchten Drücken zu erkennen. Dies kann mit der während der Versuche beobachteten zunehmenden Ausbildung von zwei Wasserfronten im Rohrquerschnitt bei geringen Drücken und somit geringen Fließgeschwindigkeiten der Wassersäule erklärt werden. Bei $p_{1,stat} = 0,1$ bar war die Ausprägung der zwei Fronten und somit eines Luftvolumens über der ersten Front am signifikantesten. Dieses Volumen wurde jedoch nicht mehr der Messabweichung E_{air} zugeordnet, da aufgrund der Versuchskonzeption die Erfassung von E_{air} mit Ankunft der ersten Wasserfront bereits abgeschlossen war.

5.5 Verfahren zur Ermittlung und Bewertung der Bilanzkomponenten

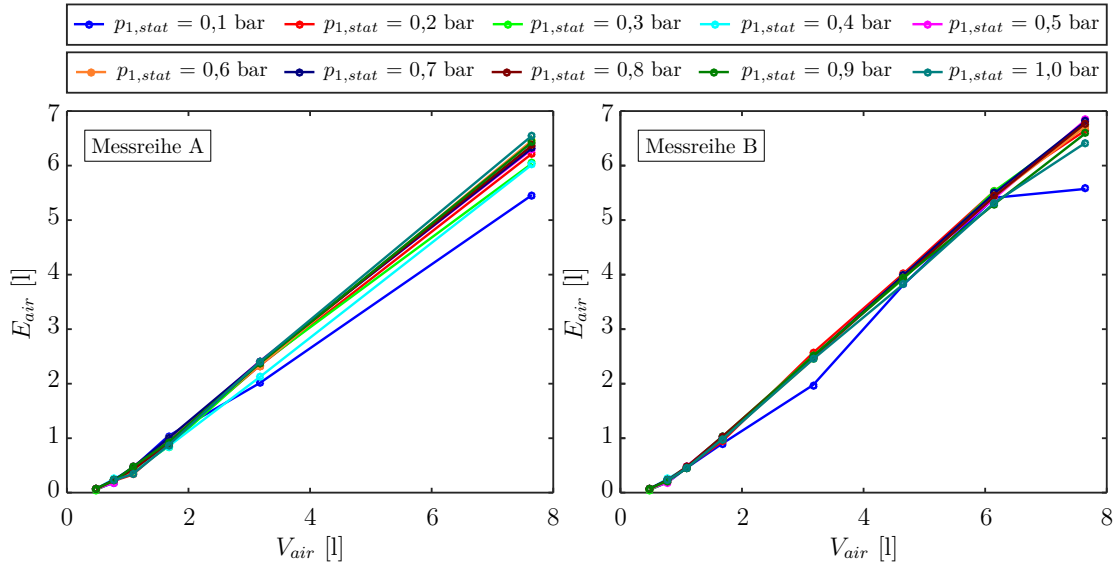


Abbildung 5.9: Messabweichung E_{air} in Abhängigkeit vom Luftvolumen V_{air} und Druck $p_{1,stat}$ für die Messreihen A und B bei trockener Messkapsel

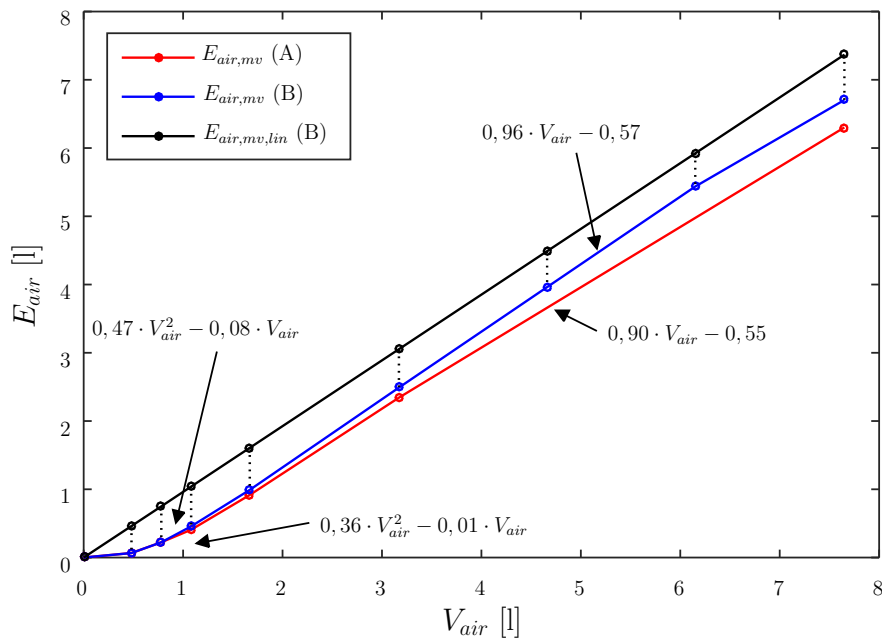


Abbildung 5.10: Messabweichung $E_{air,mv}$ in Abhängigkeit vom Luftvolumen V_{air} für die Messreihen A (rot) und B (blau) sowie theoretische Messabweichung $E_{air,mv,lin}$ für Messreihe B (schwarz) bei trockener Messkapsel

Für alle untersuchten Drücke größer als 0,1 bar lassen sich aufgrund der relativ hohen Unabhängigkeit der Messabweichung E_{air} vom anstehenden Leitungsdruck die in Abbildung 5.9 dargestellten Graphen der einzelnen Drücke zu einem Graphen

zusammenfassen. Dazu wurden für alle Stützpunkte der Graphen, d.h. für alle untersuchten V_{air} , die Mittelwerte $E_{air,mv}$ der Messabweichung gebildet. In Abbildung 5.10 sind die zusammenfassenden Graphen für die Messreihen A und B gegeben.

Die Steigungen der Graphen im linearen Bereich ab einem Luftvolumen $V_{air} \geq 1,08 \text{ l}$ betragen 90 % bzw. 96 % für die Messreihen A bzw. B. Allerdings beträgt der Anteil des Luftvolumens V_{air} , der die Messabweichung E_{air} bewirkt, nicht exakt 90 % bzw. 96 %, sondern ist leicht reduziert. In Abbildung 5.10 ist diesbezüglich bei Messreihe B zusätzlich der theoretische, lineare Verlauf von $E_{air,mv,lin}$ mit einer Steigung von 96 % gegeben, der durch den Ursprung verläuft. Daraus wird ersichtlich, dass der gemessene Verlauf von $E_{air,mv}$ der Messreihe B gegenüber dem theoretischen Verlauf um $0,57 \text{ l}$ vertikal nach unten verschoben ist. Dies lässt sich mit dem Anlaufverhalten des Flügelrads des Zählers erklären. Zu Beginn des Luftstroms müssen zunächst die Trägheitskräfte des Flügelrads überwunden werden, wobei bereits ein Teil des Luftvolumens durch den Zähler strömt und somit nicht von der Zählvorrichtung erfasst wird. Dementsprechend reduziert sich der Anteil des die Messabweichung E_{air} bewirkenden Luftvolumens V_{air} . Für die Messreihe A betrug diese Reduktion $0,55 \text{ l}$. Im Bereich $V_{air} < 1,08 \text{ l}$ sind die Verläufe von $E_{air,mv}$ für beide Messreihen nicht linear und der Abstand zwischen dem theoretischen Verlauf von $E_{air,mv,lin}$ und dem gemessenen Verlauf von $E_{air,mv}$ wird kleiner.

Aus den Ergebnisse der Messungen und deren Auswertung lassen sich die Gleichungen 5.11 und 5.12 zur Ermittlung der Messabweichung E_{air} in Abhängigkeit des Luftvolumens V_{air} für trockene Messkapseln und bei Drücken größer als $0,1 \text{ bar}$ ableiten.

$$E_{air} = 0,4 \cdot V_{air}^2 - 0,04 \cdot V_{air} \quad [l] \quad \text{für } V_{air} < 1,08 \text{ l} \quad (5.11)$$

$$E_{air} = 0,93 \cdot V_{air} - 0,56 \quad [l] \quad \text{für } V_{air} \geq 1,08 \text{ l} \quad (5.12)$$

Bei den Messungen mit nasser Messkapsel zeigten sich im Bereich der untersuchten Drücke zwischen $0,1$ und $0,5 \text{ bar}$ signifikante Unterschiede in den resultierenden Messabweichungen E_{air} in Abhängigkeit vom anstehenden Druck. Während sich für $p_{1,stat} \geq 0,3 \text{ bar}$ die Messabweichungen E_{air} den Werten der Messungen bei trockener Messkapsel annäherten, war die Messabweichung bei $p_{1,stat} = 0,1 \text{ bar}$ deutlich reduziert. Dies kann mit der im Vergleich zu höheren Drücken geringen Fließgeschwindigkeit der Luft zu Beginn der Messung erklärt werden. Während bei höheren Drücken die Anfangsgeschwindigkeit der ausströmenden Luft ausreichte um den Wasserfilm in der Messkapsel auszutragen, war dies bei $p_{1,stat} = 0,1 \text{ bar}$ nicht der Fall. Somit verblieb der Wasserfilm in der Messkapsel und beeinträchtigte während der gesamten Messung die Drehbewegung des Flügelrads des Zählers. Dadurch wurde das vom Zähler registrierte Luftvolumen, die Messabweichung E_{air} , signifikant gemindert. Bei einem Druck von $p_{1,stat} = 0,2 \text{ bar}$ ergaben sich Werte von E_{air} , die sich zum Teil im Bereich der Werte bei $0,1 \text{ bar}$ bzw. $0,3 \text{ bar}$ befanden. Daher wurde bei der Ableitung der Gleichungen 5.13, 5.14 und 5.15 zur Bestimmung der

Messabweichung E_{air} bei nasser Messkapsel auf die Betrachtung der Ergebnisse bei einem Druck von 0,2 bar verzichtet.

$$E_{air} = 0,11 \cdot V_{air} \text{ [l]} \quad \text{für } p_{1,stat} = 0,1 \text{ bar} \quad (5.13)$$

$$E_{air} = 0,19 \cdot V_{air} \text{ [l]} \quad \text{für } V_{air} < 1,08 \text{ l; } p_{1,stat} \geq 0,3 \text{ bar} \quad (5.14)$$

$$E_{air} = 0,76 \cdot V_{air} - 0,63 \text{ [l]} \quad \text{für } V_{air} \geq 1,08 \text{ l; } p_{1,stat} \geq 0,3 \text{ bar} \quad (5.15)$$

Zusammenfassung Messabweichung durch Luftstrom: In einem experimentellen Versuch wurde der Luftstrom durch eine in der indischen Fallstudie typischen Anschlussleitung mit Hauswasserzähler untersucht. Dabei konnte eine durch Luftströmung bedingte Messabweichung der in der Fallstudie eingesetzten Zähler beobachtet und quantifiziert werden. Die Auswertungen der Messergebnisse zeigten, dass die Höhe der Abweichung unabhängig vom anstehenden Leitungsdruck ist, insbesondere bei trockener Messkapsel des Zählers, und lediglich durch die Länge der Anschlussleitung und somit dem vorhandenen Luftvolumen oberstrom des Zählers bestimmt wird. Aus den experimentellen Untersuchungen konnten Gleichungen zur Bestimmung der Messabweichung durch Luftströmung abgeleitet werden. Die Gleichungen werden im Rahmen des Verfahrens zur Bestimmung der Komponente *Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS} angewandt, um die Werte der von den Zählern gemessenen Rohrnetzabgabe an die Stichprobenhaushalte um den Wert der Messabweichung durch Luftstrom zu korrigieren. Dies wird in Abschnitt 5.5.4 beschrieben. Zuvor wird im folgenden Abschnitt zunächst das Verfahren zur Ermittlung der Komponente *System Input Volume* Q_{SIV} erläutert, da diese Komponente den Ausgangspunkt der Wasserbilanz bildet.

5.5.3 System Input Volume

Zur Erstellung der angepassten Wasserbilanz muss zunächst das Volumen der Bilanzkomponente *System Input Volume* Q_{SIV} im Bilanzzeitraum, beispielsweise in Kubikmeter pro Jahr, ermittelt werden. In den folgenden Ausführungen wird im Sinne einer vereinfachten schriftlichen Darstellung von der Ermittlung der jeweiligen Bilanzkomponente XY und nicht von der Ermittlung des Volumens der Bilanzkomponente gesprochen. Die Bestimmung der Komponente *System Input Volume* Q_{SIV} erfolgt über die Messung mittels Großwasserzähler. Dabei ist sicherzustellen, dass die gesamte Einspeisung in das Bilanzierungsgebiet gemessen wird, d.h. alle Einspeisepunkte in das Gebiet müssen identifiziert und mit einem Zähler ausgestattet werden. Die eingesetzten Großwasserzähler sind gemäß ihrer Konzeption zu betreiben, um die Messabweichungen der Zähler so gering wie möglich zu halten.

Dies muss im Fall einer intermittierenden Betriebsweise eines Wasserverteilungssystems mit periodisch entleerten bzw. nur teilgefüllten Rohren berücksichtigt werden. Wie im vorherigen Abschnitt für mechanische Hauswasserzähler dargestellt führen Luftströmung sowie Zweiphasenströmungen von Wasser-Luft-Gemischen ebenso bei Großwasserzählern mit mechanischen Flügelrädern, beispielsweise Woltmannzählern, zu Messabweichungen. Auch Ultraschalldurchflussmessgeräte und magnetisch-induktive Durchflussmessgeräte sind für vollgefüllte Rohrleitungen konzipiert und werden durch den Einfluss von Luft in ihrer Messgenauigkeit beeinflusst (siehe Abschnitt 2.6.5.3). Daher sollte durch geeignete Maßnahmen der Einfluss von Luftströmung auf die Messgenauigkeit der eingesetzten Großwasserzähler so gut wie möglich minimiert werden.

Ein Beispiel zur Vermeidung von Lufteinfluss auf die Messung wird im Folgenden für die Erfassung der Systemeinspeisung aus einem Wasserturm gegeben. Das Messkonzept ist in Abbildung 5.11 dargestellt und wurde im indischen Projektgebiet umgesetzt (siehe Abschnitt 6.4.2). Zu Beginn eines Einspeisevorgangs aus einem Wasserturm in ein luftgefülltes Leitungsnetz ist davon auszugehen, dass eine Einspeisemessung an der Auslaufleitung von Luft bzw. einer Zweiphasenströmung beeinflusst wird. Daher erfolgt stattdessen die Installation eines Messgeräts an der Zulaufleitung des Wasserturms. Dabei kann das Gerät entweder direkt in die vertikale Steigleitung oder in einen horizontalen Leitungsabschnitt, der sich unterstrom eines vertikalen Abschnitts befindet, installiert werden. Damit wird am Messpunkt ein mit Wasser vollgefüllter Rohrquerschnitt sichergestellt.

Prinzipiell entspricht das gemessene, in den Behälter des Wasserturms geförderte Wasservolumen Q_{Pump} dem in das Leitungsnetz eingespeiste Volumen der Komponente *System Input Volume* Q_{SIV} . Allerdings muss berücksichtigt werden, dass ein Teil des zugeflossenen Wasservolumens durch Leckagen an der Behälterinfrastruktur oder Behälterüberläufe verloren gehen kann oder im Behälter verbleibt und somit nicht eingespeist wird. Daher ist das Monitoringsystem mit einem Messgerät zur kontinuierlichen Erfassung und Aufzeichnung des Wasserstandes im Behälter zu ergänzen. Anhand der Wasserstanddaten kann das Volumen der Überläufe (englisch: *Overflow*) durch Kenntnis der Tankgeometrie sowie dem Grenzwasserstand h_{OF} , ab dem der Überlauf aktiviert wird, quantifiziert werden. Dazu wird zunächst der Durchfluss in der Zulaufleitung vor dem Start des Überlaufvorgangs über die zeitliche Änderung des Wasserstands (h_{fill} , t_{fill}) und der Grundfläche A des Behälters bestimmt. Das Volumen des Überlaufvorgangs, das in Übereinstimmung mit der angepassten Wasserbilanz mit $Q_{RLT,OF}$ bezeichnet wird, kann dann durch Multiplikation dieses Durchflusses mit der Zeitspanne t_{OF} , in welcher der Wasserstand dem Grenzwasserstand des Überlaufs entspricht, ermittelt werden. Dies wird in Abbildung 5.11 veranschaulicht.

Zur schlüssigen Anwendung der Volumenbestimmung von Behälterüberläufen ist die Dichtheit des Behälters zu überprüfen, da austretende Wassermengen an Schadensstellen Einfluss auf den zeitlichen Verlauf der Behälterfüllung haben. Die Dichtheit kann anhand der Wasserstanddaten geprüft werden, indem die zeitliche Entwicklung des Wasserstands bei geschlossener Auslaufleitung (t_{closed}) des Behälters

5.5 Verfahren zur Ermittlung und Bewertung der Bilanzkomponenten

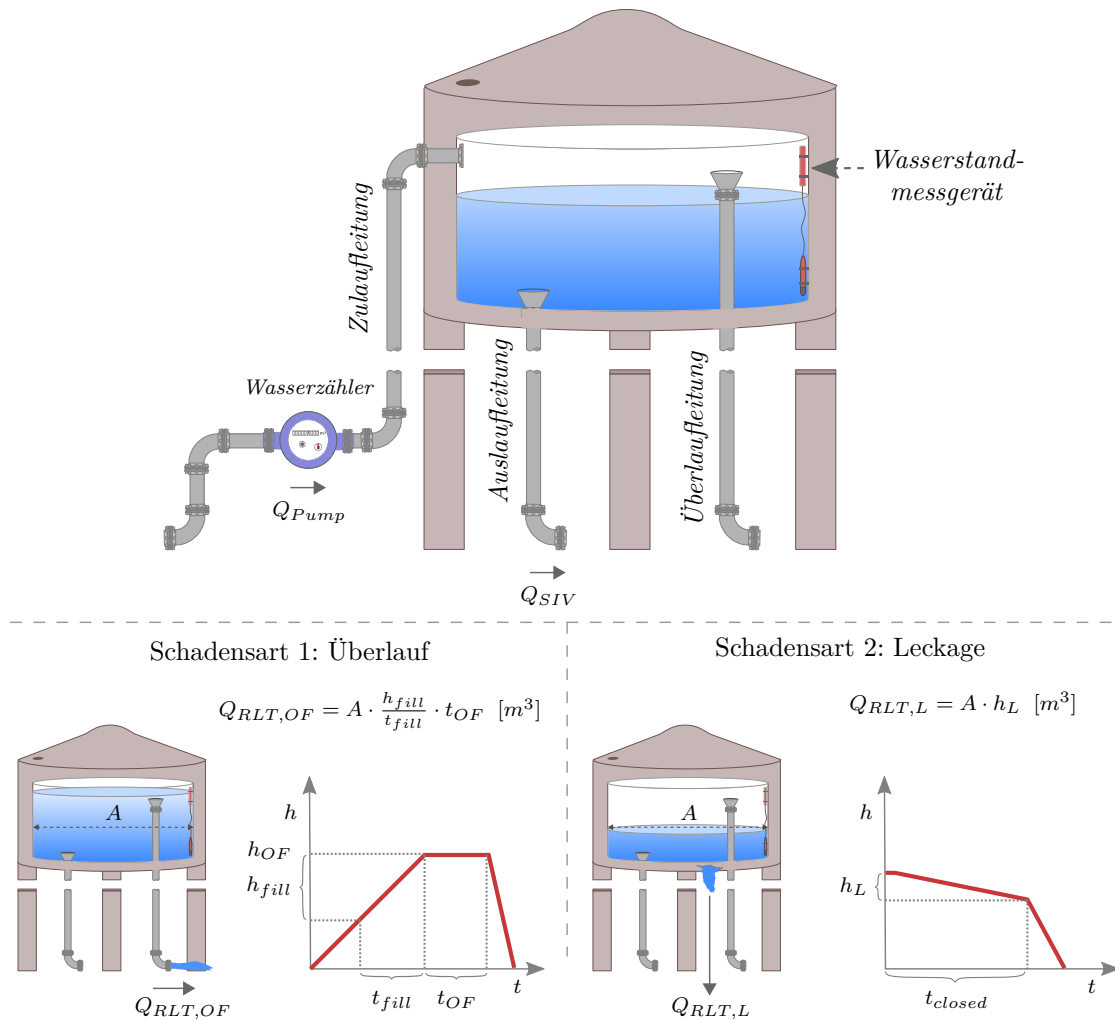


Abbildung 5.11: Monitoringkonzept am Wasserturm THESR

beobachtet wird. Ein Absinken des Wasserstandes vor dem Öffnen der Leitung weist auf Leckagen am Behälter hin. Allerdings ist hierbei zu beachten, dass ein Absinken des Wasserstands auch aufgrund eines undichten Absperrventils an der Auslaufleitung erfolgen kann. Dies stellt keinen Wasserverlust dar, da dieses Wasser in die Versorgungszone eingespeist wird. Daher ist zunächst die Dichtheit des Ventils zu prüfen. Die Quantifizierung des durch Behälterleckagen verursachten Verlustvolumens $Q_{RLT,L}$ erfolgt über die Multiplikation der Grundfläche A des Behälters mit der Änderung des Wasserspiegels h_L in der Zeitspanne t_{closed} , in der die Auslaufleitung geschlossen ist (Abbildung 5.11).

Durch das implementierte Monitoringkonzept kann somit neben dem Volumen der Komponente *System Input Volume* Q_{SIV} auch das Volumen der Komponente *Leakage and Overflows at Storage Tanks* Q_{RLT} am Wasserturm für die angepasste Wasserbilanz bestimmt werden. Q_{SIV} ergibt sich gemäß Gleichung 5.16 aus der

Differenz von Q_{Pump} und den Verlusten am Tank, d.h. der Summe aus $Q_{RLT,OF}$ und $Q_{RLT,L}$.

$$Q_{SIV} = Q_{Pump} - (Q_{RLT,OF} + Q_{RLT,L}) \quad [m^3] \quad (5.16)$$

Bei der Ermittlung des Einspeisevolumens in einem gewissen Bilanzzeitraum ist auf den Füllstand des Behälters zu Beginn sowie am Ende des Zeitraums zu achten. Ist beispielsweise der Behälter am Ende des Zeitraums komplett voll, ist dieses Volumen bereits durch den Wasserzähler an der Zulaufleitung geflossen und somit als Q_{Pump} gemessen. Das Volumen wurde jedoch nicht mehr im Bilanzzeitraum in das Leitungsnetz eingespeist und muss daher bei der Ermittlung von Q_{SIV} vom Gesamtvolumen von Q_{Pump} abgezogen werden.

5.5.4 Flat-Rate Billed Authorised Supply

5.5.4.1 Vorgehen

In Abbildung 5.12 ist das Vorgehen zur Ermittlung der Bilanzkomponente *Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS} dargestellt. Zunächst werden die zur Anwendung der Stichprobenverfahren erforderlichen Daten der Haushalte im Versorgungsgebiet erhoben. Anschließend erfolgen unter Berücksichtigung dieser Daten die Auswahl der Stichprobenhaushalte sowie die Installation der Wasserzähler zur Messung der Rohrnetzabgabe an diese Haushalte. Im letzten Schritt erfolgt die Schätzung der gesamten Rohrnetzabgabe im Bilanzzeitraum anhand der gemessenen Stichprobendaten. Da die gemessenen Werte aufgrund des Einflusses von Luftströmung verfälscht sind, erfolgt diesbezüglich die Korrektur des geschätzten Volumens, um schließlich das Gesamtvolumen der Bilanzkomponente *Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS} zu ermitteln. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte des Vorgehens näher erläutert.

5.5.4.2 Datenerhebung

Für die Anwendung der Stichprobenverfahren sind die Anzahl der an das Leitungsnetz angeschlossenen Haushalte und der Personen in den Haushalten, d.h. die Haushaltsgröße, wichtige Parameter. Sind diese Informationen nicht direkt über die Daten des Netzbetreibers oder anderen Quellen verfügbar, müssen diese mittels geeigneter Methoden wie beispielsweise einer umfangreichen Umfrage bei allen Haushalten im Versorgungsgebiet vor Ort erhoben werden. Der Vorteil einer solchen Umfrage ist, dass weitere Informationen über die Haushalte eingeholt werden können, die zu einer Verbesserung der Genauigkeit der Stichprobenverfahren führen können. Beispielsweise können neben der Haushaltsgröße auch die Verfügbarkeit von alternativen Wasserbezugsquellen wie öffentliche Zapfstellen oder private Bohrbrunnen sowie die Kapazität der privaten Speichertanks Einfluss auf die Rohrnetzabgabe an die Haushalte haben. Darüber hinaus kann im Rahmen von Haushaltssurveys bereits überprüft werden, ob die jeweiligen Einbaubedingungen für die Installation von Wasserzählern zur Messung der Rohrnetzabgabe gegeben sind.

5.5.4.3 Stichprobenauswahl

Unter Kenntnis der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Informationen erfolgt die Auswahl einer möglichst repräsentativen und zufälligen Stichprobe von Haushalten zur Messung der Rohrnetzabgabe im Versorgungsgebiet. Dazu muss zunächst der Stichprobenumfang bestimmt werden. Dieser lässt sich, wie in Abschnitt 5.5.2.2 beschrieben, nicht formal herleiten. Allerdings sollte eine Stichprobe, deren Umfang mindestens 5 % der Grundgesamtheit abdeckt, eine ausreichende Repräsentativität aufweisen (Quelle: Prof. Wolf-Dieter Heller, Lehrstuhl für Ökonomie und Statistik des KIT, mündliche Mitteilung vom 06.02.2014). Die Auswahl der Haushalte sollte derart erfolgen, dass die Zusammensetzung der Haushalte in der Stichprobe möglichst gut mit der Zusammensetzung in der Grundgesamtheit übereinstimmt, in diesem Fall in Bezug auf die Haushaltsgröße. Ist beispielsweise im Versorgungsgebiet die Anzahl der Haushalte mit weniger als drei sowie mit mehr als sechs Personen im Vergleich zu der Anzahl der Haushalte mit drei bis sechs Personen gering, sollten sich diese Verhältnisse auch dementsprechend in der Stichprobe widerspiegeln.

Bei der Auswahl ist darüber hinaus darauf zu achten, dass diese möglichst zufällig und nicht basierend auf Erwartungswerten des Wasserverbrauchs erfolgt, indem beispielsweise möglichst viele Haushalte mit einer zu erwartenden hohen Rohrnetzabgabe in die Stichprobe ausgewählt werden. Da in intermittierend betriebenen Wasserverteilungssystemen die Lage der Haushalte in Bezug zum Ort der Systeme

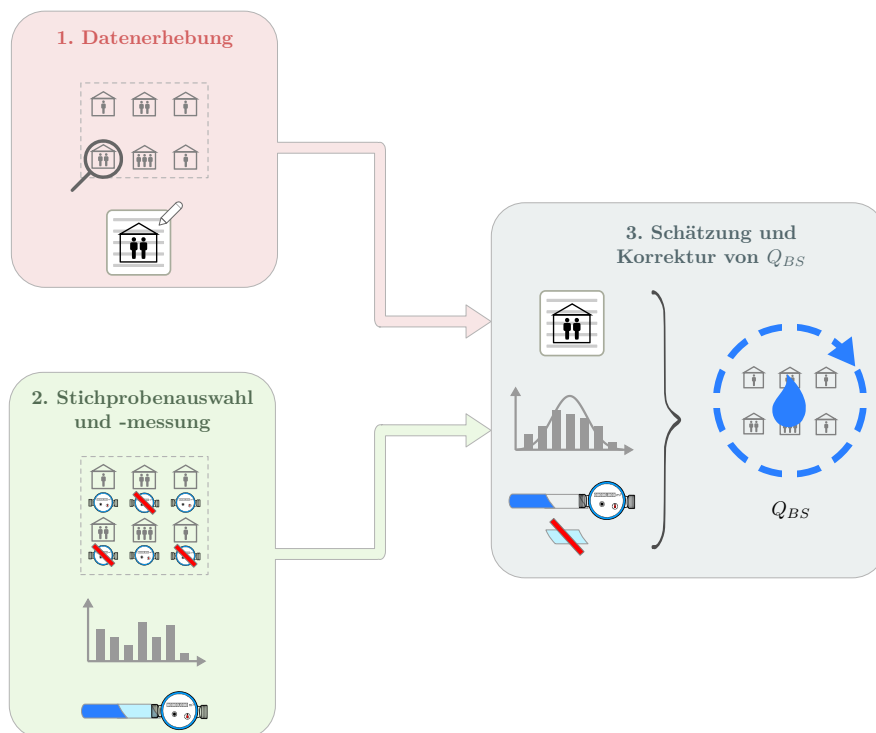


Abbildung 5.12: Vorgehen zur Ermittlung der Bilanzkomponente *Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS}

meinspeisung Einfluss auf das Volumen der Rohrnetzabgabe während einer Versorgungsperiode haben kann, sollten die Stichprobenhaushalte möglichst über das gesamte Versorgungsgebiet verteilt sein. So zeigte beispielsweise die Studie von Marchis u. a. (2010) die hohe Ungleichheit zwischen Haushalten in Bezug zu Dauer und Volumen der Rohrnetzabgabe während dem Füllungsprozess eines intermittierend betriebenen Versorgungsgebiets im Stadtgebiet Palermos in Italien.

Der Auswahlprozess der Stichprobenhaushalte sowie die geplante Installation und der Betrieb von Wasserzählern zur Messung der Rohrnetzabgabe sollte von Beginn an transparent mit den Bewohnern der Haushalte im Versorgungsgebiet kommuniziert werden. Dabei ist von entscheidender Bedeutung zu verdeutlichen, dass die installierten Zähler lediglich der Erfassung der Rohrnetzabgabe zur Wasserverlustanalyse und nicht der volumenabhängigen Kundenabrechnung dienen. Dadurch wird das Risiko einer Änderung des Verbrauchsverhaltens der Haushalte aufgrund der Zählerinstallation minimiert. Ebenso sollte kommuniziert werden, dass die Auswahl der Haushalte zufällig und nicht aufgrund vorhandener Informationen über die Bewohner oder deren Verbrauchsverhalten erfolgt. Durch die Kommunikation sollen mögliche Bedenken adressiert und Aversionen der Bewohner gegenüber der Wasserzählermessung vermieden werden. Die Zustimmung der Bewohner zur Zählerinstallation sollte zwingend eingeholt werden.

Vor der Installation der Zähler sollten die Einbaubedingungen an den ausgewählten Haushalten überprüft werden. Beispielsweise sollte sichergestellt sein, dass der Zähler oberstrom der ersten Verzweigung der Anschlussleitung im Kundenbereich installiert werden kann, um die Messung der kompletten Rohrnetzabgabe an den jeweiligen Haushalt sicherzustellen. Des Weiteren sollte darauf geachtet werden, dass der Zähler möglichst einfach zugänglich ist, um die regelmäßige Ablesung zu erleichtern.

Der Betrieb der Wasserzähler zur kontinuierlichen Messung sollte durch turnusmäßige Wartungsarbeiten begleitet sein. Beispielsweise ist regelmäßig zu kontrollieren, dass der Filter, der sich im Zähler oberstrom des Messgehäuses zum Schutz des mechanischen Flügelrades befindet, nicht durch Schmutz oder Ablagerungen zugesetzt ist und somit die Messgenauigkeit des Zählers beeinträchtigt.

5.5.4.4 Schätzung und Korrektur von *Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS}

Die Schätzung der Bilanzkomponente *Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS} erfolgt mittels der in Abschnitt 5.5.2.2 beschriebenen Stichprobenverfahren der einfachen sowie der nachträglich geschichteten Zufallsstichprobe und der anschließenden Korrektur des Schätzwertes hinsichtlich der Messabweichung durch Luftströmung. Zunächst wird für beide Verfahren der Mittelwert der Rohrnetzabgabe an die Stichprobenhaushalte gebildet und anschließend jeweils die Genauigkeit dieses geschätzten Kennwerts mittels dem Standardfehler und dem daraus resultierenden Konfidenzintervall quantifiziert. Für beide Verfahren kann die Mittelwertbildung sowie die Quantifizierung der Schätzgenauigkeit zum einen anhand der gemessenen Wassermengen pro Hausanschluss (Variante 1) und zum anderen anhand der Was-

sermengen pro Hausanschluss-Person (Variante 2) erfolgen. Bei Variante 2 werden mögliche hohe Abgabemengen an Haushalte mit hoher Bevölkerungszahl durch die Berechnung der Pro-Kopf-Mengen relativiert. Dadurch kann eine höhere Schätzgenauigkeit erzielt werden, wenn sich die Varianz aufgrund einer geringeren Streuung der Messwerte um den Mittelwert verringert. Somit ergeben sich bei zwei Stichprobenverfahren mit jeweils zwei Varianten vier Mittelwerte. Aus diesen wird dann derjenige Wert zur Ermittlung des gesamten Volumens der Rohrnetzabgabe verwendet, der das kleinste Konfidenzintervall und somit die höchste Schätzgenauigkeit aufweist.

Die Mittelwerte der Rohrnetzabgabe für das Verfahren der einfachen Stichprobe $\bar{Q}_{BS,ES}$ und der nachträglich geschichteten Stichprobe $\bar{Q}_{BS,GS}$ werden für jeweils beide Varianten gemäß den Gleichungen 5.17 und 5.18 anhand der realisierten Messwerte x_i der Rohrnetzabgabe in der Stichprobe berechnet. Bei der nachträglich geschichteten Stichprobe werden dazu zunächst die Messwerte x_{hi} den jeweiligen Schichten H zugeordnet und für jede Schicht der entsprechende Mittelwert \bar{x}_h ermittelt.

Die Bewertung der Schätzgenauigkeit erfolgt anhand des Standardfehlers und des 95%-Konfidenzintervalls der ermittelten Stichprobenmittelwerte. Diese werden gemäß den in Abschnitt 5.5.2.2 erläuterten Gleichungen 5.5 und 5.6 für die einfache Stichprobe und den Gleichungen 5.9 und 5.10 für die nachträglich geschichtete Stichprobe ermittelt. Die Hochrechnung auf das gesamte Volumen von $Q_{BS,air}$ erfolgt dann anhand des Mittelwerts mit der höchsten Schätzgenauigkeit, der gemäß Gleichung 5.19 mit dem Umfang der Grundgesamtheit N multipliziert wird. Der Umfang N ist dabei je nach Variante entweder die Gesamtanzahl der Hausanschlüsse (Variante 1) oder die Gesamtanzahl der Hausanschluss-Personen (Variante 2). Der Index *air* gibt dabei an, dass es sich um das noch nicht hinsichtlich der Messabweichung durch Luftströmung korrigierte Volumen von Q_{BS} handelt.

$$\bar{Q}_{BS,ES} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad [m^3] \quad (5.17)$$

$$\bar{Q}_{BS,GS} = \sum_{h=1}^H \frac{N_h}{N} \cdot \bar{x}_h = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^{n_h} \frac{N_h}{N} \cdot \frac{x_{hi}}{n_h} \quad [m^3] \quad (5.18)$$

$$Q_{BS,air} = N \cdot \bar{Q}_{BS,ES} \quad [m^3] \quad \text{bzw.} \quad Q_{BS,air} = N \cdot \bar{Q}_{BS,GS} \quad [m^3] \quad (5.19)$$

Zur Korrektur hinsichtlich der Messabweichungen durch Luftströmung wurde im Rahmen dieser Arbeit die Entwicklung eines Ansatzes zur Ermittlung dieser Zählerabweichungen in intermittierend betriebenen Verteilungssystemen begleitet. Der entwickelte Ansatz basiert auf den Ergebnissen der in Abschnitt 5.5.2.3 dargestellten experimentellen Untersuchungen. Um das Luftvolumen im Leitungsnetz zu bestimmen, das die Messabweichung der Hauswasserzähler bedingt, sollte neben den Leitungslängen und -durchmessern auch die Topographie des Versorgungsgebiets be-

rücksichtigt werden. Zwischen zwei Versorgungsperioden entleert sich das Leitungsnetz durch die geöffneten Hausanschlüsse der Kunden sowie mögliche Leckagen. Hinsichtlich des die Messabweichung bewirkenden Luftvolumens ist nun von Interesse, ob sich das Leitungsnetz vollständig entleert oder ein Teil der eingespeisten Wassermenge bis zur nächsten Befüllung im Leitungsnetz verbleibt. Im zweiten Fall wird sich das Wasser in den am tiefsten gelegenen Bereichen des Leitungsnetzes sammeln und daher bei der nächsten Befüllung kein Luftvolumen durch die Hausanschlüsse und somit die Zähler in diesen Bereichen ausgetragen. Somit müssen diese Bereiche von den höher gelegenen Bereichen des Versorgungsgebiets, in denen sich Luft im Leitungsnetz befindet, abgegrenzt werden. Dazu kann eine Höhengrenzlinie durch das Versorgungsgebiet definiert werden, bei der nur die Längen und Durchmesser der Leitungen in die Berechnung des für die Messabweichung relevanten Luftvolumens eingehen, die oberhalb der Grenzlinie liegen. Bei einer vollständigen Entleerung des Leitungsnetzes, wie in den folgenden Ausführungen dieser Arbeit angenommen, wird hingegen das Luftvolumen im gesamten Leitungsnetz bei der Ermittlung der Zählerabweichung durch Luftströmung berücksichtigt.

Die in Abschnitt 5.5.2.3 beschriebenen, experimentell hergeleiteten Gleichungen beziehen sich auf das für die Messabweichung relevante Luftvolumen in einer Anschlussleitung in Litern. Daher wird zunächst dieses Luftvolumen $V_{air,WM}$ pro Wasserzähler (water meter) bestimmt. Unter der Annahme, dass bei einer Befüllung des Leitungsnetzes die in den Versorgungsleitungen befindliche Luft gleichmäßig verteilt über die Anschlussleitungen und somit die Zähler ausgetragen wird, ergibt sich gemäß Gleichung 5.20 ein gemittelttes Volumen von $V_{air,WM}$ aus der Summe der Luftvolumina $V_{air,DP}$ in den Versorgungsleitungen (distribution pipes) und $V_{air,HP}$ in den Hausanschlussleitungen (house connection pipes), dividiert durch die Anzahl N_{HC} der Hausanschlüsse im Versorgungsgebiet.

$$V_{air,WM} = \frac{V_{air,DP} + V_{air,HP}}{N_{HC}} \quad [l] \quad (5.20)$$

Um die gesamte Messabweichung E_{air} im Versorgungsgebiet und Bilanzierungszeitraum zu ermitteln, muss das Luftvolumen $V_{air,WM}$ pro Wasserzähler und Leitungsnetzbefüllung noch mit der Gesamtanzahl der Hausanschlüsse N_{HC} sowie der Anzahl der Befüllungsereignisse (filling events) N_{FE} im Bilanzierungszeitraum multipliziert werden. Basierend auf den Gleichungen aus Abschnitt 5.5.2.3 ergibt sich somit beispielsweise Gleichung 5.21 zur Ermittlung von E_{air} für den Fall trockener Messkapseln und Luftvolumina in den Anschlussleitungen von $V_{air} \geq 1,08l$, d.h. Längen der Anschlussleitungen von $L_S \geq 5m$.

$$E_{air} = \frac{0,93 \cdot V_{air,WM} - 0,56}{1000} \cdot N_{HC} \cdot N_{FE} \quad [m^3] \quad (5.21)$$

Abschließend kann gemäß Gleichung 5.22 die Komponente *Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS} für die Wasserbilanz ermittelt werden, indem das anhand von den

Wasserzählern registrierte und hochgerechnete Volumen von $Q_{BS,air}$ um das Volumen der Messabweichung durch Luftströmung E_{air} reduziert wird.

$$Q_{BS} = Q_{BS,air} - E_{air} \quad [m^3] \quad (5.22)$$

Zu beachten ist, dass dem beschriebenen Ansatz folgende vereinfachende Annahmen zugrunde gelegt wurden:

- Der in der experimentellen Untersuchung ermittelte Berechnungsansatz für die Messabweichung ist auf ein reales Versorgungsnetz übertragbar.
- Das gesamte Leitungsnetz bzw. das Leitungsnetz oberhalb der Höhengrenzlinie entleert sich zwischen zwei Versorgungsperioden komplett.
- Das sich im gesamten Leitungsnetz bzw. im Leitungsnetz oberhalb der Höhengrenzlinie befindliche Luftvolumen wird bei der nächsten Versorgungsperiode komplett über permanent geöffnete Hausanschlüsse ausgetragen.
- Das ausgetragene Luftvolumen teilt sich gleichmäßig auf die Hausanschlussleitungen auf.

5.5.5 Consumption und Wastage

Um bei den Stichprobenhaushalten die Volumina der beiden Komponenten *Consumption* Q_{BSC} und *Wastage* Q_{BSW} im Kundenbereich quantifizieren oder zumindest abschätzen zu können, wurde das in Abbildung 5.13 schematisch dargestellte Monitoringkonzept entwickelt. Dieses besteht neben dem Wasserzähler an der Grundstücksgrenze, der das Volumen von *Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS} erfasst, aus einem zweiten Zähler am Auslauf des Speichertanks im Kundenbereich, aus dem der gesamte bzw. Großteil des häuslichen Wasserverbrauchs erfolgt. Im Anwendungsfall war dies der Dachtank der Kunden, an dessen Auslauf dementsprechend der zweite Wasserzähler zur Verbrauchsmessung installiert wurde. Da allerdings ein Teil des Verbrauchs auch direkt aus dem Grundtank oder an anderer Stelle oberstrom des Dachtanks erfolgen kann, muss dieses Volumen, das als *Ground Tank Consumption* Q_{GTC} bezeichnet wird, ebenfalls quantifiziert bzw. abgeschätzt werden. Dazu empfiehlt sich eine detaillierte Erhebung von Q_{GTC} in Form eines Protokolls. Die Kunden werden dabei gebeten, über einen gewissen Zeitraum das entsprechende Volumen pro Tag in einer entsprechenden Vorlage zu notieren.

Das Volumen der Komponente *Consumption* Q_{BSC} in einem Stichprobenhaushalt lässt sich somit aus der Summe des Dachtankverbrauchs, *Roof Tank Consumption* Q_{RTC} genannt, und der *Ground Tank Consumption* Q_{GTC} gemäß Gleichung 5.23 ermitteln. Analog zur Ermittlung der Komponente *Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS} sind zur Ermittlung des gesamten Volumens der Bilanzkomponente *Consumption* Q_{BSC} zunächst die Mittelwerte der Stichprobenmessungen und -erhebungen zu bilden, um diese anschließend auf die gesamte Versorgungszone für den Bilanzzeitraum hochzurechnen.

$$Q_{BSC} = Q_{RTC} + Q_{GTC} \quad [m^3] \quad (5.23)$$

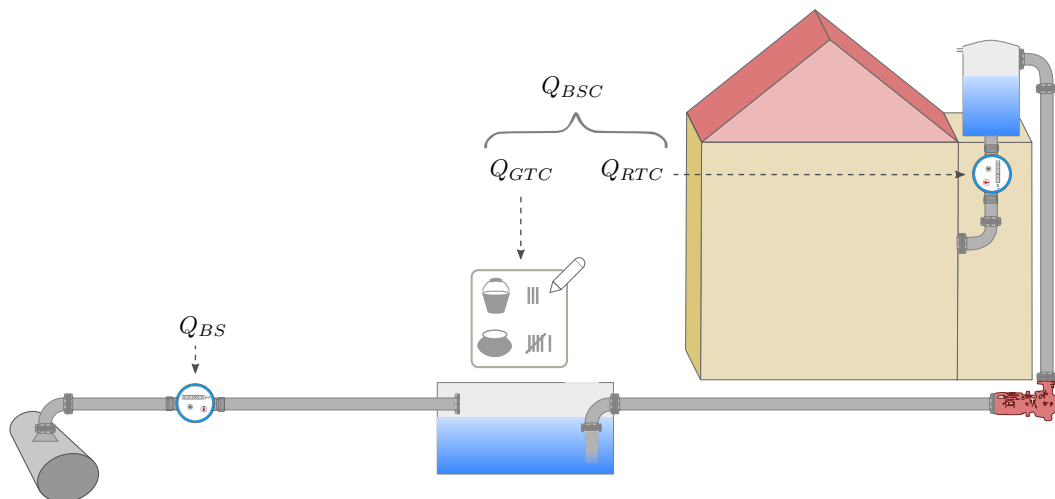


Abbildung 5.13: Monitoringsystem für die Bilanzkomponenten *Consumption* Q_{BSC} und *Wastage* Q_{BSW} im Kundenbereich

Das Volumen der Komponente *Wastage* Q_{BSW} ergibt sich dann gemäß Gleichung 5.24 aus der Differenz zwischen dem an die Haushalte abgegebenen Volumen von *Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS} und dem Volumen von *Consumption* Q_{BSC} .

$$Q_{BSW} = Q_{BS} - Q_{BSC} \quad [m^3] \quad (5.24)$$

5.5.6 Unbilled Authorised Supply

Die Komponente *Unbilled Authorised Supply* Q_{US} sollte nach dem aktuellen Stand der Technik so genau wie möglich quantifiziert bzw. geschätzt werden, wie z.B. im AWWA Manual of Water Supply Practices, M36, Water Audits and Loss Control Programs (2009), sowie von Farley und Trow (2003), Lambert und Taylor (2010) oder Baader u.a. (2011) beschrieben. Dazu sollten zunächst alle Verbraucher, wie z.B. öffentliche Einrichtungen und Entnahmestellen identifiziert und deren unentgeltliche Rohrnetzabgabe mittels einer Feldstudie oder geeigneter Werte aus der Literatur geschätzt werden. Ebenso ist das Volumen des Eigenbedarfs des Wasserversorgers, z.B. Rohrspülungen, zu schätzen und dieser Bilanzkomponente zuzuordnen.

5.5.7 Apparent Losses

Wie in Abschnitt 5.4 beschrieben umfasst die Komponente *Apparent Losses* Q_{AL} im Gegensatz zur IWA-Wasserbilanz lediglich die Sub-Komponente *Unauthorised Consumption* Q_{ALC} . Dieser nicht autorisierte Verbrauch aufgrund z.B. illegaler Hausanschlüssen kann durch Haushaltssurveys oder Schätzungen ermittelt werden. Bekannte Zählerabweichungen und Datenhandhabungsfehler des angepassten Monitoringsystems sollten bereits bei der Quantifizierung von *System Input Volume* Q_{SIV}

und *Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS} berücksichtigt werden. Dies betrifft vor allem Messabweichungen durch Luftströmung, da die Bilanzkomponenten zur schließlichen Anwendung lediglich die jeweiligen eingespeisten und entnommenen Wasservolumina und keine Luftvolumina umfassen sollten.

5.5.8 Real Losses

Die Ermittlung der Komponente *Real Losses* Q_{RL} gemäß Gleichung 5.25 erfolgt mittels dem in Abschnitt 3.4.3 beschriebenen Top-Down-Verfahren der Wasserbilanz. Dazu wird von der Komponente *System Input Volume* Q_{SIV} die Summe der beiden Komponenten *Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS} und *Unbilled Authorised Supply* Q_{US} sowie die Komponente *Apparent Losses* Q_{AL} abgezogen. Alternativ dargestellt ergibt sich die Komponente Q_{RL} aus der Differenz zwischen der Komponente *Water Losses* Q_L und der Komponente *Apparent Losses* Q_{AL} .

$$Q_{RL} = Q_{SIV} - (Q_{BS} + Q_{US}) - Q_{AL} = Q_L - Q_{AL} \quad [m^3] \quad (5.25)$$

Das gemäß dem Top-Down-Verfahren der Wasserbilanz ermittelte Gesamtvolumen der Komponente *Real Losses* Q_{RL} sollte noch genauer durch eine Komponentenanalyse oder induktive Verfahren ergänzt werden, um Ort und Form der realen Wasserverluste im Leitungsnetz zu bestimmen. Ein Verfahren zur Bestimmung des realen Verlustvolumens durch einen überlaufenden Speicherbehälter wird in Abschnitt 6.4.2 für die Fallstudie beschrieben.

5.5.9 Revenue Water und Non-Revenue Water

Um die Komponente *Revenue Water* Q_{RW} ermitteln zu können ist zunächst festzustellen, ob der Fixtarif der abgerechneten Kunden auf ein bestimmtes Verbrauchsvolumen innerhalb eines Zeitraums, z.B. fünf Euro für zehn Kubikmeter Wasser im Monat, ausgelegt ist oder nicht. Im ersten Fall berechnet sich Q_{RW} gemäß Gleichung 5.26 über das festgelegte Fixtarifvolumen pro Hausanschluss und Zeitraum, *Flat-Rate Volume* $Q_{FR,HC}$ genannt, multipliziert mit der Anzahl der Hausanschlüsse N_{HC} der abgerechneten Kunden sowie der Dauer des Bilanzzeitraums t . Ist der Fixtarif auf kein Volumen ausgelegt, kann Q_{RW} mit dem volumetrischen Wasserpreis C_{Vol} einer vergleichbaren Stadt, beispielsweise 0,5 Euro pro Kubikmeter Wasser, sowie dem Pauschaltarif C_{FR} der zu bilanzierenden Stadt, z.B. fünf Euro pro Hausanschluss und Monat, berechnet werden. Die Komponente Q_{RW} ergibt sich dann gemäß Gleichung 5.27 aus der Division von C_{FR} durch C_{Vol} , ebenfalls multipliziert mit N_{HC} und t .

$$Q_{RW} = Q_{FR,HC} \cdot N_{HC} \cdot t \quad [m^3] \quad (5.26)$$

$$Q_{RW} = \frac{C_{FR}}{C_{Vol}} \cdot N_{HC} \cdot t \quad [m^3] \quad (5.27)$$

Durch einen Abgleich zwischen den Komponenten *Revenue Water* Q_{RW} und *Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS} kann nun bestimmt werden, welches der in Abschnitt 5.4 erläuterten drei Szenarien sich durch die Ausgestaltung des Fixtarifs ergibt. Für alle drei Szenarien wird zunächst die Komponente *Non-Revenue Water* Q_{NRW} gemäß Gleichung 5.28 aus der Differenz zwischen den Komponenten *System Input Volume* Q_{SIV} und *Revenue Water* Q_{RW} ermittelt. Bei Szenario 2 wird das dem Kunden zusätzlich in Rechnung und von diesem bezahlte, jedoch effektiv nicht an diesen abgegebene Wasservolumen der Komponente *Excess Revenue Water* Q_{ERW} über die Differenz der Komponenten *Revenue Water* Q_{RW} und *Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS} gemäß Gleichung 5.29 berechnet. Im umgekehrten Fall wird bei Szenario 3 das effektiv an den Kunden abgegebene, jedoch diesem nicht in Rechnung gestellte und daher nicht bezahlte Wasservolumen der Komponente *Billed Non-Revenue Water* Q_{BNRW} über die Differenz der Komponenten *Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS} und *Revenue Water* Q_{RW} gemäß Gleichung 5.30 berechnet.

$$Q_{NRW} = Q_{SIV} - Q_{RW} \quad [m^3] \quad \text{für alle Szenarien} \quad (5.28)$$

$$Q_{ERW} = Q_{RW} - Q_{BS} \quad [m^3] \quad \text{bei Szenario 2} \quad (5.29)$$

$$Q_{BNRW} = Q_{BS} - Q_{RW} \quad [m^3] \quad \text{bei Szenario 3} \quad (5.30)$$

5.6 Kennzahlen zur Bewertung der Wasserverlustkomponenten

In Ergänzung zu dem in Abschnitt 3.4.5 vorgestellten Kennzahlensystem der IWA können zwei zusätzliche Kennzahlen anhand der angepassten Wasserbilanz definiert werden. Diese Kennzahlen dienen speziell der Bewertung der Wasserverlustkomponenten eines intermittierend betriebenen Wasserverteilungssystems ohne verbrauchsabhängige Abrechnung. Zum einen wird in Anlehnung an das IWA-System die finanzielle Kennzahl Fi_B eingeführt, die gemäß Gleichung 5.31 das Verhältnis der Komponente *Revenue Water* Q_{RW} zu *Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS} darstellt. Wie bereits in Abschnitt 5.4 diskutiert kann mit der Kennzahl ermittelt werden, ob der Wasserversorger mit den Kunden gemäß der tatsächlich abgegebenen Wasservolumina abrechnet ($Fi_B=1$) oder zu viel ($Fi_B>1$) oder zu wenig Wasservolumen ($Fi_B<1$) in Rechnung stellt.

$$Fi_B = \frac{Q_{RW}}{Q_{BS}} \quad [-] \quad \begin{cases} > 1 & \text{zu viel abgerechnet} \\ = 1 & \text{Abrechnung gemäß Rohrnetzabgabe} \\ < 1 & \text{zu wenig abgerechnet} \end{cases} \quad (5.31)$$

Zum anderen kann die betriebliche Kennzahl Op_W gemäß Gleichung 5.32 ermittelt werden, die das prozentuale Verhältnis der Komponente *Wastage* Q_{BSW} und *Non-*

Revenue Water Q_{NRW} darstellt. Diese Kennzahl gibt Aufschluss darüber, ob für den Wasserversorger Reduktionsmaßnahmen hinsichtlich der Wasserverschwendung innerhalb der Grundstücksgrenzen der Kunden, wie z.B. die verbindliche Installation eines Überlaufschutzes in den privaten Speichertanks, empfehlenswert sind.

$$Op_W = \frac{Q_{BSW}}{Q_{NRW}} [m^3] \quad (5.32)$$

5.7 Werkzeug zur Erstellung der angepassten Wasserbilanz

Um die regelmäßige Erstellung der angepassten Wasserbilanz zu erleichtern, wurde im Rahmen der Arbeit ein in der Handhabung einfaches und leicht verständliches Werkzeug entworfen, das auf dem weit verbreiteten Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel basiert. In dieses Werkzeug sind für jede Bilanzkomponente einzelne Tabellenblätter integriert, in denen die Wasservolumina der Komponenten für den gewählten Bilanzzeitraum berechnet werden. Eingangsdaten sind zum einen Informationen über das Leitungsnetz und die angeschlossenen Haushalte und zum anderen die Messdaten zur Systemeinspeisung und Rohrnetzabgabe sowie zum tatsächlichen Wasserverbrauch im Kundenbereich. Die Messdaten werden zunächst in Abgleich mit den Daten aus vorangegangenen Auslesungen abgeglichen und auf Plausibilität geprüft. Nicht plausible Daten, die insbesondere Messwerte der Rohrnetzabgabe an die Stichprobenhaushalte betreffen, werden von der weiteren Datenauswertung ausgeschlossen. Da die WHO einen Mindestwassermenge von 20 *lpcd* zur Sicherung des Trinkwasserbedarfs sowie einfachster Hygiene empfiehlt, werden Haushalte mit geringeren Messwerten als diesem Grenzwert in der statistischen Auswertung ebenfalls nicht berücksichtigt (Howard und Bartram, 2003).

Deckt der Umfang der Stichprobenhaushalte mit verwertbaren Messwerten nach wie vor die geforderten 5 % der Gesamtheit aller Haushalte im Bilanzierungsgebiet ab, erfolgt die Berechnung der einzelnen Bilanzkomponenten. Die Volumina der Komponenten *Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS} und *Consumption* werden dabei zunächst anhand der im Werkzeug implementierten Stichprobenverfahren aus Abschnitt 5.5.2.2 geschätzt. Die Schätzwerte mit der jeweils höchsten Genauigkeit werden dann für beide Komponenten in der Wasserbilanz ausgewiesen, wobei der Wert von Q_{BS} noch hinsichtlich der Messabweichung durch Luftströmung korrigiert wird. Mit der Ermittlung der restlichen Bilanzkomponenten gemäß in den vorherigen Abschnitten beschriebenen und im Werkzeug implementierten Gleichungen wird das finale Ergebnis der angepassten Wasserbilanz in tabellarischer Form erstellt. In Abbildung 6.24 in Abschnitt 6.6.3 ist die Wasserbilanz dargestellt, die mit dem Excel-basierten Werkzeug im Rahmen der pilothaften Umsetzung der angepassten Wasserverlustbilanzierung in der Projektstadt Tiruvannamalai erstellt wurde.

6 Pilothafte Umsetzung der angepassten Wasserverlustbilanzierung

6.1 Überblick

In diesem Kapitel wird die Anwendung der entwickelten Methodik der angepassten Wasserverlustbilanzierung in der Fallstudie beschrieben. Zunächst wird in Abschnitt 6.2 das Pilotgebiet, eine Versorgungszone des Wasserverteilungssystems Tiruvannamalais, vorgestellt. Anschließend werden die einzelnen Umsetzungsschritte der entwickelten Methodik ausgeführt. Dies umfasste zunächst die in Abschnitt 6.3 beschriebene Ermittlung der Daten der Haushalte im Pilotgebiet, die für die Anwendung der Methodik erforderlich waren. In den Abschnitten 6.4 und 6.5 erfolgt dann die Darstellung des implementierten Monitoringsystems zur Datenerhebung der eingespeisten und entnommenen Wassermengen. Die anhand dieser Daten gewonnenen Ergebnisse der einzelnen Komponenten der angepassten Wasserbilanz werden in Abschnitt 6.6 dargestellt. Abschließend werden in Abschnitt 6.7 die Ergebnisse sowie die Übertragbarkeit der entwickelten Methodik diskutiert.

6.2 Pilotgebiet

Die Versorgungszone 5 des Wasserverteilungssystems Tiruvannamalai wurde in Absprache mit der Stadtverwaltung als Pilotgebiet ausgewählt. Diese Zone bot sich an, da sie eine übersichtliche Größe (ca. $0,2 \text{ km}^2$) mit homogener Besiedlung aufweist und die Systemgrenzen klar definiert sind. Zudem war nach Aussage der Stadtverwaltung in diesem Gebiet die Bereitschaft der Anwohner zum erstmaligen Einbau von Wasserzählern zu wissenschaftlichen Datenerhebungszwecken gegeben.

Das Pilotgebiet befindet sich im Südwesten der Stadt. Die Topografie der Zone ist sehr einheitlich, mit geringen Höhenunterschieden von 170 müNN im Südwesten bis 178 müNN im Nordwesten der Zone. Bis auf eine Schule, ein größeres Gemeindehaus sowie einige kleinere Läden besteht die dichte Bebauung der Zone aus überwiegend einstöckigen und einigen zweistöckigen Wohnhäusern (Abbildung 6.2). In Abbildung 6.1 ist eine Übersicht über das Wasserverteilungssystem im Pilotgebiet gegeben. Die Versorgungszone 5 ist in die beiden hydraulisch isolierten Subzonen ‚Lower East‘ (5LE) und ‚Upper West‘ (5UW) unterteilt. Die intermittierende Einspeisung in diese beiden Subzonen erfolgt alternierend über den Wasserturm Thamarai Nagar



Abbildung 6.1: Wasserverteilungssystem des Pilotgebiets

(THESR), der am nördlichen Rand der Zone steht und ein Speichervolumen von ca. 150 m^3 besitzt. Dieser Behälter, mit einer Sohlhöhe von 12 m und einem maximalen Wasserspiegel von 3 m , wird im Regelfall zweimal täglich von der Anna Nagar Pumpstation (2013 Scheme) befüllt. Neben dem Wasserturm werden Teile des Pilotgebiets über ein separates Leitungsnetz von der sogenannten Anna Nagar Overflow Line (AOL) versorgt. Hier wird das Wasser, das im Falle des Überlaufs des Pumpensumpfs an der Anna Nagar Pumpstation (1995 Scheme) in einem Tank gespeichert wird, gravitär zu einem Teil der Haushalte in den beiden Subzonen geleitet.

Die Gesamtlänge der Leitungsnetze im Versorgungsgebiet beträgt ca. $8,6 \text{ km}$. In Tabelle 6.1 sind für die einzelnen Netze jeweils die Durchmesser (DN) und die entsprechenden Gesamtlängen der verlegten Rohrleitungen sowie deren Material gelistet. Während die Leitungen in den Subzonen 5LE und 5UW aus PVC bestehen, sind die Leitungen des AOL-Netzes aus duktilem Gusseisen. Bezüglich der Daten ist anzumerken, dass diese auf den lediglich verfügbaren Planungsdaten zur Erneuerung und Erweiterung des Leitungsnetzes basieren. Wie in Abschnitt 4.6 beschrieben zeigten sich bei Begehungen vor Ort jedoch Abweichungen bezüglich den tatsächlich verlegten Leitungen. Diese Abweichungen wurden dokumentiert und sind in Tabelle 6.1 berücksichtigt. Allerdings muss hierbei beachtet werden, dass diese Korrekturen

auf den Aussagen des *Operators* basieren und daher ebenfalls fehlerbehaftet sein können. Eine Erhebung der exakten Daten war aufgrund des unterirdisch verlegten Leitungsnetzes im Rahmen des *WaLUE*-Verbundprojekts nicht möglich.

Tabelle 6.1: Rohrleitungsdaten des Verteilungssystems

DN [mm]	Subzone 5LE		Subzone 5UW		Subzone AOL	
	Länge [m]	Material [-]	Länge [m]	Material [-]	Länge [m]	Material [-]
75	893	PVC	2.335	PVC	1.000	GGG
100	200	PVC	892	PVC	971	GGG
125	136	PVC	0	PVC	152	GGG
150	252	PVC	429	PVC	282	GGG
200	666	PVC	385	PVC	0	GGG
Summe	2.147		4.041		2.406	



Abbildung 6.2: Bebauung im Pilotgebiet



Abbildung 6.3: Öffentliche Zapfstelle



Abbildung 6.4: Grundtank



Abbildung 6.5: Dachtank

Neben dem Leitungsnetz gibt es in Versorgungszone 5 zusätzlich vier öffentliche, über separate Quellen (Bohrbrunnen, Tanklaster) versorgte Zapfstellen, von denen einige wenige Haushalte zusätzlich Wasser beziehen (Abbildung 6.3).

Wie in Abschnitt 4.4.2 beschrieben speichern die Haushalte im Pilotgebiet das Wasser in privaten Speichertanks, überwiegend in einer Kombination aus Grund- und Dachtank (Abbildungen 6.4 und 6.5). Während einer Versorgungsperiode versuchen die meisten Anwohner des Pilotgebiets so viel Wasser wie möglich in den Tanks zu speichern.

6.3 Ermittlung haushaltsbezogener Daten

6.3.1 Zielsetzung und Vorgehen

Im Rahmen der Arbeit wurden mehrere umfangreiche Haushaltssurveys im Pilotgebiet durchgeführt bzw. koordiniert. Ziel war die Erhebung der für die Anwendung der entwickelten Methodik erforderlichen Daten der angeschlossenen Haushalte. Dazu zählten vor allem Informationen über die Anzahl der Hausanschlüsse sowie die jeweiligen Haushaltsgrößen. Diese Daten waren vor der Durchführung der Umfragen nur sehr ungenau verfügbar, da die Anzahl der Hausanschlüsse für die einzelnen Stadtviertel (Wards) und nicht für die Versorgungszonen der Stadt gelistet sind, deren Grenzen nicht mit den administrativen Grenzen der Wards übereinstimmen. Die Surveys wurden auch dazu genutzt, die Verbraucher im Pilotgebiet durch Flugblätter über das *Value*-Projekt und insbesondere die Zielsetzung und den Ansatz der angepassten Wasserverlustbilanzierung, die u.a. auf der Messung der Rohrnetzabgabe an die Verbraucher basiert, zu informieren.

Als Alternative zu Haushaltssurveys wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Studie zur approximativen Bestimmung der erforderlichen Daten anhand von Satellitenbildern in Kombination von Zensusdaten begleitet. In Abgleich mit den späteren Ergebnissen der direkten Umfragen zeigten sich die Nachteile dieser Methodik, da beispielsweise unbewohnte und nicht an das Leitungsnetz angeschlossene Haushalte in die Gesamtanzahl der Hausanschlüsse einfließen und somit diese Anzahl überschätzt wird. Aus der Studie wurde ersichtlich, dass die approximative Methode für eine erste Abschätzung ausreichend sein kann. Im Hinblick auf die Ermittlung von Wasserverlusten anhand der Bilanzierung von Systemeinspeisung und Rohrnetzabgabe an die angeschlossenen Haushalte sollten jedoch die realen Zahlen durch eine umfangreiche Umfrage erhoben werden.

Die im Rahmen der Surveys ermittelten Daten umfassten u.a. die folgenden Informationen:

- *Status*: bewohnt/unbewohnt
- *Haushaltsgröße*: Anzahl der Personen im Haushalt
- *Hausanschluss*: Anzahl der Hausanschlussleitungen

- *Versorgungsart*: z.B. nur öffentliches Versorgungsnetz, öffentliches Versorgungsnetz und privater Bohrbrunnen, öffentliches Versorgungsnetz plus Zukauf von Trinkwasserkanistern
- *Hausinstallation*: u.a. Volumina von Grund- und Dachtanks, Bewirtschaftung der Tanks, Einbaubedingungen Wasserzähler
- *Grundstück*: Fläche, Stockwerkanzahl
- *Einverständnis Zählerinstallation*: ja/nein

Die Umfragen wurden mit Unterstützung des für die Versorgungszone zuständigen *Operators* durchgeführt. In nahezu allen Haushalten waren während der Umfragezeiten Bewohner anwesend und machten Angaben zu den oben gelisteten Daten. Alle erhobenen Daten wurden anschließend digitalisiert und in die Datenbank eines GIS eingearbeitet.

6.3.2 Ergebnisse

Der umfangreichste Haushaltssurvey (durchgeführt im Oktober 2014) ergab, dass von den insgesamt 755 bewohnten Haushalten im Pilotgebiet 674 Haushalte mit einer Gesamtbevölkerung von 3.086 Menschen an das öffentliche Leitungsnetz angeschlossen waren, was einer Anschlussrate von 89 % entspricht. Die Lage der angeschlossenen Haushalte ist in Abbildung 6.1 dargestellt. Die für die Anwendung der entwickelten Methodik wichtigsten Informationen über die Haushalte sind in Abbildung 6.6 zusammengefasst.

Die Verteilung der Haushaltsgrößen zeigt, dass in knapp der Hälfte der Haushalte (48 %) drei bis vier Personen zum Zeitpunkt der Datenerhebung wohnten (Abbildung 6.6 links oben). Danach folgen 152 Haushalte mit fünf bis sechs Personen (23 %) und 98 Haushalte mit einer bis zwei Personen (14 %). In den restlichen 101 Haushalten lebten sieben oder mehr Personen (15 %).

Bei der überwiegenden Mehrzahl der Haushalte (69 %) bestand die Hausinstallation aus Grund- und Dachtank (Abbildung 6.6 rechts oben). 107 Haushalte (16 %) besaßen lediglich einen Grundtank, aus dem mit Gefäßen oder mittels einer Pumpe das Wasser direkt für den Verbrauch entnommen wird. 86 Haushalte (13 %) verfügten über keinen Grundtank und pumpten das Wasser direkt aus dem Leitungsnetz in den Dachtank. Bei einigen dieser Haushalte, die in unmittelbarer Nähe des Wasserturms THESR gelegen sind, reichte der Versorgungsdruck zur direkten Befüllung des Dachtanks ohne zusätzliche Pumpe im Kundenbereich. 14 Haushalte (2 %) nutzten lediglich Fässer oder größere Eimer zur Speicherung des Wassers. Das Speichervolumen der Grundtanks variierte von 0,2 bis 8 m^3 und das der Dachtanks von 0,1 bis 5 m^3 , wobei keine Korrelation zwischen Tankvolumen und Haushaltsgröße festgestellt wurde. Ebenso konnte kein direkter Zusammenhang zwischen Tankvolumen und Volumen der Rohrnetzabgabe pro Versorgungsperiode ermittelt werden.

Insgesamt waren 564 Haushalte (84 %) an das öffentliche Leitungsnetz des Wasserturms THESR angeschlossen, wobei 524 Haushalte (78 %) ausschließlich mit diesem Netz und 40 Haushalte (6 %) zusätzlich mit dem Leitungsnetz der AOL verbunden

6 Pilothafte Umsetzung der angepassten Wasserverlustbilanzierung

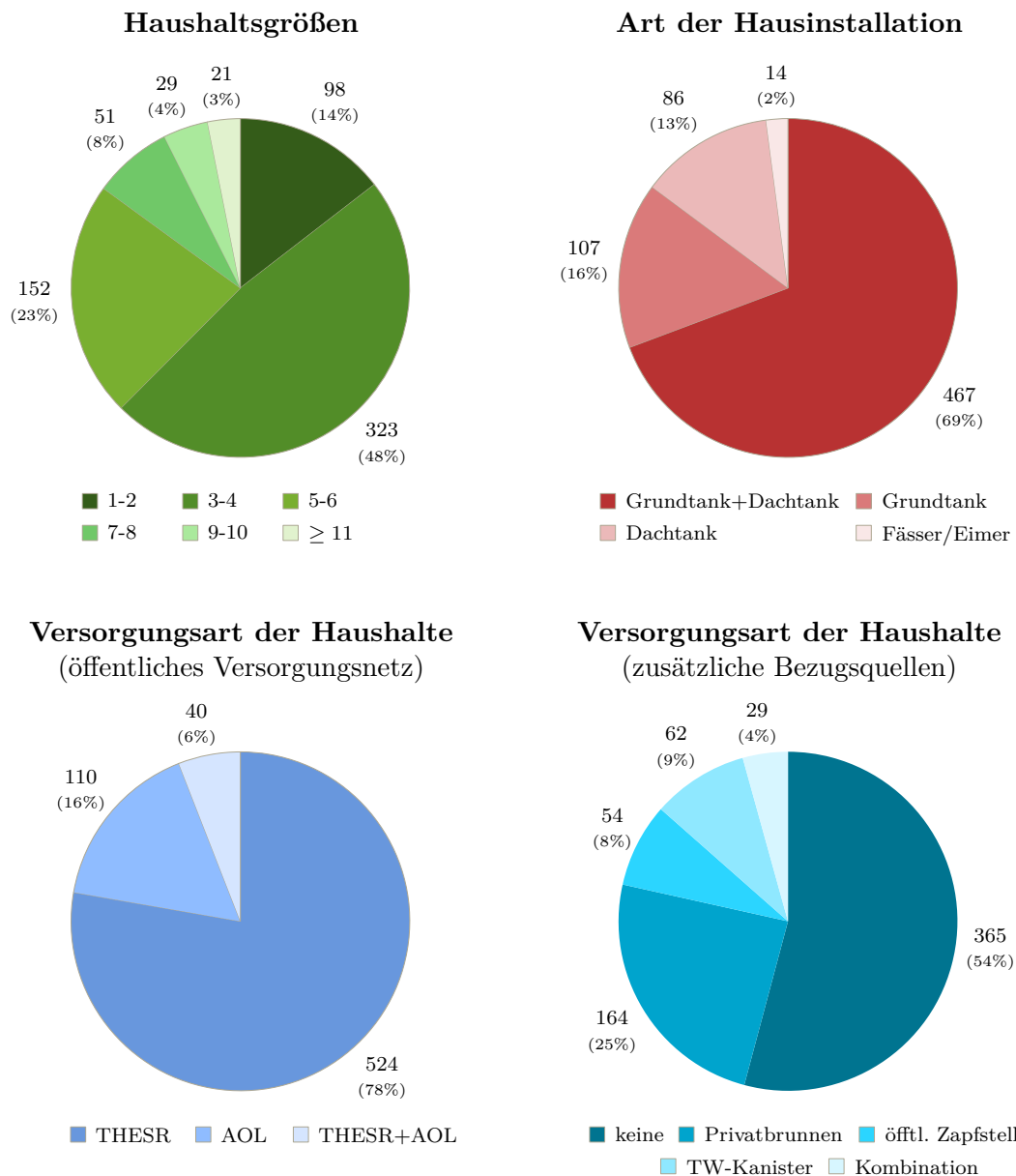


Abbildung 6.6: Ergebnisse des Haushaltssurveys (Oktober 2014) im Pilotgebiet: Haushaltsgrößen (links oben), Art der Hausinstallation (rechts oben), Versorgungsart der Haushalte im öffentlichen Versorgungsnetz (links unten) und über zusätzliche Bezugsquellen (rechts unten)

waren (Abbildung 6.6 links unten). 110 weitere Haushalte (16 %) waren ausschließlich an das AOL-Netz angeschlossen. In Summe gab es zum Zeitpunkt der Erhebung somit insgesamt 714 Hausanschlüsse an die beiden Leitungsnetze im Pilotgebiet.

Im Rahmen der Umfragen wurde außerdem erhoben, inwieweit die Haushalte neben dem Leitungsnetz noch über weitere Wasserbezugsquellen verfügten. Die Verteilung in Abbildung 6.6 (rechts unten) zeigt, dass mehr als die Hälfte der Haushalte

(54 %) ihren Wasserbedarf ohne zusätzliche Bezugsquellen deckte. Bei den restlichen Haushalten bezogen 164 Haushalte (25 %) zusätzlich Wasser aus privaten Bohrbrunnen, 54 Haushalte (8 %) von den öffentlichen Zapfstellen und 62 Haushalte (ca. 9 %) durch den Zukauf von Trinkwasserkanistern. Außerdem versorgten sich 29 Haushalte (4 %) durch eine Kombination der Bezugsquellen Bohrbrunnen sowie öffentliche Zapfstellen und Trinkwasserkanister. Ein abmildernder Einfluss der zusätzlichen Bezugsquellen auf die Höhe der Rohrnetzabgabe an die entsprechenden Haushalte konnte nicht festgestellt werden.

6.4 Monitoringsystem

6.4.1 Konzeption

Da zu Beginn der Arbeit aufgrund fehlender Messtechnik im gesamten Wasserverteilungssystem Tiruvannamalai keine Messdaten erhoben wurden, erfolgte im Rahmen dieser Arbeit die Konzipierung sowie die koordinative und fachliche Begleitung der Implementierung eines entsprechenden Monitoringkonzepts für das Pilotgebiet. Ziel war die kontinuierliche Erfassung der Messdaten, die zur Erstellung der angepassten Wasserbilanz erforderlich sind. Die Auswahl und der Umfang der dazu eingesetzten Messtechnik erfolgte unter Berücksichtigung der finanziellen und technischen Rahmenbedingungen vor Ort. Die Messgeräte sollten möglichst robust und einfach in der Bedienung und Wartung sein, um eine kontinuierliche Datenaufzeichnung sowie die Bedienbarkeit durch das lokale Betriebspersonal zu gewährleisten. Daher wurde, wenn möglich, der Einsatz mechanischer Wasserzähler gegenüber dem von Wasserzählern mit komplexerer Messmethodik und erforderlicher Stromversorgung (USD, IDM) bevorzugt. Bei der Bestimmung des Umfangs der Stichprobenhaushalte zur Wasserzählermessung erfolgte eine Abwägung zwischen den Anforderungen der statistischen Stichprobenverfahren (Abdeckung mindestens 5 % aller Haushalte) und dem im Rahmen des *WaLUE*-Projekts zeitlich und finanziell leistbarem Aufwand für die erforderlichen Maßnahmen der Zählerimplementierung.

6.4.2 System Input Volume

Zur kontinuierlichen Messung der Bilanzkomponente *System Input Volume* Q_{SIV} wurden zunächst sämtliche Zuflussleitungen in die Versorgungszone erfasst. Anschließend erfolgte die Festlegung der Installationsorte der Messgeräte. Am Wasserturm THESR sah das Konzept zunächst die Installation eines Durchflussmessgeräts am Auslauf des Turms vor. Dazu wurde ein USD des Projektpartners *SebaKMT* genutzt. Allerdings zeigte sich hier die Anfälligkeit dieses Messgeräts gegenüber externen Faktoren wie Bedienungsfehlern und internen Faktoren wie Gerätefehlern, wodurch der Zeitraum einer kontinuierlichen und einwandfreien Datenaufzeichnung erheblich verringert wurde. Des Weiteren musste davon ausgegangen werden, dass die Genauigkeit der Messung durch die Zweiphasenströmung in der Auslaufleitung

6 Pilothafte Umsetzung der angepassten Wasserverlustbilanzierung



Abbildung 6.7: Woltmannzähler am Zulauf des THESR

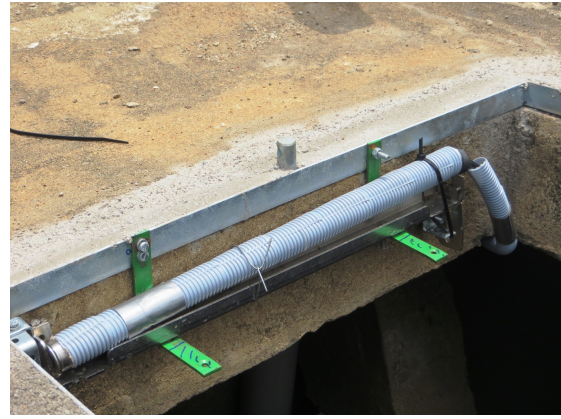


Abbildung 6.8: Wasserstandmessgerät im THESR



Abbildung 6.9: USD an der AOL-Leitung



Abbildung 6.10: Messsensoren an der AOL-Leitung

beeinflusst wurde. Daher wurde das in Abschnitt 5.5.3 vorgestellte Monitoringkonzept am Wasserturm THESR umgesetzt.

An der Zulaufleitung des Turms wurde ein Woltmannzähler des Typs WPH-N der metrologischen Klasse B (Messbereich $1,5 \dots 250 \text{ m}^3/\text{h}$, Genauigkeit $\leq \pm 2 \%$) des Herstellers *ZENNER International GmbH & Co. KG* installiert, um das in den Behälter des Turms geförderte Wasservolumen zu erfassen (Abbildung 6.7). Zur kontinuierlichen Erfassung und Aufzeichnung des Wasserstandes im Behälter wurde eine Pegelsonde vom Typ Orpheus Mini (Messbereich $0 \dots 10 \text{ mWS}$, Genauigkeit $\leq \pm 0,05 \%$ FS) des Herstellers *OTT Hydromet GmbH* angebracht (Abbildung 6.8). Durch diese Messkonzeption konnte neben dem Volumen der Systemeinspeisung zusätzlich das Gesamtvolumen der am Wasserturm THESR regelmäßig vorkommenden Behälterüberläufe im jeweiligen Bilanzzeitraum ermittelt werden. Außerdem konnte die Dichtheit des Behälters bestätigt werden, da bei gefülltem Behälter und geschlossener Auslaufleitung kein Absinken des Wasserstands gemessen wurde. Im Vorfeld

dieser Messungen wurde ein fabrikneues, dichtes Absperrventil an der Auslaufleitung installiert.

Die Messung der Systemeinspeisung an der Anna Nagar Overflow Line (AOL) wurde durch den Umstand erschwert, dass im Bereich des zur Installation eines Messgeräts geeigneten Leitungsabschnitts das Grundwasser bis knapp unter die Geländeoberfläche anstand. Dadurch war die Installation eines mechanischen Woltmanzählers, der kontinuierlich im Wasser gestanden und dessen Ablesung stark beeinträchtigt wäre, nicht möglich. Stattdessen wurde ein USD mit Laufzeit-Verfahren vom Typ UDM 200-M (eingestellter Messbereich 0...500 m^3/h ; Genauigkeit $\leq \pm 3\%$) des Projektpartners *SebaKMT* installiert. Die Messeinheit des Geräts, die in geschützter Umgebung an der Geländeoberfläche positioniert wurde, war über Kabel mit den an der Rohrleitung angebrachten, wasserdichten Sensoren verbunden (Abbildungen 6.9 und 6.10). Um einen mit Wasser vollgefüllten Rohrquerschnitt zu gewährleisten, wurde im Messbereich ein Düker hergestellt. Dadurch lag dieser Leitungsabschnitt tiefer als die anderen Abschnitte und war stets vollgefüllt. Das USD war aufgrund eines integrierten Akkus in der Lage, bis zu einem Tag ohne Stromversorgung weiter zu messen. Dies war im Einsatzgebiet von entscheidender Bedeutung, da in Tiruvannamalai sehr häufig der Strom über kurze Dauern von maximal einer Stunde ausfiel.

6.4.3 Flat-Rate Billed Authorised Supply und Consumption

Das im Abschnitt 5.5.5 vorgestellte und in der Fallstudie implementierte Monitoringsystem zur Erfassung der Bilanzkomponenten *Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS} und *Consumption* Q_{BSW} umfasste den Einbau von zwei Hauswasserzählern in ausgewählten Stichprobenhaushalten. Installiert wurden trockenlaufende Einstrahl-Flügelradzähler vom Typ ETKD-N (Baugröße $Q_3 = 2,5$, Genauigkeitsklasse R80H40V) der Firma *ZENNER International GmbH & Co. KG*. Dieser Zählertyp war aufgrund der Unempfindlichkeit gegen Partikel und Sand im durchströmenden Wasser, der Robustheit sowie den relativ geringen Beschaffungskosten am besten für den Einsatz im Projektgebiet geeignet. Wie in Abschnitt 5.5.5 beschrieben diente der an der Anschlussleitung installierte Zähler der Messung des an den Haushalt abgegebenen Volumens Q_{BS} , während der am Auslauf des Dachtanks montierte Zähler den Großteil des häuslichen Verbrauchsvolumens Q_{BSW} erfasste. Der restliche Teil des Verbrauchsvolumens, der aus dem Grundtank oder an anderer Stelle oberstrom des Dachtanks erfolgt, wurde über Tagesprotokolle der Hausbewohner ermittelt (siehe Abschnitt 6.6.2.3).

Die Auswahl der Haushalte erfolgte derart, dass die Verteilung der Haushaltsgrößen, d.h. der Verbraucher pro Hausanschluss, in den Stichprobenhaushalten möglichst derjenigen in der Grundgesamtheit entsprach. Zudem wurde darauf geachtet, dass die Stichprobenauswahl möglichst das gesamte Verteilungssystem im Pilotgebiet abdeckt. Hinsichtlich des Umfangs der Stichprobe war das Ziel, eine Abdeckung von mindestens 5 % der angeschlossenen Haushalte zu erreichen.

6 Pilothafte Umsetzung der angepassten Wasserverlustbilanzierung

Die von lokalen Monteuren durchgeführte Zählerinstallation an den Stichprobenhaushalten wurde im Rahmen dieser Arbeit zusammen mit einem Mitarbeiter des Herstellers *ZENNER International GmbH & Co. KG* begleitet, um den korrekten Einbau der Messgeräte zu gewährleisten. Um die Messung der gesamten Rohrnetzabgabe sicherzustellen, war bei einem Großteil der Stichprobenhaushalte der Zähler einbau im unterirdisch verlegten Abschnitt der Anschlussleitung erforderlich. Grund dafür war, dass bereits unmittelbar an der Grundstücksgrenze eine erste Verzweigung der Anschlussleitung und somit eine Aufteilung der abgegebenen Wassermenge erfolgte (Abbildung 6.11). Zum Schutz vor Beschädigungen und negativen Einflüssen durch die teilweise extremen Wetterbedingungen wurden um alle installierten Zähler verschließbare Schutzboxen montiert. Die Wasserzähler an den Ausläufen der Dachtanks wurden zusätzlich mit Datenloggern ausgestattet (Abbildung 6.12). Dadurch konnte neben den kumulierten Verbrauchsmengen auch das Verbrauchsverhalten der Haushalte ermittelt und analysiert werden, wie in Abschnitt 4.4.2 beschrieben.



Abbildung 6.11: Installation eines Wasserzählers



Abbildung 6.12: Wasserzähler inkl. Datenlogger am Auslauf eines Dachtanks



Abbildung 6.13: Zerstörter Wasserzähler aufgrund Verkehrslast



Abbildung 6.14: Gefluteter Wasserzähler

Das Monitoringsystem erforderte neben der regelmäßigen Auslesung der Zählerdaten auch die Überprüfung, Wartung sowie ggf. einen Austausch der Zähler. Eine typische Wartungsaufgabe war die Reinigung der Filter, die sich im Laufe der Zeit zusetzten und somit den Durchfluss in die privaten Speicherbehälter minderten. Der Austausch war bei nicht mehr funktionsfähigen Zählern erforderlich, beispielsweise bei durch einwirkende Verkehrslast zerstörten Zählern (Abbildung 6.13). Des Weiteren war zur kontinuierlichen Gewährleistung der angestrebten Abdeckung von mindestens 5 % teilweise die Auswahl neuer Stichprobenhaushalte erforderlich, da bei manchen Haushalten der Einsatz der Zähler nicht mehr möglich war. Gründe hierfür waren auf Betreiben der Hausbewohner demontierte Zähler aufgrund verstopfter Filter sowie ungünstige Einbaulagen der Zähler an manchen Stichprobenhaushalten, beispielsweise aufgrund von hoch anstehendem Grundwasser und der damit verbundenen Flutung der Zählerkammer (Abbildung 6.14).

6.5 Einführung der kontinuierlichen Datenerhebung und -auswertung

Nach der Implementierung des Monitoringsystems erfolgte die Einführung der kontinuierlichen Datenerhebung. Diese sollte ursprünglich vom lokalen Betriebspersonal der Stadtverwaltung Tiruvannamalai durchgeführt werden. Angesichts der ohnehin schon personell unterbesetzten zuständigen Abteilung der Stadtverwaltung standen jedoch keine Mitarbeiter zur Verfügung. Die Datenerhebungen erfolgten daher größtenteils durch indische Mitarbeiter der *WaLUE*-Projektpartner *IEEM* und *DORSCH*. Diese Mitarbeiter waren jedoch nicht in Tiruvannamalai wohnhaft und konnten daher jeweils für lediglich einen begrenzten Zeitraum bis maximal einer Woche in das Projektgebiet anreisen. Ein typischer Einsatz zur Datenerhebung in der Pilotzone dauerte im Schnitt vier bis fünf Tage. Grund für diesen, angesichts des vergleichsweise geringen Umfangs des Monitoringsystems langen Zeitraum war die Auslesung der Kundenwasserzähler an den Grundstücksgrenzen. Da ein Großteil dieser Zähler in den unterirdisch verlegten Leitungsabschnitten installiert war, mussten diese für jede Auslesung durch Hilfskräfte freigegeben werden.

Zu Beginn der kontinuierlichen Datenerhebung wurden die indischen Mitarbeiter geschult, um selbstständig die verschiedenen Messgeräte des Monitoringsystems auslesen und die Messdaten ordnungsgemäß archivieren zu können (Abbildungen 6.15 und 6.16). Zudem wurde eine standardisierte Ausleseroutine eingeführt, nach der beispielsweise die Auslesung aller Daten der Systemeinspeisung am gleichen Tag zur Vermeidung von Verzerrungen in den Eingangsdaten der angepassten Wasserbilanz erfolgen sollte. Um insbesondere bei der Auslesung der Kundenwasserzähler Ablese- und Datenhandhabungsfehler zu vermeiden, wurde den Mitarbeitern im Vorfeld jedes Einsatzes ein aktualisiertes Ableseprotokoll zur Verfügung gestellt. In diesem waren die Zählerdaten der zuletzt getätigten Ablesung notiert. Dadurch konnten die Mitarbeiter beim Notieren des aktuellen Zählerstands direkt sicherstellen, dass dieser



Abbildung 6.15: Schulung eines lokalen Mitarbeiters



Abbildung 6.16: Auslesung eines Kundenwasserzählers mit Datenlogger

nicht beispielsweise durch einen Zahlendreher eine negative Rohrnetzabgabe an den entsprechenden Haushalt im Bilanzzeitraum ergeben würde. Zu Dokumentations- und Überprüfungs Zwecken wurden alle Zählerstandwerte zusätzlich abfotografiert und die eindeutige Identifikationsnummer des jeweiligen Fotos für jeden Haushalt im Ableseprotokoll notiert.

Von entscheidender Bedeutung für die Sicherstellung einer korrekten Datenerhebung war die enge Begleitung von Deutschland aus. Da alle erhobenen Daten von den indischen Mitarbeitern unmittelbar in digitaler Form zu übermitteln waren, konnten diese direkt auf Plausibilität geprüft werden. Bei fehlerhaften Daten erfolgte die umgehende Rückmeldung an den Mitarbeiter zur erneuten Auslesung bzw. Überprüfung der möglichen Gründe eines nicht plausiblen Messwerts. Zu diesen Gründen zählten beispielsweise ein verstopfter Filter, der die korrekte Messung eines Kundenwasserzählers verhindert, oder die Stilllegung einer mit einem Zähler ausgestatteten Anschlussleitung eines Stichprobenhaushalts.

Um eine möglichst kontinuierliche und korrekte Datenerfassung durch das Monitoringsystem zu gewährleisten, wurden die Abstände zwischen zwei Auslesezeiträumen mit zwei Monaten relativ eng gewählt. Dadurch sollten Probleme in der Datenerfassung, beispielsweise durch defekte oder fehlerbehaftete Messgeräte, frühzeitig erkannt und behoben werden. Die Auswertung der Daten sowie die Erstellung der angepassten Wasserbilanz erfolgte anschließend mit dem in Abschnitt 5.7 beschriebenen, Excel-basierten Werkzeug.

6.6 Ergebnisse der angepassten Wasserverlustbilanzierung

6.6.1 Bilanzzeitraum

Zur Erstellung der Wasserbilanz für einen bestimmten Zeitraum sollten alle erforderlichen Daten verfügbar sein, vor allem für die Ermittlung der Komponenten *System Input Volume* Q_{SIV} und *Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS} . Daher ist in Abbildung 6.17 zunächst die Verfügbarkeit von plausiblen Messdaten des implementierten Monitoringsystems über die gesamte Systemlaufzeit von Ende Juni 2014 bis Ende Oktober 2017 dargestellt. Dadurch lassen sich die Zeiträume identifizieren, in denen alle erforderlichen Daten verfügbar sind und für die sich somit die angepasste Wasserbilanz erstellen lässt. Während beim Monitoring der Rohrnetzabgabe an die Haushalte (*Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS}) über den gesamten Betrachtungszeitraum die Messdaten gemäß der Vorgabe für mindestens 5 % der angeschlossenen Haushalte erhoben werden konnten, weisen die verfügbaren Daten der Systemeinspeisung (*System Input Volume* Q_{SIV}) deutliche Lücken auf. Dies betrifft die Messreihen der von den USD gemessenen Systemeinspeisung am Wasserturm THESR sowie in das Leitungsnetz AOL. Gründe hierfür waren eine ungenügende Sicherung der Geräte durch die Stadtverwaltung zu Beginn des Monitorings, ein mehrwöchiger Ausfall der Stromversorgung, Gerätefehler sowie eine teilweise fehlerhafte Bedienung durch die lokalen Mitarbeiter. Mit der Implementierung eines alternativen Monitoringsystems am Wasserturm THESR konnte dort, wie in Abschnitt 6.4.2 beschrieben, die kontinuierliche Messung der Systemeinspeisung ab Ende Mai 2016 sichergestellt werden.

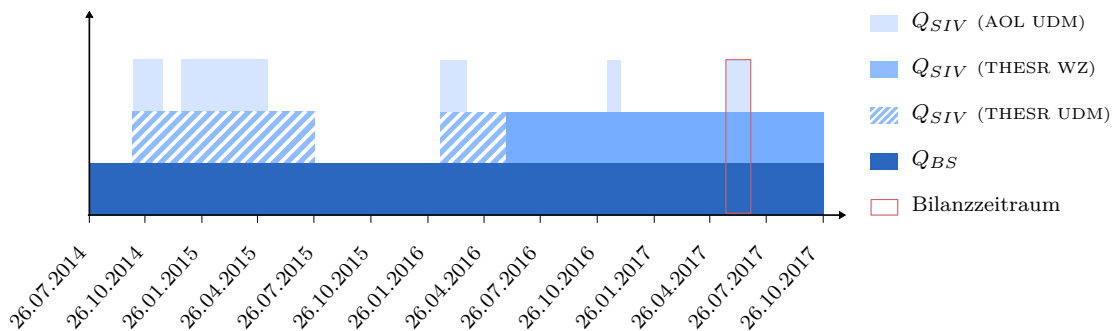


Abbildung 6.17: Datenverfügbarkeit über die Projektlaufzeit

Im Folgenden werden die Ergebnisse der angepassten Wasserbilanzierung für den Bilanzzeitraum vom 12.05.2017 bis 21.06.2017 (40 Tage) exemplarisch dargestellt. In diesem Zeitraum sind neben den Messdaten der Systemeinspeisung und der Rohrnetzabgabe auch Daten bezüglich Überläufen am Wasserturm THESR verfügbar, die dementsprechend in die erstellte Wasserbilanz integriert werden konnten.

Darüber hinaus werden in Abschnitt 6.7.2 die verfügbaren Daten der Systemeinspeisung und der Rohrnetzabgabe über einen längeren Zeitraum von Ende Mai

2016 bis Ende Oktober 2017 analysiert, um die dargestellten Ergebnisse des relativ kurzen Bilanzzeitraums zu diskutieren und einzuordnen.

6.6.2 Bilanzkomponenten

6.6.2.1 System Input Volume

Die Bilanzkomponente *System Input Volume* Q_{SIV} setzt sich aus dem Volumen der Einspeisung am Wasserturm THESR und in das Leitungsnetz AOL zusammen. Anhand der Ablesungen des Woltmannzählers am Zulauf des Wasserturms zu Beginn und Ende des Bilanzzeitraums konnte zunächst das in den Behälter des Turms geförderte Wasservolumen bestimmt werden. Zur Ermittlung der Einspeisung aus dem Behälter in die Versorgungszone musste das Gesamtvolumen der Behälterüberläufe im Bilanzzeitraum berechnet und von dem in den Behälter geförderten Volumen abgezogen werden. Dazu wurden die kontinuierlich aufgezeichneten Messdaten des Wasserstandloggers im Behälter dementsprechend ausgewertet.

Anhand der Daten konnte das vom Wasserturm THESR in die Pilotzone eingespeiste Volumen im Bilanzzeitraum zu 29.623 m^3 bzw. im Mittel zu $741 \text{ m}^3/\text{d}$ bestimmt werden. Für die Rohrnetzeinspeisung der AOL konnte auf die vom USD aufgezeichneten Daten zurückgegriffen werden. Im Bilanzzeitraum wurden 1.707 m^3 bzw. im Mittel $43 \text{ m}^3/\text{d}$ eingespeist, wobei die tägliche Einspeisung zwischen Werten von 0 und $120 \text{ m}^3/\text{d}$ stark variierte (Abbildung 6.18). Somit ergab sich aus beiden Einspeise-Volumina insgesamt ein Volumen der Bilanzkomponente *System Input Volume* Q_{SIV} von 31.330 m^3 im Bilanzzeitraum.

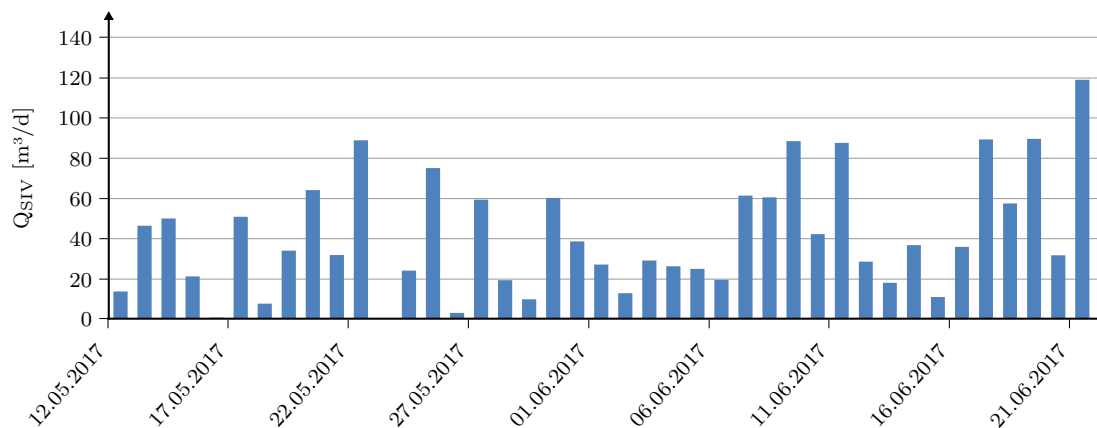


Abbildung 6.18: Systemeinspeisung in das Leitungsnetz AOL im Bilanzzeitraum

6.6.2.2 Flat-Rate Billed Authorised Supply

Die Ermittlung der Bilanzkomponente *Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS} erfolgte anhand der zu Beginn und zum Ende des Bilanzzeitraums abgelesenen Zäh-

lernesswerten an den Stichprobenhaushalten sowie der anschließenden Korrektur bezüglich Messabweichungen durch Luftströmung.

Zunächst wurden die Messwerte hinsichtlich ihrer Plausibilität und Verwertbarkeit für die statistischen Stichprobenverfahren zur Schätzung von Q_{BS} geprüft. Zum Zeitpunkt der Bilanzerstellung waren insgesamt 60 Hausanschlüsse mit Wasserzählern ausgestattet. Aufgrund von vier defekten Zählern und 15 Zählern mit nicht plausiblen Messwerten bzw. Werten unterhalb der WHO-Mindestmenge von 20 $lpcd$ reduzierte sich der Stichprobenumfang. Dadurch ergab sich eine verfügbare Stichprobe von 41 Hausanschlüssen, deren Lage im Untersuchungsgebiet sowie Identifikationsnummer (ID) in Abbildung 6.19 dargestellt sind. Dabei ist zu beachten, dass bei Haushalt 56 zwei Hausanschlüsse (THESR- und AOL-Leitungsnetz) mit Zählern ausgestattet wurden, um auch diese kombinierte Versorgungsart von Haushalten in der Stichprobe zu repräsentieren. Angesichts von insgesamt 714 Hausanschlüssen zum Zeitpunkt der Bilanzerstellung konnte damit eine Abdeckung von 5,7 % der Gesamtanzahl an Hausanschlüssen und somit mehr als die mindestens geforderten 5 % erreicht werden.

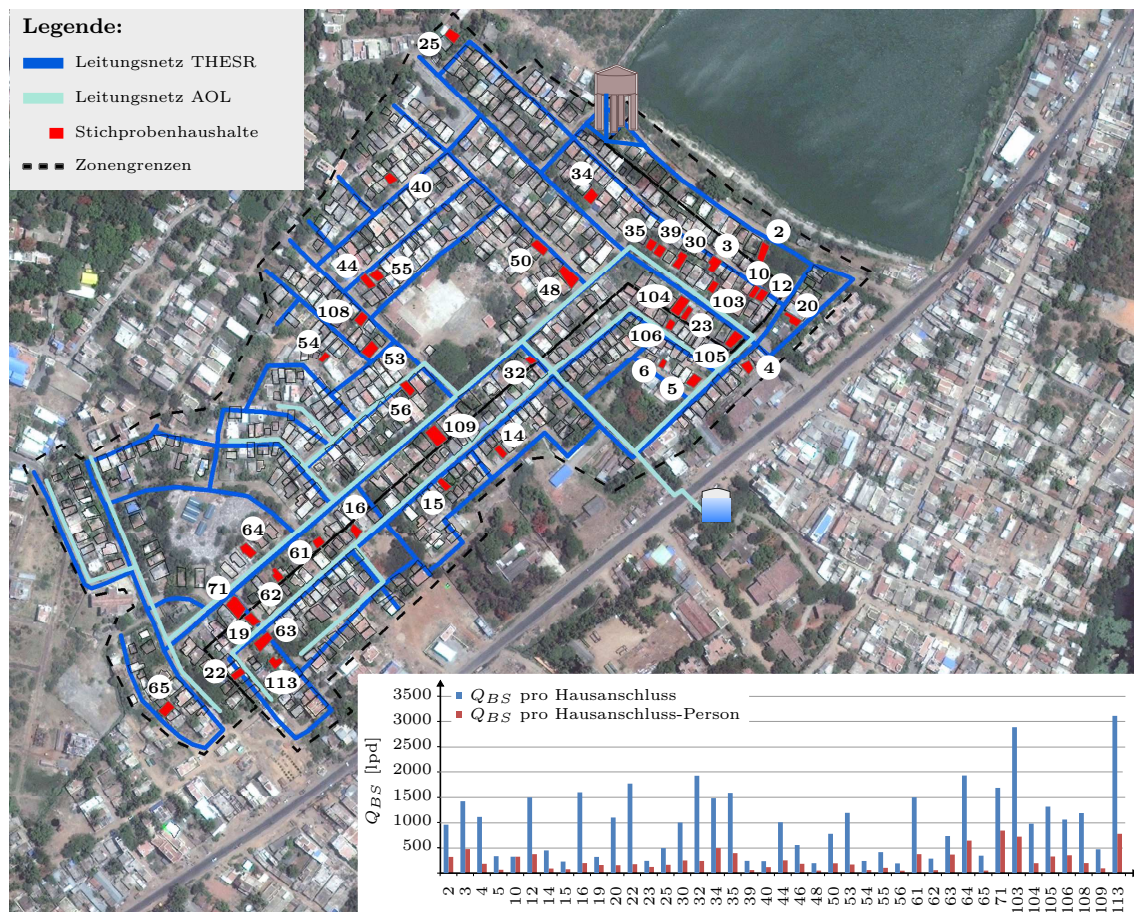


Abbildung 6.19: Lage, ID sowie gemessene Rohrnetzabgabe Q_{BS} der Stichproben-Hausanschlüsse im Bilanzzeitraum

In Abbildung 6.19 ist außerdem das im Bilanzzeitraum gemessene Volumen von *Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS} pro Hausanschluss sowie pro Hausanschluss-Person in Litern pro Tag (englisch: *liters per day*) dargestellt. Die pro Hausanschluss abgegebenen Wassermengen schwanken stark. Diese Schwankungen können jedoch weder mit der Entfernung der Haushalte vom Einspeisepunkt noch dem jeweils vorhandenen Volumina der privaten Speichertanks erklärt werden. Allerdings zeigt sich, dass durch die Ermittlung der Pro-Kopf-Werte hohe Pro-Hausanschluss-Werte teilweise relativiert werden und sich somit eine geringere Streuung der Pro-Kopf-Werte ergibt.

Anhand der gemessenen Stichprobenwerte wurde die gesamte Rohrnetzabgabe im Bilanzzeitraum mittels des in Abschnitt 5.5.4.4 beschriebenen Verfahren ermittelt. Dabei wurde der Mittelwert der Stichprobenmessungen jeweils pro Hausanschluss (Variante 1) sowie pro Hausanschluss-Person (Variante 2) gemäß den Gleichungen 5.17 bzw. 5.18 berechnet und mit Gleichung 5.19 anhand der Gesamtanzahl von 714 Hausanschlüssen bzw. der über die Hausanschlüsse versorgten 3.086 Personen auf die gesamte Pilotzone hochgerechnet.

In Tabelle 6.2 sind die Ergebnisse der Schätzung im Bilanzzeitraum für die jeweiligen Verfahren und Varianten inklusive dem jeweiligen 95%-Konfidenzintervall als Maß der Schätzgenauigkeit gegeben. Die Ergebnisse zeigen, dass das Verfahren der geschichteten Stichprobe mit der Betrachtung pro Hausanschluss-Person (Variante 2.2) das kleinste Konfidenzintervall ergibt. Gründe hierfür sind die Erhöhung der Schätzgenauigkeit durch die Schichtung der gemessenen Messwerte anhand der jeweiligen Personenanzahl pro Hausanschluss (1-2 Personen, 3-4 Personen, etc.) sowie eine geringere Varianz der Pro-Person-Werte im Vergleich zu den Pro-Hausanschluss-Werten. Basierend auf diesen Ergebnissen der Stichprobenverfahren wurde daher das Volumen der noch nicht hinsichtlich der Messabweichung durch Luftströmung korrigierten Rohrnetzabgabe $Q_{BS,air}$ im Bilanzzeitraum zu $27.114 m^3$ geschätzt, wobei der Bereich von $\pm 2.574 m^3$ um diesen Wert den wahren Wert der Rohrnetzabgabe zu 95 % enthalten soll.

Tabelle 6.2: Ergebnisse der Stichprobenverfahren zur Schätzung von Q_{BS}

Verfahren	Variante	Anzahl Hausanschlüsse bzw. Personen [-]	Q_{BS} [m^3]	Konfidenzintervall [m^3]
1. Einfache Stichprobe	1.1 Hausanschluss	714	28.166	6.020
	1.2 Hausanschluss-Person	3.086	31.724	3.627
2. Geschichtete Stichprobe	2.1 Hausanschluss	714	28.259	5.306
	2.2 Hausanschluss-Person	3.086	27.114	2.574

Das ermittelte Volumen von $Q_{BS,air}$ wurde anschließend um das Volumen der Messabweichung durch Luftströmung reduziert. Die Abweichung wurde für das jeweilige Leitungsnetz der Subzonen 5LE und 5UW sowie der AOL separat ermittelt, da sowohl die unterschiedlichen Luftvolumina der Leitungsnetze als auch die unter-

schiedliche Anzahl der Versorgungsperioden in die Netze Einfluss auf die Abweichung haben.

Die Luftvolumina ließen sich anhand der verfügbaren Leitungsdaten mit den jeweiligen Längen und Durchmessern ermitteln. Die Anzahl der Versorgungsperioden in die Subzonen 5LE und 5UW wurde nicht direkt vom implementierten Monitoring-system erfasst, konnte jedoch anhand der hochauflösenden Wasserstandmessung im Behälter des Turms ermittelt werden. Dazu wurde jeweils der Zeitraum der Entleerung des Behälters zu Beginn einer Versorgungsperiode in die Pilotzone betrachtet. In Abbildung 6.20 sind die beiden typischen Wasserstandkurven für beide Subzonen gegeben. Dabei ist zu erkennen, dass die Entleerung des Behälters bei Einspeisung in Subzone 5UW deutlich schneller erfolgt als in Subzone 5LE. Die unterschiedlichen Verläufe der Wasserstandkurven können mit der unterschiedlichen Größe erklärt werden. In Subzone 5LE sind deutlich weniger Haushalte an das Leitungsnetz des Wasserturms angeschlossen, sodass hier die Einspeisung pro Zeiteinheit und damit der Durchfluss aufgrund der geringeren Entnahmemenge aus dem Versorgungsnetz kleiner sind. Im Gegensatz dazu erfolgen in Subzone 5UW aufgrund der deutlich höheren Anzahl an Hausanschlüssen eine größere und schnellere Entnahme und daher eine schnellere Entleerung des Behälters mit höheren Durchflüssen. Da der Wasserstand über den gesamten Bilanzzeitraum kontinuierlich aufgezeichnet wurde, konnten für die Subzone 5LE insgesamt 19 Versorgungsperioden und für die Subzone 5UW 25 Versorgungsperioden ermittelt werden. Für das Leitungsnetz AOL ergaben sich anhand der kontinuierlichen Aufzeichnungen des USD insgesamt 41 Versorgungsperioden.

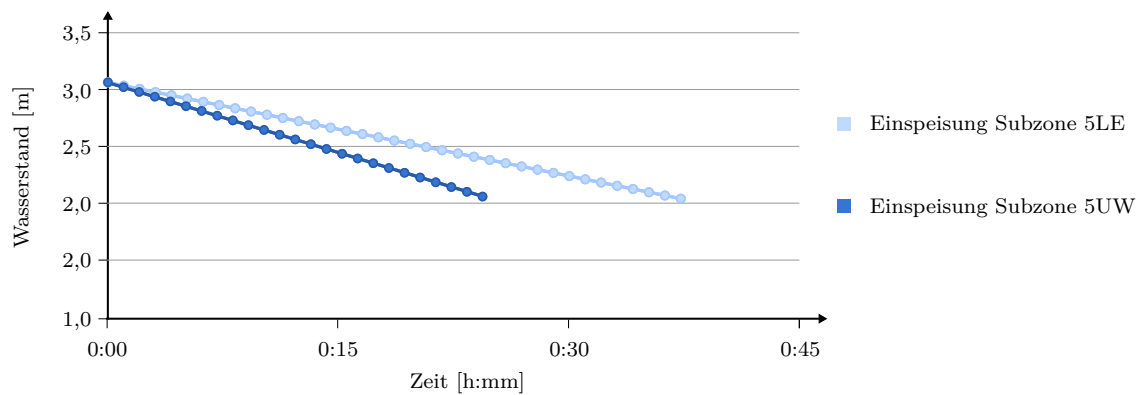


Abbildung 6.20: Wasserstandkurven bei Einspeisung in die Subzonen 5LE und 5UW

Unter der Annahme, dass sich das gesamte Leitungsnetz zwischen zwei Versorgungsperioden entleert und daher mit Luft gefüllt ist, wurde zunächst das für die Messabweichung relevante Luftvolumen pro Wasserzähler $V_{air,WM}$ in den jeweiligen Leitungsnetzen gemäß Gleichung 5.20 anhand der bekannten Rohrleitungslängen und -durchmesser bestimmt. Anschließend erfolgte die Berechnung der Messabweichung durch Luftströmung E_{air} gemäß Gleichung 5.21 anhand der jeweiligen Anzahl der Hausanschlüsse und Versorgungsperioden in den Leitungsnetzen ermittelt. Für die

gesamte Pilotzone 5 ergab sich demnach eine Messabweichung E_{air} im Bilanzzeitraum von 2.174 m^3 . Tabelle 6.3 fasst die Ergebnisse zusammen.

Abschließend wurde gemäß Gleichung 5.22 das für den Bilanzzeitraum ermittelte Volumen des *Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS} von 27.114 m^3 um das Volumen der Messabweichung E_{air} von 2.174 m^3 auf 24.940 m^3 reduziert.

Tabelle 6.3: Messabweichung durch Luftströmung E_{air} im Bilanzzeitraum

Leitungsnetz	$V_{air,WM}$ [l]	N_{HC} [-]	N_{FE} [-]	E_{air} [m^3]
5LE	200	164	19	578
5UW	94	400	25	870
AOL	128	150	41	726
Gesamt				2.174

6.6.2.3 Consumption und Wastage

Die Komponente *Consumption* Q_{BSC} wurde gemäß Gleichung 5.23 aus der Summe von *Ground Tank Consumption* Q_{GTC} und *Roof Tank Consumption* Q_{RTC} berechnet. Während Q_{RTC} über das von den an den Dachtanks installierten Zählern gemessene Verbrauchsvolumen der Stichprobenhaushalte direkt ermittelt werden konnte, wurden für Q_{GTC} die gemittelten Ergebnisse von zwei Monitoringkampagnen mit detaillierten Tagesprotokollen im Juli 2015 (11 Haushalte) und Mai 2016 (8 Haushalte) auf den aktuellen Bilanzzeitraum übertragen.



Abbildung 6.21: Gefäß zur häuslichen Wasserentnahme

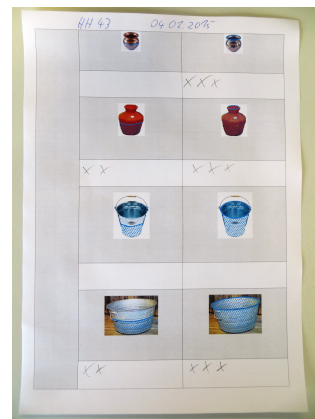


Abbildung 6.22: Verbrauchsprotokoll

In Abbildung 6.22 ist exemplarisch ein Auszug eines Tagesprotokolls dargestellt, in dem die Hausbewohner über einen gewissen Zeitraum ihren häuslichen Verbrauch direkt aus dem Grundtank oder an anderer Stelle oberstrom des Dachtanks notierten.

Zur Vereinfachung der Protokollführung wurden für jeden Haushalt individuell die jeweils verwendeten Gefäße bzw. Behälter der Wasserentnahme im Protokoll visuell dargestellt (Abbildung 6.21). Das Volumen der Behältnisse wurde vor Ort gemessen, um das Gesamtvolumen von Q_{GTC} für den jeweiligen Haushalt im Beobachtungszeitraum bestimmen zu können.

Die Summe aus beiden Verbrauchskomponenten bei den Stichprobenhaushalten wurde anschließend auf das gesamte Versorgungsgebiet hochgerechnet, wodurch sich ein Volumen der Komponente *Consumption* Q_{BSC} von 18.061 m^3 ergab. Das Volumen der Komponente *Wastage* Q_{BSW} wurde dann gemäß Gleichung 5.24 aus der Differenz zwischen *Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS} und *Consumption* Q_{BSC} zu 6.879 m^3 berechnet.

6.6.2.4 Unbilled Authorised Supply

Laut dem Betriebspersonal der Stadtverwaltung wurden im Bilanzzeitraum kein Wasser an nicht abgerechnete Kunden, Einrichtungen oder öffentlichen Zapfstellen (diese werden über ein separates Leitungsnetz versorgt) abgegeben oder vom Wasserversorgungsunternehmen für den Eigenbedarf, z.B. Leitungsspülungen, genutzt. Daher wurde das Volumen der Komponente *Unbilled Authorised Supply* Q_{US} im Bilanzzeitraum mit 0 m^3 angesetzt.

6.6.2.5 Water Losses

Die Komponente *Water Losses* Q_L ergibt sich aus der Differenz zwischen *System Input Volume* Q_{SIV} und *Authorised Supply* Q_S . Letztere Komponente berechnet sich aus der Summe der bekannten Volumina von *Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS} und *Unbilled Authorised Supply* Q_{US} . Somit ergibt sich für Q_L ein Volumen von 6.390 m^3 im Bilanzzeitraum.

Die Komponente *Apparent Losses* Q_{AL} umfasst, wie in Abschnitt 5.4 beschrieben, lediglich das Volumen der Komponente *Unauthorised Consumption* Q_{ALC} . Laut dem Betriebspersonal betrug dieses Volumen im Bilanzzeitraum ebenfalls 0 m^3 , da alle an das Leitungsnetz im Versorgungsgebiet angeschlossenen Haushalte bei der Stadtverwaltung registriert seien und somit keine unerlaubte Wasserentnahme stattfinde.

Das Volumen der Komponente *Real Losses* Q_{RL} im Bilanzzeitraum wurde gemäß Gleichung 5.25 aus der Differenz zwischen *Water Losses* Q_L und *Apparent Losses* Q_{AL} berechnet. Dieses entspricht ebenfalls 6.390 m^3 , da das Volumen von Q_{AL} 0 m^3 beträgt.

Anhand der hochauflösenden Wasserstandmessungen im Behälter des Wasserturms THESR konnte das Volumen der Subkomponente *Real Losses* Q_{RLT} (Reale Wasserverluste durch Behälterüberläufe) im Bilanzzeitraum zu 92 m^3 ermittelt werden. In Abbildung 6.23 ist das tägliche Überlaufvolumen im Bilanzzeitraum dargestellt. Insgesamt lief der Wasserturm an neun Tagen im Bilanzzeitraum über, mit einem deutlichen Spitzenwert von knapp $50 \text{ m}^3/d$ am 27.05.2017.

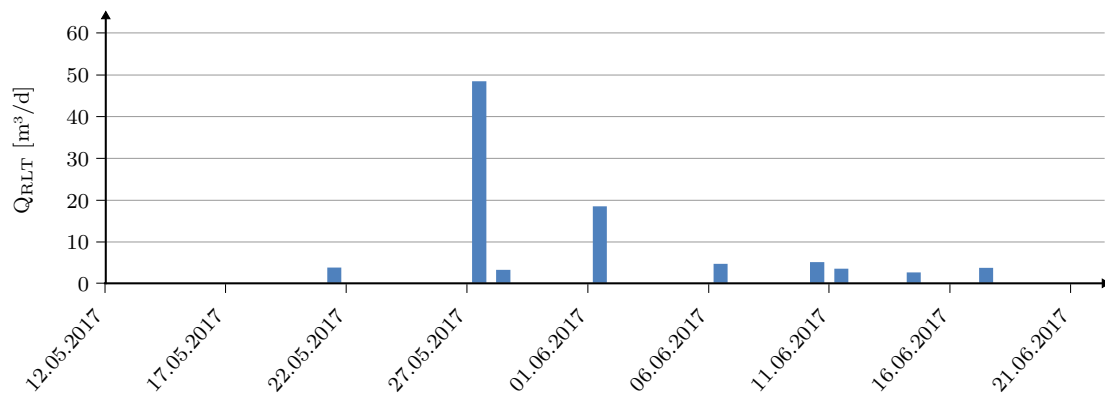


Abbildung 6.23: *Real Losses* Q_{RLT} durch Überläufe des Wasserturms THESR im Bilanzzeitraum

6.6.2.6 Revenue und Non-Revenue Water

Das Volumen der Komponente *Revenue Water* Q_{RW} im Bilanzzeitraum wurde gemäß Gleichung 5.26 aus dem Produkt des monatlichen Fixtarifvolumens der Stadt Tiruvannamalai von $7,5 \text{ m}^3$ pro Hausanschluss sowie der insgesamt 714 Hausanschlüsse und der Dauer des Bilanzzeitraums ($t = 1,33$ Monate) zu 7.140 m^3 berechnet. Nach Abgleich mit dem Volumen des *Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS} (24.940 m^3) wird erkennbar, dass die Stadtverwaltung den Kunden mit 7.5 m^3 deutlich zu wenig Abgabevolumen in Rechnung stellt, da die Stichprobenmessungen eine durchschnittliche Rohrnetzabgabe von $26,2 \text{ m}^3$ pro Hausanschluss und Monat ergaben. Somit tritt Szenario 3 der in Abschnitt 5.4 beschriebenen Szenarien ein, bei dem den Kunden weniger als die abgegebene Wassermenge in Rechnung gestellt und von diesen bezahlt wird. Das in diesem Fall keine Einkünfte generierende Abgabevolumen der Komponente *Billed Non-Revenue Water* Q_{BNRW} berechnet sich gemäß Gleichung 5.30 über die Differenz des Volumens von *Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS} und *Revenue Water* Q_{RW} zu 17.800 m^3 . Das Volumen *Non-Revenue Water* Q_{NRW} ergibt sich gemäß Gleichung 5.28 durch die Differenz des Volumens von *System Input Volume* Q_{SIV} und *Revenue Water* Q_{RW} zu 24.190 m^3 .

6.6.3 Angepasste Wasserbilanz

In Abbildung 6.24 sind für das Pilotgebiet die in den vorherigen Abschnitten ermittelten Ergebnisse der einzelnen Komponenten in der angepassten Wasserbilanz für den Bilanzzeitraum vom 12.05.2017 bis 21.06.2017 dargestellt. Die Wasserverluste (*Water Losses* Q_L) machen 20 % der Systemeinspeisung (*System Input Volume* Q_{SIV}) aus und entsprechen den realen Verlusten (*Real Water Losses* Q_{RL}). Nur ein geringer Anteil von 0,3 % der realen Wasserverluste ist auf Überläufe des Wasserturms THESR zurückzuführen. Die Volumen der anderen Subkomponenten der realen Verluste konnten aufgrund der fehlenden Datengrundlage im Projektgebiet nicht ermittelt werden.

6.6 Ergebnisse der angepassten Wasserverlustbilanzierung

				Scenario 3
System Input Volume Q_{SIV} 31.330 m ³ (100 %)	Authorised Supply Q_S 24.940 m ³ (80 %)	Flat-Rate Billed Authorised Supply Q_{BS} 24.940 m ³ (80 %)	Consumption Q_{BSC} 18.061 m ³ (58 %)	Revenue Water Q_{RW} 7.140 m ³ (23 %)
			Wastage Q_{BSW} 6.879 m ³ (22 %)	Billed Non-Revenue Water Q_{BNRW} 17.800 m ³ (57 %)
		Unbilled Authorised Supply Q_{US} 0 m ³ (0 %)		
	Water Losses Q_L 6.390 m ³ (20 %)	Apparent Losses Q_{AL} 0 m ³ (0 %)	Unauthorised Consumption Q_{ALC} 0 m ³ (0 %)	
		Real Losses Q_{RL} 6.390 m ³ (20 %)	Leakage on Transmission and Distribution Mains Q_{RLM}	
			Leakage and Overflows at Storage Tanks Q_{RLT} 92 m ³ (0,3 %)	
		Leakage on Service Connections up to the point of Customer Metering Q_{RLC}		

Abbildung 6.24: Ergebnisse der angepassten Wasserbilanz für das Pilotgebiet



Abbildung 6.25: Wasserverschwendung durch geöffneten Hahn (links) und Tanküberlauf (rechts)

Mehr als ein Fünftel (22 %) der Rohrnetzeinspeisung wird im häuslichen Bereich verschwendet (*Wastage* Q_{BSW}). Dieser verhältnismäßig hohe Wert deckt sich auch mit Beobachtungen während der regelmäßigen Begehungen des Pilotgebiets. Dabei konnten häufig Wasserverschwendungen durch permanent geöffnete Wasserhähne und überlaufende Speichertanks im Kundenbereich festgestellt werden (Abbildung 6.25). In diesem Bereich liegt somit ein erhebliches Potential zur Wasserverlustreduktion durch die Stadtverwaltung, indem zum Beispiel die Installation von Schwimmerventilen in den privaten Haustanks verpflichtend eingeführt wird. Dadurch werden Überläufe der Tanks vermieden und somit die Verschwendung des abgegebenen Wassers reduziert.

Auch der sehr hohe Anteil von 77 % des Wasservolumens, das der Stadtverwaltung keine Einkünfte generiert (*Non-Revenue Water* Q_{NRW}), bietet ein erhebliches Verbesserungspotential. Allein durch die inadäquate Ausgestaltung des Fixtarifs werden den Kunden nur 23 % der Rohrnetzeinspeisung über diesen Tarif in Rechnung gestellt, um Einkünfte zu generieren (*Revenue Water* Q_{RW}). Die anhand der Stichprobenmessungen ermittelte Rohrnetzabgabe an die Kunden (*Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS}) beträgt jedoch 80 % der Netzeinspeisung. Dies bedeutet, dass über die Hälfte (57 %) des in das Leitungsnetz eingespeisten Wasservolumens zwar erfolgreich an die Kunden abgegeben wurde, jedoch nicht von dem aktuellen Fixtarif abgedeckt ist und daher keine Einkünfte generiert (*Billed Non-Revenue Water* Q_{BNRW}). Daher ist der Stadtverwaltung eine Anpassung des Tarifs an das effektiv an die Kunden abgegebene Wasservolumen dringend zu empfehlen.

6.6.4 Angepasste Kennzahlen

Auf eine Berechnung der in Abschnitt 3.4.5 beschriebenen Kennzahlen zur Bewertung der Wasserverluste wird an dieser Stelle verzichtet. Grund hierfür ist zum einen, dass keine Daten für den von der IWA geforderten Betrachtungszeitraum von mindestens einem Jahr verfügbar sind und somit keine aussagefähigen Kennzahlen ermittelt werden können. Außerdem sollten vor Anwendung der Kennzahlen die anhand der Wasserbilanz ermittelten realen Wasserverluste durch geeignete, induktive Verfahren wie beispielsweise dem *Stop-Tap*-Verfahren verifiziert werden.

Die Ergebnisse der beiden im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Kennzahlen werden im Folgenden dennoch vorgestellt, da diese die wichtigsten Aussagen der angepassten Wasserbilanz aus dem vorherigen Abschnitt bestätigen. Die Berechnung der betrieblichen Kennzahl Op_W gemäß Gleichung 5.32 ergibt, dass knapp ein Drittel (28 %) des Volumens von *Non-Revenue Water* Q_{NRW} durch *Wastage* Q_{BSW} verursacht wird und daher ein erhebliches Reduktionspotential hinsichtlich der Wasserverschwendung durch die Kunden besteht. Die Berechnung der finanziellen Kennzahl Fi_B gemäß Gleichung 5.31 zu 0,29 zeigt, dass lediglich knapp ein Drittel des abgegebenen Wasservolumens den Kunden in Rechnung gestellt wird um Einkünfte zu generieren. Dies bestätigt die inadäquate Ausgestaltung des derzeit gültigen Fixtarifes.

6.7 Diskussion der Ergebnisse

6.7.1 Unsicherheiten der Mess- und Schätzwerte

Da die Ergebnisse der angepassten Wasserbilanz abhängig von den Eingangsdaten des Monitoringsystems sind, sollten zusätzlich zu den eigentlichen Ergebnissen stets Angaben zur Genauigkeit der Daten und somit zur Bewertung der Aussagekraft der Bilanz gemacht werden. Als quantitatives Maß für die Genauigkeit wird die Messunsicherheit angegeben, wie in Abschnitt 2.6.5 dargestellt. Da sich durch das deduktive Verfahren bei der Ermittlung der Wasserbilanzkomponenten die jeweiligen Volumina teilweise aus mehreren, voneinander unabhängigen Eingangsgrößen berechnen, sind für diese die kombinierten Unsicherheiten gemäß Gleichung 2.3 zu bestimmen. Beispielsweise wird das Volumen der Systemeinspeisung durch die Werte der Messgeräte am Wasserturm THESR (Woltmannzähler, Wasserstandmessgerät) sowie an der AOL-Leitung (USD) ermittelt, deren Messungen jeweils mit den von den Herstellern angegebenen Ungenauigkeiten (Fehlergrenzen) behaftet sind.

In Tabelle 6.4 sind die kombinierten Unsicherheiten durch Messfehler der Geräte sowie der Ungenauigkeit des Stichprobenverfahrens für die Komponenten *System Input Volume* Q_{SIV} und *Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS} sowie die daraus resultierende kombinierte Unsicherheit des anhand dieser beiden Komponenten ermittelten Volumens der *Water Losses* Q_L (gleich den *Real Losses* Q_{RL}) gelistet. Die Volumina der Komponenten *Unbilled Authorised Supply* Q_{US} und *Apparent Losses* Q_{AL} gehen nicht in die Berechnung der Unsicherheit mit ein, da beide ein Volumen von 0 m^3 im Bilanzzeitraum haben. Somit lässt sich das ermittelte Volumen der *Water Losses* Q_L mit einem Volumen von 6.390 m^3 mit einer Unsicherheit von $\pm 2.493 \text{ m}^3$ für den Bilanzzeitraum angeben.

Diese relativ hohe Unsicherheit ergibt sich zu einem erheblichen Teil aufgrund der Ungenauigkeit des Stichprobenverfahrens, bei dem anhand einer Stichprobe mit vergleichsweise geringem Umfang das Volumen der Rohrnetzabgabe (*Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS}) geschätzt wird. Daher ist in diesem Fall die ermittelte Wasserbilanz für das Pilotgebiet nur in geringem Maße geeignet, den exakten Wert bzw. den Anteil der Wasserverluste an der Systemeinspeisung mit einer hohen Genauigkeit zu bestimmen. Dazu müsste der Stichprobenumfang und somit die Schätzgenauigkeit des Stichprobenverfahrens erhöht werden.

Allerdings ist bei Anwendung der angepassten Wasserbilanz die möglichst exakte Bestimmung des Volumens der Wasserverluste im Bilanzzeitraum zunächst nicht das vorrangige Ziel. Vielmehr soll durch die entwickelte Methodik inklusive dem angepassten Monitoringsystem das verantwortliche Betriebspersonal in die Lage versetzt werden, sich in der Praxis mit dem Thema Wasserverlustermittlung und -analyse auseinanderzusetzen und vertraut zu machen. Die angepasste Wasserbilanz soll hierbei das Personal hinsichtlich der wesentlichen Komponenten der Verluste in Wasserverteilungssystemen wie in Tiruvannamalai sensibilisieren und die Grundlage bilden für die gezielte Planung und Umsetzung von geeigneten Maßnahmen zur Wasserverlustreduzierung.

Tabelle 6.4: Kombinierte Messunsicherheiten der ermittelten Wasserverluste

Komponente	Volumenwert [m ³]	Art der Unsicherheit	Kombinierte Unsicherheit [m ³]
System Input Volume Q_{SIV}	31.330	Unsicherheit USD (3 %)	593
		Unsicherheit Woltmannzähler (2 %)	
		Unsicherheit Wasserstandlogger (0,05 %)	
Authorised Supply Q_S	24.940	Unsicherheit Hauswasserzähler (2 %)	2.421
		Unsicherheit Stichprobenverfahren (9,5 %)	
Water Losses Q_L	6.390	Kombinierte Unsicherheit	2.493

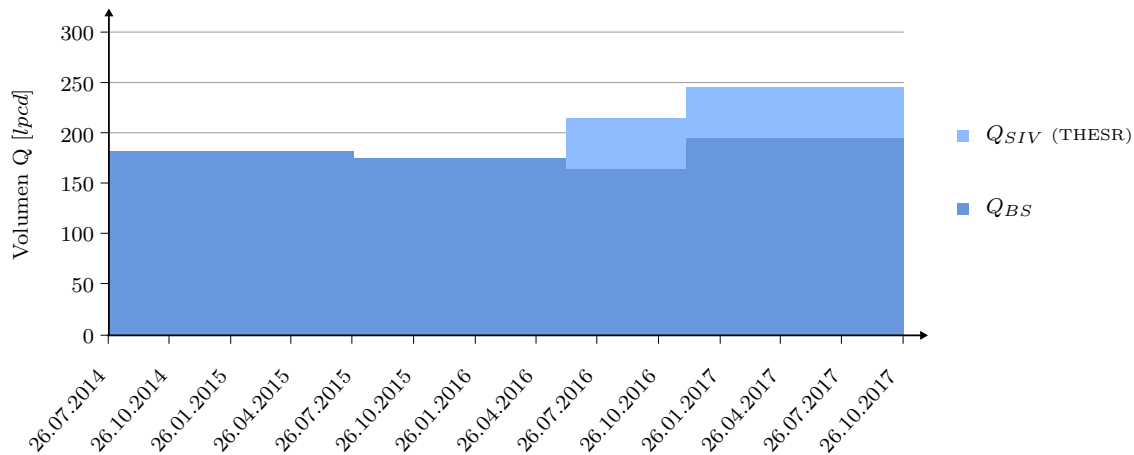
6.7.2 Plausibilität der Mess- und Schätzwerte

Die in den vorherigen Abschnitten dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf einen relativ kurzen Bilanzzeitraum aufgrund der eingeschränkt verfügbaren Datengrundlage. Da in einem kurzen Zeitraum beispielsweise die Systemeinspeisung außergewöhnlich hoch und die Rohrnetzabgabe vergleichsweise niedrig sein kann, kommt es in diesem Fall zu einem verzerrten Wert des aktuellen Wasserverlustvolumens basierend auf dem Bilanzverfahren. Daher sollen im Folgenden die verfügbaren Mess- und Schätzwerte der beiden Bilanzkomponenten über einen längeren Zeitraum betrachtet und somit die Plausibilität der Werte erörtert werden.

In Abbildung 6.26 sind die Werte für beide Komponenten in der Einheit $lpcd$ über die Laufzeit des Projekts dargestellt. Wie bereits beschrieben sind dabei für die Rohrnetzabgabe (*Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS}) im gesamten Betrachtungszeitraum Daten verfügbar, während für die Systemeinspeisung (*System Input Volume* Q_{SIV}) lediglich die Messdaten des Woltmannzählers und Wasserstandmessgeräts am Wasserturm THESR über einen längeren Zeitraum (Ende Mai 2016 bis Ende Oktober 2017) ohne Unterbrechung erhoben werden konnten.

Die anhand der Stichprobenmessungen geschätzte Pro-Kopf-Abgabe Q_{BS} variiert im Betrachtungszeitraum zwischen 163 und 195 $lpcd$. Neben saisonalen Schwankungen (Trocken-/Regenzeit) ist ein Grund hierfür die mit der Zeit veränderte Zusammensetzung der Stichprobe, die durch die unterschiedlichen gemessenen Abgabevolumina an die jeweiligen Stichprobenhaushalte Einfluss auf die Höhe von Q_{BS} hat. Diesbezüglich stellt sich die Frage, wie gut das anhand der Stichprobe geschätzte Volumen von Q_{BS} den tatsächlichen Volumenwert im Versorgungsgebiet widerspiegelt und ob nicht durch z.B. eine unausgewogene Stichprobenauswahl der tatsächliche Wert stark über- oder unterschätzt wird. Eine vollumfängliche Antwort auf diese Frage ließe sich nur durch eine vollständige Abdeckung des Versorgungsgebiets mit Hauswasserzählern und somit durch die Messung des tatsächlichen Werts geben, was im Anwendungsfall nicht möglich war.

Anhand von Abbildung 6.26 kann allerdings eine Einschätzung der Datenplausibilität gegeben werden. Ende November 2016 wurden insgesamt acht neue Haushalte mit Zählern ausgestattet, da sich im Laufe der Zeit die Anzahl der bestehenden

Abbildung 6.26: Zeitliche Entwicklung von Q_{SIV} und Q_{BS} über die Projektlaufzeit

Stichprobenhaushalte durch Defekte oder auf Betreiben der Bewohner verringert hatte und somit die Gefahr bestand, unter die geforderte Mindestabdeckung von 5 % der Haushalte im Versorgungsgebiet zu fallen. Dadurch ergeben sich zwei Betrachtungszeiträume von Ende Mai bis Ende November 2016 sowie von Ende November 2016 bis Ende Oktober 2017. Für den ersten Zeitraum betrug die geschätzte Pro-Kopf-Abgabe Q_{BS} 163 *lpcd* und für den zweiten Zeitraum 195 *lpcd*. In den gleichen Zeiträumen wurde am Wasserturm THESR eine Pro-Kopf-Einspeisung Q_{SIV} von 215 bzw. 246 *lpcd* gemessen. Somit lässt sich für eine um 31 *lpcd* erhöhte Einspeisung im zweiten Zeitraum eine nahezu identische Erhöhung der Rohrnetzabgabe von 32 *lpcd* feststellen. Trotz der relativ stark veränderten Zusammensetzung der Stichprobenauswahl (ca. 25 % des Stichprobenumfangs) wurde also ein ähnliches Verhältnis von Systemeinspeisung und Rohrnetzabgabe in beiden Zeiträumen ermittelt, wobei bei einem Anstieg der Einspeisung im zweiten Bilanzzeitraum die Abgabe ebenfalls anstieg. Dies lässt den Schluss zu, dass die anhand der Stichprobenmessungen geschätzten Werte der Rohrnetzabgabe als plausibel eingestuft werden können.

6.8 Übertragbarkeit der entwickelten Methodik

Die erfolgreiche Implementierung des Monitoringsystems sowie Erstellung der angepassten Wasserbilanz für das Pilotgebiet bestätigen zunächst die Anwendbarkeit der entwickelten Methodik zur angepassten Wasserverlustbilanzierung im intermittierend betriebenen Verteilungssystem Tiruvannamalais. An dieser Stelle soll nun die Übertragbarkeit auf andere Verteilungssysteme diskutiert werden. Grundsätzlich ist die Übertragbarkeit dadurch gegeben, dass bei der Entwicklung der Methodik die limitierenden Randbedingungen, die in vielen intermittierend betriebenen Verteilungssystemen weltweit und nicht nur in Tiruvannamalai vorherrschen, berücksichtigt und die Wasserbilanz sowie die Verfahren zur Ermittlung der Bilanzkomponenten dementsprechend angepasst wurden. So sind beispielsweise die in

der angepassten Bilanz explizit ausgewiesenen Verlustkomponenten wie die Wasserverschwendung im Kundenbereich oder finanzielle Verluste durch eine mangelhafte Ausgestaltung der Fixtarife keine Einzelphänomene speziell in Tiruvannamalai, sondern ein generelles Problem in vielen Entwicklungs- und Schwellenländern.

Sollten sich einzelne Randbedingungen von den Bedingungen wie in Tiruvannamalai unterscheiden, kann die entwickelte Methodik dementsprechend angepasst werden. Ist beispielsweise eine flächendeckende Abdeckung mit Kundenwasserzählern in einem Versorgungsgebiet gegeben, kann das Volumen der Bilanzkomponente *Flat-Rate Billed Authorised Supply* Q_{BS} direkt anhand der gemessenen Wassermengen ermittelt werden. In diesem Fall kann auf die Anwendung der statistischen Verfahren zur Schätzung des Volumens von Q_{BS} anhand von einer begrenzten Anzahl von Stichprobenzählern verzichtet werden. Wird das betrachtete Versorgungsgebiet intermittierend betrieben, sollte nichtsdestotrotz die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methodik zur Korrektur der Zählermesswerte hinsichtlich der Messabweichung durch Luftströmung angewandt werden.

Auch eine im Vergleich zu Tiruvannamalai unterschiedliche Ausgestaltung des Wassertarifs, beispielweise eine volumenabhängige Abrechnung gemäß Zählerablesungen, ist durch die in der angepassten Wasserbilanz integrierten Szenarien hinsichtlich der Komponenten *Revenue Water* Q_{RW} und *Non-Revenue Water* Q_{NRW} berücksichtigt.

Aufgrund des reduzierten Aufwands für die Installation und den Betrieb des angepassten Monitoringsystems eignet sich die entwickelte Methodik insbesondere für die erstmalige Durchführung einer Wasserverlustbilanzierung in Verteilungssystemen, in denen bisher keine Messtechnik zur Erhebung von Betriebsdaten eingesetzt wurde. Oftmals stellt die flächendeckende, verpflichtende Einführung von Kundenwasserzählern eine große Hürde zur Einführung eines kontinuierlichen Verlustmonitorings dar. Der Vorteil des angepassten Monitoringsystems liegt hier in der Installation einer reduzierten Zahl von Stichprobenzählern bei Haushalten, die freiwillig ihre Bereitschaft zur Netzabgabemessung für die Wasserverlustanalyse signalisiert haben. Ein weiterer positiver Effekt der Methodikanwendung ist der Gewinn von Systemkenntnissen durch das Betriebspersonal bei der Schaffung der erforderlichen Datengrundlage. In Tiruvannamalai wurde diesbezüglich das Pilotgebiet zum ersten Mal gemeinsam von Mitarbeitern der Stadtverwaltung (*Assistant Engineer* und *Operator*), einem Mitarbeiter der für Instandhaltungsmaßnahmen zuständigen Bau-firma sowie Mitarbeitern des *WaLUE*-Projekts systematisch abgegangen, um Daten über das Leitungsnetz sowie die angeschlossenen Haushalte im Versorgungsgebiet zu erheben.

Im Folgenden sollen die wichtigsten gewonnenen Erkenntnisse der erfolgreichen Implementierung der angepassten Wasserverlustbilanzierung im Pilotgebiet dargestellt werden. Diese Erkenntnisse können den Planungsprozess einer potentiellen Übertragung der entwickelten Methodik auf andere Wasserverteilungssysteme unterstützen.

Monitoringsystem: Bei der Messung der Systemeinspeisung hat sich der Einsatz robuster und in der Bedienung einfacher Messtechnik bewährt. Auch wenn im Vergleich zu komplexerer Technik Abstriche in der Messgenauigkeit gemacht werden müssen, sollte der Fokus auf der Gewährleistung einer kontinuierlichen Datenerfassung ohne Datenlücken liegen, die sich beispielsweise durch eine mangelhafte Stromversorgung oder Bedienfehler bei komplexeren Messgeräten ergeben können. In der intermittierenden Wasserverteilung muss insbesondere der Einfluss von Luft auf die jeweiligen Messgeräte berücksichtigt und wenn möglich durch bauliche Maßnahmen (z.B. Herstellung eines Dükers) minimiert werden. Als besonders effektiv hat sich der Einsatz eines Wasserstandloggers in einem Wasserturm herausgestellt. In Kombination mit einem Wasserzähler an der Zulaufleitung des Turms konnten nicht nur die eingespeiste Wassermenge in die Versorgungszone und die Anzahl und Dauer der intermittierenden Versorgungsperioden ermittelt, sondern auch die durch Behälterüberläufe verlorene Wassermenge bestimmt und der Behälter selbst auf Dichtheit überprüft werden.

Zur Messung der Rohrnetzabgabe an Stichprobenhaushalte wurde ebenfalls eine robuste und in der Auslesung einfache Messtechnik in Form von Einstrahl-Flügelradzählern genutzt. In Tiruvannamalai war die Installation und regelmäßige Auslesung der Wasserzähler an den Grundstücksgrenzen mit einem hohen Aufwand verbunden, da die geeigneten Installationsorte bei vielen Haushalten im unterirdisch verlegten Abschnitt der Anschlussleitungen lagen und daher jedes Mal Aushubarbeiten durch Hilfskräfte erforderlich waren. Diesbezüglich ist zu empfehlen, dass in anderen Verteilungssystemen vor der eigentlichen Zählerinstallation leicht zugängliche Installationsorte hergestellt werden, beispielsweise durch eine Modifizierung der Anschlussleitung innerhalb der Grundstücksgrenzen. Entscheidend für die kontinuierliche Datenerfassung ist eine regelmäßige Überprüfung und Wartung der Zähler (z.B. Reinigung der Filter), um einen Ausfall der Zähler durch Defekte oder Verstopfung zu vermeiden bzw. frühzeitig einen Zähleraustausch vorzunehmen.

Zur Vermeidung von Fehlern bei der Auslesung der Kundenwasserzähler hat sich die Fotodokumentation der aktuellen Zählerwerte bewährt, um deren korrekte Erfassung und Archivierung im Nachgang der Auslesung prüfen zu können.

Verbraucherinformation und -betreuung: Von entscheidender Bedeutung für die erfolgreiche Implementierung des Monitoringsystems war die von Anfang an transparente Kommunikation mit den Verbrauchern im Pilotgebiet. Im Rahmen mehrerer Vor-Ort-Einsätze im Vorfeld der Implementierungsmaßnahmen wurden diese durch Flugblätter und persönliche Gespräche über die Zielsetzung der angepassten Wasserverlustbilanzierung informiert. Besonderes Augenmerk lag dabei auf der umfassenden Aufklärung über die geplante Installation von Kundenwasserzählern zur Messung der Rohrnetzabgabe. Dies war erforderlich, da bis zu diesem Zeitpunkt im gesamten Stadtgebiet vor allem aus (sozial-)politischen Gründen keine Zählermessung erfolgte und der Wasserzähler von vielen Verbrauchern zunächst vor allem als Werkzeug zur Überwachung und Abrechnung ihres Verbrauchs angesehen wurde. Diesbezüglich wurde herausgestellt, dass die Messungen im Rahmen des

Projekts ausschließlich der Wasserverlustanalyse dienen und in der Projektlaufzeit keine Abrechnung anhand der gemessenen Zählerwerte stattfinden werde.

Bei der Auswahl der Stichprobenhaushalte zur Zählerinstallation war ein wichtiges Kriterium die freiwillige Bereitschaftserklärung der Hausbesitzer. Den Bewohnern der ausgewählten Haushalte wurde mitgeteilt, dass sie sich im Falle von Problemen, beispielsweise einer ungenügenden Wasserversorgung aufgrund eines verstopften Zählerfilters, unmittelbar an den zuständigen *Operator* der Stadtverwaltung zur Behebung des Problems wenden sollten. Durch eine enge Betreuung der Verbraucher sollte somit die Akzeptanz der Zählermessungen im Pilotgebiet gewährleistet werden.

Nichtsdestotrotz zogen im Laufe der Projektlaufzeit vereinzelte Haushalte ihre Bereitschaft zur Zählermessung zurück. Grund hierfür war vor allem die teilweise zu späte Adressierung von Problemen mit den Zählern seitens der Stadtverwaltung, obwohl von Projektseite aus mehrfach auf die entscheidende Bedeutung einer guten Verbraucherbetreuung hingewiesen wurde. In den genannten Fällen wurde der Zähler umgehend ausgebaut und gemeinsam mit dem zuständigen *Operator* zeitnah ein alternativer Haushalt zur Sicherstellung einer ausreichenden Zählerabdeckung im Pilotgebiet ausgewählt.

Technologie- und Wissenstransfer: Die nachhaltige Implementierung von Methoden und Technologien, die an die vorherrschenden Randbedingungen in Entwicklungs- und Schwellenländern angepasst sind, ist in hohem Maße abhängig von einem erfolgreichen Technologie- und Wissenstransfer. Dieser Transfer sollte auch bei interdisziplinären Forschungs- und Entwicklungsvorhaben wie dem *WaLUE*-Projekt mit beteiligten deutschen und indischen Partnern aus Wissenschaft und Industrie durch entsprechende Maßnahmen sichergestellt werden. In Bezug zur Implementierung der angepassten Wasserverlustbilanzierung wurde die Stadtverwaltung Tiruvannamalai daher zunächst umfassend in den Planungs- und Umsetzungsprozess einbezogen. So war die Stadtverwaltung federführend bei der Auswahl eines geeigneten Pilotgebiets, in dem die Chancen zur erfolgreichen Implementierung der entwickelten Methodik am vielversprechendsten waren. Dies bezog sich neben den klar definierten Systemgrenzen der ausgewählten Versorgungszone vor allem auf die Bereitschaft der Verbraucher zur erstmaligen Installation von Kundenwasserzählern. Im Sinne einer partnerschaftlichen Zusammenarbeit erfolgte die Entwurfsplanung des entwickelten Monitoringsystem auf deutscher Seite, während die Ausführungsplanung und schlussendliche Implementierung größtenteils von indischer Seite in finanzieller und technischer Eigenverantwortung erfolgen sollte. Nach erfolgreicher Implementierung sollte das Betriebspersonal der Stadtverwaltung im Zuge mehrerer Vor-Ort-Einsätze von *WaLUE*-Projektmitarbeitern in der Datenauslesung sowie der Behebung möglicher Probleme geschult werden, um anschließend die regelmäßige Auslesung der implementierten Messtechnik eigenständig durchzuführen zu können.

In der Praxis zeigte sich jedoch, dass der angestrebte Technologie- und Wissenstransfer nur eingeschränkt erfolgen konnte. Grund dafür war der eklatante Perso-

nalmangel in den für die Wasserverteilung zuständigen Abteilungen der Stadtverwaltung. Schon während den Implementierungsmaßnahmen des Monitoringsystems war die technische Begleitung von deutscher Seite erforderlich, da für die eigentlich zuständigen Ingenieure der Stadtverwaltung aufgrund ihrer zahlreichen Aufgabenfelder (Strom- und Wasserversorgung, Abwasserentsorgung, Infrastruktur) diese mehrtägige Begleitung nicht leistbar war. Auch für die regelmäßige Datenauslesung sowie die anschließende Auswertung und Erstellung der Wasserbilanz war kein Betriebspersonal verfügbar. Die Auslesungen erfolgten daher durch lokale, geschulte Mitarbeiter des *WaLUE*-Projekts. Daher sollte bei der Übertragung der entwickelten Methodik zur angepassten Wasserverlustbilanzierung in anderen Verteilungssystemen zunächst die Verfügbarkeit von ausreichend Betriebspersonal sichergestellt werden.

Grundsätzlich gilt, dass die Einführung eines Wasserverlustmanagements einen langfristigen Reformprozess darstellt, der neben Veränderungen in der Organisation und Struktur der einzelnen Versorgungsunternehmen vor allem auch auf institutioneller und politischer Ebene einen Paradigmenwechsel erfordert, um die entsprechenden Rahmenbedingungen zu setzen. Diese Änderungsprozesse können durch eine pilothafte Demonstration des Prinzips der Wasserverlustbilanzierung als erstem zentralem Schritt des Wasserverlustmanagements unterstützt werden. Dazu bietet es sich an, ein angepasstes Monitoringsystem in einem Pilotgebiet ähnlich wie in Tiruvannamalai zu implementieren. Anschließend kann anhand der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methodik allen an der Wasserversorgung beteiligten Akteuren und Entscheidungsträgern die Anwendung und das Potential, aber auch der erforderliche Aufwand der regelmäßigen Wasserverlustbilanzierung in der Praxis verdeutlicht werden (Abbildung 6.27).



Abbildung 6.27: Demonstration des angepassten Monitoringsystems im Rahmen eines *WaLUE*-Projektworkshops (Quelle: IEEM (2017))

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Angesichts der limitierten Verfügbarkeit nutzbarer Wasserressourcen, die neben der naturräumlich ungleichen globalen Verteilung vor allem durch anthropogene Eingriffe wie Gewässerverschmutzung und die Folgen des Klimawandels noch verschärft wird, steht die Wasserversorgung der stetig wachsenden Weltbevölkerung vor großen Herausforderungen. Während in den meisten Industrienationen die entsprechenden Rahmenbedingungen geschaffen sind und der erforderliche technische und finanzielle Aufwand zur Deckung des Wasserbedarfs geleistet werden kann, ist in vielen Entwicklungs- und Schwellenländern die flächendeckende Wasserversorgung der Bevölkerung mit einer ausreichenden Menge und in einwandfreier Qualität nicht gegeben. Ein wesentlicher Grund dafür ist der defizitäre Betrieb der leitungsgebundenen Wasserversorgungssysteme, die entgegen ihrer Konzeption für eine kontinuierliche Versorgung nur zeitweise mit Wasser beschickt werden. Die Gründe dieser intermittierenden Betriebsweise sind vielfältig und stehen untereinander in Wechselwirkung. Eine Ursache und zugleich Folge der intermittierenden Wasserverteilung sind hohe Wasserverluste, die erhebliche negative ökonomische, ökologische, technische und soziale Auswirkungen auf die betroffenen Menschen sowie die Umwelt haben können.

Die effiziente Reduktion von Wasserverlusten auf ein wirtschaftlich sinnvolles Niveau ist somit eine der zentralen Herausforderungen für Versorgungsunternehmen weltweit, da der Verlust von gewonnenen, aufbereiteten und teilweise über lange Strecken geförderten und verteilten Wassermengen einer nachhaltigen und ressourcenschonenden Wasserversorgung in direkter Weise entgegensteht. Diesbezüglich existieren zwar Methoden und Technologien des Wasserverlustmanagements, die inzwischen weltweit anerkannt und in vielen Industrienationen als Stand der Technik angewandt werden. Diese wurden allerdings basierend auf den in den meisten Industrienationen gegebenen Randbedingungen, wie beispielsweise einer kontinuierlichen Wasserversorgung, konzipiert und sind in ihrer Anwendung oftmals mit einem hohen Aufwand für die Versorgungsunternehmen verbunden. Daher sind die bestehenden Methoden und Technologien zum Teil nur bedingt für die direkte Anwendbarkeit in vielen intermittierend betriebenen Versorgungssystemen in Entwicklungs- und Schwellenländern geeignet.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde dementsprechend die von der *International Water Association* (IWA) in standardisierter Form eingeführte Wasserverlustbilanzierung angepasst, um die aktuelle Verlustsituation in intermittierend betriebenen Verteilungssystemen mit den typischen Randbedingungen zielgerichtet analysieren und

bewerten zu können. Diesbezüglich sollten Verfahren zur Ermittlung und Bewertung der angepassten Bilanzkomponenten bereitgestellt werden, die mit möglichst geringem technischem und finanziellem Aufwand umzusetzen sind. Die Anwendbarkeit der entwickelten Methodik wurde pilothaft im Rahmen des Verbundvorhabens *WaLUE* in einer Versorgungszone der südindischen Projektstadt Tiruvannamalai demonstriert.

Um das Verständnis der mit einer intermittierenden Betriebsweise von Verteilungssystemen verbundenen Probleme sowie des Bedarfs angepasster Problemlösungen zu erleichtern, wurden im ersten Teil der Arbeit zunächst die erforderlichen Grundlagen und der Stand der Technik hinsichtlich Wasserverteilungssystemen sowie dem Wasserverlustmanagement vermittelt. Der Abschnitt beginnt dabei mit einem Exkurs zum Thema Wasserversorgung als menschliches Grundbedürfnis und Recht, da schlussendlich alle technischen Aspekte der Wasserversorgung und -verteilung der Umsetzung dieses in der Weltgemeinschaft anerkannten Rechts und damit dem übergeordneten Ziel der Bereitstellung von Trinkwasser in ausreichender Menge und einwandfreier Qualität für alle Verbraucher dienen. Dementsprechend sind die Verteilungssysteme nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik in kontinuierlicher Weise zu betreiben und instand zu halten.

Eine wesentliche Aufgabe ist dabei die Minimierung von Wasserverlusten durch ein effektives Wasserverlustmanagement. Die typischen Rahmenbedingungen sowie Ursachen und Auswirkungen intermittierend betriebener Verteilungssysteme, die beispielhaft an der Projektstadt Tiruvannamalai aufgezeigt werden, limitieren jedoch zum Teil die schlüssige Anwendung der etablierten Methoden und Technologien des Wasserverlustmanagements. Angesichts der weltweiten Verbreitung der intermittierenden Verteilung, von der nach jüngsten Schätzungen über eine Milliarde Menschen betroffen sind, ist diesbezüglich ein hoher Bedarf an angepassten Lösungen gegeben.

Diesem Bedarf entsprechend erfolgte die im zweiten Teil der Arbeit dargestellte Konzeption und Entwicklung der angepassten Wasserverlustbilanzierung. Die zwei wesentlichen Bestandteile sind eine angepasste Wasserbilanz und ein Monitoringsystem, die im Vergleich zur bestehenden IWA-Methodik die typischen Randbedingungen wie die intermittierende Wasserverteilung, die fehlende flächendeckende Messung der erforderlichen Betriebsdaten sowie eine volumenunabhängige Kundenabrechnung mittels Fixtarif berücksichtigen. Anhand der angepassten Bilanz kann zum einen die in derartigen Verteilungssystemen teilweise erhebliche Wasserverschwendung im Kundenbereich quantifiziert werden, die zu Lasten des Versorgungsunternehmens geht und daher zur Wasserverlustmenge beiträgt. Zum anderen lassen sich die betriebswirtschaftlichen Verluste bei einer mangelhaften Ausgestaltung des Fixtarifs ermitteln, die sich aufgrund der teilweise deutlichen Unterschiede zwischen den tatsächlich an die Verbraucher abgegebenen Wassermengen und den in Rechnung gestellten Mengen ergeben.

Das Monitoringsystem für die kontinuierliche Erhebung der erforderlichen Betriebsdaten dient der vollständigen Erfassung der Rohrnetzeinspeisung und einer stichprobenartigen Messung der Rohrnetzabgabe an die Verbraucher durch Wasserzähler, um anschließend mittels statistischer Verfahren eine möglichst präzise Schät-

zung der aktuellen Wasserverlusthöhe im betrachteten Verteilungssystem durchführen zu können. Diesbezüglich wurde, basierend auf den experimentellen Untersuchungsergebnissen eines im Rahmen der Arbeit konzipierten Versuchstands, ein Verfahren zur Korrektur der gemessenen Zählerwerte hinsichtlich der Messabweichung durch Luftströmung in der intermittierenden Verteilung entwickelt. Ein Microsoft Excel-basiertes und in der Handhabung einfaches Werkzeug ermöglicht schließlich die regelmäßige Erstellung der angepassten Wasserbilanz anhand der validierten und statistisch ausgewerteten Eingangsdaten des Monitoringsystems.

Die im dritten Teil der Arbeit dargestellten Ergebnisse der pilothaften Umsetzung in Tiruvannamalai zeigten, dass die angepasste Wasserverlustbilanzierung eine erste Einschätzung der aktuellen Verlustsituation in intermittierend betriebenen Verteilungssystemen ermöglicht. Darüber hinaus können die Bilanzergebnisse den Entscheidungsfindungsprozess hinsichtlich zielführender Maßnahmen zur Verlustreduktion unterstützen. In Tiruvannamalai konnte der für die Wasserversorgung zuständigen Stadtverwaltung zum einen das Potential von Maßnahmen zur Reduktion von Wasserverlusten aufgrund häuslicher Verschwendung aufgezeigt werden. Zudem wurde anhand der Bilanz deutlich, dass der Stadtverwaltung eine Anpassung des Fixtarifs an die effektive Rohrnetzabgabe dringend zu empfehlen ist, um das Einkünfte generierende Wasservolumen und somit das verfügbare Budget für den Betrieb und Instandhaltung des Wasserverteilungssystems zu erhöhen.

Die pilothafte Umsetzung zeigte auch entscheidende Faktoren für eine erfolgreiche Implementierung der entwickelten Methodik und insbesondere die Sicherstellung einer kontinuierlichen Datenerfassung durch das Monitoringsystem auf. Dazu zählen zum einen der Einsatz von robuster, in der Bedienung sowie Wartung einfacher Messtechnik und die Verfügbarkeit von ausreichend Betriebspersonal zur regelmäßigen Datenauslesung und -auswertung sowie Betreuung des Monitoringsystems. Zum anderen sollte der Umsetzungsprozess durch eine umfassende Information der Verbraucher über Ansatz und Ziele der Wasserverlustbilanzierung und insbesondere des Einsatzes von Wasserzählern im Kundenbereich begleitet werden.

7.2 Ausblick

Für die Fallstudie Tiruvannamalai konnte die Anwendbarkeit der angepassten Wasserverlustbilanzierung in intermittierend betriebenen Wasserverteilungssystemen pilothaft demonstriert werden. Aufgrund einer stark limitierten Verfügbarkeit einer vollständigen Messdatenreihe war jedoch die Erstellung der Wasserbilanz lediglich für einen zeitlich sehr beschränkten Zeitraum möglich. Unter Sicherstellung der kontinuierlichen Datenerfassung des implementierten Monitoringsystems sollte daher zunächst die Verlustbilanzierung in der Pilotzone über einen Zeitraum von mehreren Monaten bis zu einem Jahr erfolgen, um die bisherigen Bilanzergebnisse zu validieren. Da jedoch aufgrund mangelnden Betriebspersonals die regelmäßige Datenauslesung und -auswertung zur Erstellung der angepassten Wasserbilanz bisher durch Mitarbeiter des *WaLUE*-Verbundprojekts erfolgte, sind zunächst die perso-

nellen und organisatorischen Voraussetzungen bei der Stadtverwaltung Tiruvannamalais zu schaffen. Anschließend sollte die angepasste Wasserverlustbilanzierung als regelmäßig durchzuführende Aufgabe in den technischen Betrieb der Wasserversorgung integriert werden. Die Ergebnisse der Bilanzierung sollten hinsichtlich den Wasserverlustkomponenten durch geeignete induktive Verfahren, wie beispielsweise dem *Stop-Tap*-Verfahren zur Bestimmung von Wasserverlustmengen im Leitungsnetz, validiert werden.

Da die Ermittlung der angepassten Bilanzkomponenten zum Teil auf statistischen Stichprobenverfahren basieren, bieten sich diesbezüglich weiterführende Untersuchungen an. Beispielsweise könnte in der bisher stichprobenartig mit Kundenwasserzählern ausgestattete Pilotzone eine flächendeckende Abdeckung mit Zählern an allen angeschlossenen Haushalte hergestellt werden. Mit Hilfe des dadurch bekannten, wahren Volumens der Rohrnetzabgabe könnte für andere intermittierend betriebene Verteilssysteme, beispielsweise für die restlichen Versorgungszonen Tiruvannamalais, untersucht werden, wie groß der zu realisierende Stichprobenumfang zur Schätzung der Rohrnetzabgabe mit der jeweils gewünschten Genauigkeit ungefähr sein sollte.

Das im Rahmen der Arbeit entwickelte Verfahren zur Korrektur von Zählermesswerten hinsichtlich Abweichungen durch Luftströmung basiert auf experimentellen Laboruntersuchungen sowie einigen vereinfachenden Annahmen bezüglich der Übertragung der Laborergebnisse auf ein reales Verteilungssystem. Für ein verbessertes Verständnis der Prozesse während des Luftstroms sowie einer Zweiphasenströmung durch einen Wasserzähler könnten diesbezüglich numerische Simulationen unter Berücksichtigung kompressibler und thermodynamischer Effekte durchgeführt und ausgewertet werden. Zudem könnte das bisherige Verfahren durch Untersuchungen bezüglich der realen Aufteilung des Luftflusses in den Versorgungsleitungen auf die Anschlussleitungen bei der Befüllung eines intermittierend betriebenen Wasserverteilungssystems verbessert werden.

Literaturverzeichnis

- [ADB 2005] ADB: Kerala Sustainable Urban Development Project: Final Report Volume 2 - City Report Kochi / Asian Development Bank (ADB), Government of Kerala. Manila, Philippinen, Mai 2005. – Bericht
- [ADB 2007] ADB: *2007 Benchmarking and Data Book of Water Utilities in India*. Asian Development Bank, (ADB), Ministry of Urban Development Government of India, 2007
- [ADB 2012] ADB: Jammu and Kashmir Urban Sector Development Investment Program: Jammu City Water Supply Subproject / Asian Development Bank (ADB). Manila, Philippinen, April 2012. – Bericht
- [Agrawal 2008] AGRAWAL, P. C.: *Developing Effective Billing and Collection Practices / World Bank, Water and Sanitation Program*. Washington DC, USA, April 2008. – Bericht
- [Alegre u. a. 2016] ALEGRE, H. ; BAPTISTA, J. M. ; CABRERA, E. ; CUBILLO, F. ; DUARTE, P. ; HIRNER, W. ; MERKEL, W. ; PARENA, R.: *Performance Indicators for Water Supply Services*. Third Edition. London, UK : IWA Publishing, 2016. – 404 S
- [Alegre u. a. 2000] ALEGRE, H. ; HIRNER, W. ; BAPTISTA, J.M. ; PARENA, R.: *Performance Indicators for Water Supply Services*. First Edition. London, UK : IWA Publishing, 2000. – 150 S
- [Amiraly und Kanniganti 2011] AMIRALY, A. ; KANNIGANTI, A.: The impact of a pilot water metering project in an Indian city on users' perception of the public water supply. In: *Field Actions Science Reports* Vol. 5 (2011)
- [Andey und Kelkar 2007] ANDEY, Subhash P. ; KELKAR, Prakash S.: Performance of water distribution systems during intermittent versus continuous water supply. In: *Journal of the American Water Works Association* 99 (2007), August, Nr. 8, S. 99–107
- [Anna University 2006] ANNA UNIVERSITY: Conversion of CCP into Business Plan for Thiruvannamalai / Department of Planning, School of Architecture and Planning Anna University. August 2006. – Bericht
- [Arregui u. a. 2006] ARREGUI, F. ; CABRERA JR, E.. ; COBACHO, R.: *Integrated Water Meter Management*. London, UK : IWA Publishing, 2006. – 284 S

- [Arregui u. a. 2005] ARREGUI, F. ; CABRERA JR, E.. ; COBACHO, R. ; GARCÍA-SERRA, J.: Key Factors Affecting Water Meter Accuracy. In: *Proceedings of the IWA Specialised Conference 'Leakage 2005'*. Halifax, Nova Scotia, Kanada : International Water Association (IWA), September 2005, S. 1–10
- [Arregui u. a. 2007] ARREGUI, F. ; PARDO, M.A. ; PARRA, J.C. ; SORIANO, J.: Quantification of meter errors of domestic users: a case study. In: *Proceedings of the IWA International Specialised Conference 'Water Loss 2007'*. Bukarest, Rumänien : International Water Association (IWA), September 2007
- [ATT u. a. 2015] ATT ; BDEW ; DBVW ; DVGW ; DWA ; VKU: Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft 2015 / wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH. Bonn, 2015. – Bericht
- [Auer und Rottmann 2015] AUER, Benjamin ; ROTTMANN, Horst: *Statistik und Ökonometrie für Wirtschaftswissenschaftler*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. – 763 S
- [AWWA 2009] AWWA ; ASSOCIATION, American Water W. (Hrsg.): *M36 Water Audits and Loss Control Programs*. 2009
- [Bal u. a. 2015] BAL, Prasanta K. ; RAMACHANDRAN, A. ; GEETHA, R. ; BHASKARAN, B. ; THIRUMURUGAN, P. ; INDUMATHI, J. ; JAYANTHI, N.: Climate change projections for Tamil Nadu, India: deriving high-resolution climate data by a downscaling approach using PRECIS. In: *Theoretical and Applied Climatology* 123 (2015), Nr. 3-4, S. 523–535
- [BDEW 2015a] BDEW: *Vergleich Europäischer Wasser- und Abwasserpreise*. Berlin : Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V., April 2015
- [BDEW 2015b] BDEW: *Wasserkunden sagen ihre Meinung - Ergebnisse des BDEW-Kundenbarometers Wasser / Abwasser 2015*. Berlin : Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V., April 2015
- [BDEW 2019] BDEW: *Wasserfakten im Überblick*. Berlin : Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V., März 2019
- [BGBI 2014] BGBL: *Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Versorgung mit Wasser (AVBWasserV)*. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2014
- [BGBI 2016] BGBL: *Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TrinkwV 2001)*. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2016
- [BIS 2012] BIS: *Drinking Water - Specification*. New Delhi, Indien : Bureau of Indian Standard, May 2012

- [BMJV 2019] BMJV: *Mess- und Eichverordnung*. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2019
- [Boland und Whittington 2000] BOLAND, John J. ; WHITTINGTON, Dale: Water tariff design in developing countries: disadvantages of increasing block tariffs (IBTs) and advantages of uniform price with rebate (UPR) designs. In: *IDRC Research Paper* (2000)
- [Bollrich 2013] BOLLRICH, Gerhard: *Technische Hydromechanik 1: Grundlagen*. 7. Auflage. Berlin : Beuth, 2013. – 449 S
- [Bortz und Döring 2006] BORTZ, Jürgen ; DÖRING, Nicola: *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler*. 4. Auflage. Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. – 897 S
- [Boussard u. a. 2014] BOUSSARD, H. ; DELOGE, V. ; LANDE, L. van de ; NEUMEYER, H.: *The Human Rights to Water and Sanitation in Courts Worldwide—A Selection of National, Regional and International Case Law*. Genf, Schweiz : WaterLex and WASH United, 2014
- [Bradley u. a. 2002] BRADLEY, Robert M. ; WEERATANE, Stanley ; MEDIWAKE, Tilak M. M.: Water use projections in developing countries. In: *Journal of the American Water Works Association* 94 (2002), August, Nr. 4, S. 52–63
- [Brucker u. a. 2008] BRUCKER, A. ; BERNARD, H. ; DORNAUF, H. ; GRUNERT, F. ; HOFMANN, F.: *Durchflusssmesstechnik*. Oldenbourg Industrieverlag GmbH, 2008. – 168 S
- [Van der Bruggen u. a. 2009] BRUGGEN, B. Van der ; BORGHGRAEF, K. ; VINCNIER, C.: Causes of Water Supply Problems in Urbanised Regions in Developing Countries. In: *Water Resources Management* 24 (2009), November, Nr. 9, S. 1885–1902
- [Bundeskartellamt 2016] BUNDESKARTELLAMT: Bericht über die großstädtische Trinkwasserversorgung in Deutschland. Bonn, Juni 2016. – Bericht
- [Burgess 2016] BURGESS, T.: *Water: At What Cost? The State of the World's Water 2016*. London, UK : WaterAid, März 2016
- [Butler und Memon 2006] BUTLER, David ; MEMON, Fayyaz A.: *Water Demand Management*. London, UK : IWA Publishing, 2006. – 380 S
- [Carteado und Vermersch 2016] CARTEADO, F. ; VERMERSCH, M.: *Apparent Water Losses generated by Unauthorised Consumption: Assessment and Corrective Actions. Appendix 4 of the Guidance Notes on Apparent Losses and Water Loss Reduction Planning*. London, UK : IWA Water Loss Specialist Group, 2016

- [CESCR 2003] CESCR: *General Comment No. 15: The Right to Water (Arts. 11 and 12 of the Covenant)*. UN Committee on Economic, Social and Cultural Rights (CESCR), 2003
- [Charalambous und Laspidou 2017] CHARALAMBOUS, Bambos ; LASPIDOU, Chrysi: *Dealing with the Complex Interrelation of Intermittent Supply and Water Losses*. London, UK : IWA Publishing, 2017. – 162 S
- [CPHEEO 1999] CPHEEO: *Manual on Water Supply and Treatment*. New Delhi, Indien : Central Public Health Environmental Engineering Organisation, Ministry of Urban Development, Mai 1999
- [CPHEEO 2005] CPHEEO: *Manual on Operation and Maintenance of Water Supply Systems*. New Delhi, Indien : Central Public Health Environmental Engineering Organisation, Ministry of Urban Development, Januar 2005
- [Criminisi u. a. 2009] CRIMINISI, A. ; FONTANAZZA, C. M. ; FRENI, G. ; LOGGIA, G. L.: Evaluation of the apparent losses caused by water meter under-registration in intermittent water supply. In: *Water Science and Technology* 60 (2009), Nr. 9, S. 2373–2382
- [Cullet 2013] CULLET, Philippe: Right to water in India - plugging conceptual and practical gaps. In: *The International Journal of Human Rights* 17 (2013), Nr. 1, S. 56–78
- [Danilenko u. a. 2014] DANILENKO, A. ; BERG, C. van den ; MACHEVE, Berta ; MOFFITT, L. J.: *The IBNET water supply and sanitation blue book 2014: the international benchmarking network for water and sanitation utilities data book*. Washington DC, USA : World Bank, Water and Sanitation Program, 2014
- [Dhigade u. a. 2014] DHIGADE, R. R. ; KADU, M. S. ; PANDE, A. M.: Challenges in Water Loss Management of Water Distribution Systems in Developing Countries. In: *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJIRSET)* 3 (2014), Juni, Nr. 6, S. 13838–13846
- [DIN 1983] DIN: *DIN 4046 Wasserversorgung - Begriffe*. Deutsches Institut für Normung e.V., September 1983
- [DIN 1995a] DIN: *DIN EN ISO 6708 Rohrleitungsteile- Definition und Auswahl von DN (Nennweite)*. Deutsches Institut für Normung e.V., September 1995
- [DIN 1995b] DIN: *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen*. 1. Auflage. Berlin, Deutschland : DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 1995. – 114 S. – Wasserzähler
- [DIN 1998] DIN: *DIN EN 1508, Wasserversorgung - Anforderungen an Systeme und Bestandteile der Wasserspeicherung*. Deutsches Institut für Normung e.V., Dezember 1998

- [DIN 2000] DIN: *DIN EN 805, Wasserversorgung - Anforderungen an Wasserversorgungssysteme und deren Bauteile außerhalb von Gebäuden*. Deutsches Institut für Normung e.V., März 2000
- [DIN 2012] DIN: *DIN 31051, Grundlagen der Instandhaltung*. Deutsches Institut für Normung e.V., September 2012
- [DIN 2014] DIN: *DIN EN ISO 4064-1 Wasserzähler zum Messen von kaltem Trinkwasser und heißem Wasser – Teil 1: Metrologische und technische Anforderungen*. Deutsches Institut für Normung e.V., Mai 2014
- [DIN 2017] DIN: *DIN 2000 Zentrale Trinkwasserversorgung - Leitsätze für Anforderungen an Trinkwasser, Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung der Versorgungsanlagen - Technische Regel des DVGW*. Deutsches Institut für Normung e.V., Februar 2017
- [DIN 2018] DIN: *DIN EN 736-1, Armaturen - Terminologie Teil 1: Definition der Grundbauarten*. Deutsches Institut für Normung e.V., Mai 2018
- [DVGW 1981] DVGW: *Merkblatt W 610 Förderanlagen - Bau und Betrieb*. Bonn : Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Mai 1981
- [DVGW 2003] DVGW: *Arbeitsblatt W 392 Rohrnetzinspektion und Wasserverluste - Maßnahmen, Verfahren und Bewertung*. Bonn : Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Mai 2003
- [DVGW 2004a] DVGW: *Arbeitsblatt W 400-1 Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV) | Teil 1: Planung*. Bonn : Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Oktober 2004 (W 400-1)
- [DVGW 2004b] DVGW: *Arbeitsblatt W 400-2 Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV) | Teil 2: Bau und Prüfung*. Bonn : Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., September 2004
- [DVGW 2006a] DVGW: *Arbeitsblatt GW 303-1 Berechnung von Gas- und Wasserrohrnetzen - Teil 1: Hydraulische Grundlagen, Netzmodellierung und Berechnung*. Bonn : Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Oktober 2006
- [DVGW 2006b] DVGW: *Arbeitsblatt W 400-3 Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV) | Teil 3: Betrieb und Instandhaltung*. Bonn : Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., September 2006
- [DVGW 2010] DVGW: *Arbeitsblatt W 402 Netz- und Schadenstatistik – Erfassung und Auswertung von Daten zur Instandhaltung von Wasserrohrnetzen*. Bonn : Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., September 2010

- [DVGW 2012] DVGW: *Arbeitsblatt W 406 Volumen- und Durchflussmessung von kaltem Trinkwasser in Druckrohrleitungen - Auswahl, Bemessung, Einbau und Betrieb von Wasserzählern*. Bonn : Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Januar 2012
- [DVGW 2015] DVGW: *Arbeitsblatt W 400-1 Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV) - Teil 1: Planung*. Bonn : Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Februar 2015
- [DVGW 2017] DVGW: *Arbeitsblatt W 392 (A) Wasserverlust in Rohrnetzen; Ermittlung, Wasserbilanz, Kennzahlen, Überwachung*. Bonn : Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., September 2017
- [EG 2004] EG: *Richtlinie 2004/22/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 31. März 2004 über Messgeräte*. März 2004
- [EPA 2010] EPA: *Control and mitigation of drinking water losses in distribution systems*. Washington, D.C., USA : United States Environmental Protection Agency (US EPA), November 2010
- [Ercumen u. a. 2015] ERCUMEN, A. ; ARNOLD, B.F. ; KUMPEL, E. ; BURT, Z. ; RAY, I. ; NELSON, K. ; COLFORD, J.M.: Upgrading a Piped Water Supply from Intermittent to Continuous Delivery and Association with Waterborne Illness: A Matched Cohort Study in Urban India. In: *PLOS Medicine* 12 (2015), oct, Nr. 10, S. e1001892
- [EU 2015] EU: *EU Reference Document Good Practices on Leakage Management WFD CIS WG PoM*. Luxemburg : European Commission. Directorate-General for the Environment, 2015. – 114 S
- [EUREAU 2017] EUREAU: *Europe's water in figures. An overview of the European drinking water and waste water sectors / The European Federation of National Associations of Water Services*. Brüssel, Belgien, Oktober 2017. – Bericht
- [Eyuboglu und Al-Shukti 2003] EYUBOGLU, M. ; AL-SHUKTI, H.: Detection of water leaks using ground penetrating radar. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Applied Geophysics*. Orlando, Florida, USA, 2003
- [Fanner 2004] FANNER, P.: Assessing real water losses: a practical approach. In: *Water 21 - Magazine of the International Water Association* (2004), S. 49–50
- [Fantozzi 2009] FANTOZZI, M.: Reduction of customer meters under-registration by optimal economic replacement based on meter accuracy testing programme and Unmeasured Flow Reducers. In: *Proceedings of the IWA Water Loss Conference 2009*. Cape Town, South Africa, 2009

- [Farley u. a. 2008] FARLEY, M. ; WYETH, G. ; GHAZALI, Z.B.M. ; Istandar, A. ; SINGH, S.: *The Manager's Non-Revenue Water Handbook - A Guide to Understanding Water Losses*. Kuala Lumpur, Malaysia : Ranhill Utilities Berhad and United States Agency for International Development (USAID), 2008. – 98 S
- [Farley 2001] FARLEY, Malcolm ; 'WATER SUPPLY AND SANITATION COLLABORATIVE COUNCIL (Hrsg.): *Leakage Management and Control*. Geneva, Switzerland : World Health Organization, 2001. – 169 S
- [Frauendorfer und Liemberger 2010] FRAUENDORFER, R. ; LIEMBERGER, R.: *The Issues and Challenges of Reducing Non-Revenue Water* / Asian Development Bank. Mandaluyong City, Philippinen, 2010. – Bericht
- [Galaitzi u. a. 2016] GALAITSI, S. ; RUSSELL, Robert ; BISHARA, Amahl ; DURANT, John ; BOGLE, Jennifer ; HUBER-LEE, Annette: *Intermittent Domestic Water Supply: A Critical Review and Analysis of Causal-Consequential Pathways*. In: *Water* 8 (2016), Nr. 7, S. 274
- [Gaßmann und Gries 2009] GASSMANN, E. ; GRIES, A.: *Elektronische Druckmesstechnik*. München : Süddeutscher Verlag onpact GmbH, 2009
- [GIZ 2011] GIZ: *Guidelines for Water Loss Reduction - A Focus on Intelligent Pressure Management*. Eschborn, Deutschland : Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, März 2011. – 232 S
- [GIZ 2016] GIZ: *Water Demand Management in Rajkot – Gujarat, India. Mission Report* / Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Oktober 2016. – Bericht
- [GOI 2011] GOI: *Census of India*. New Delhi, Indien : Government of India, Ministry of Home Affairs, Office of the Registrar General and Census Commissioner, 2011
- [GOTN 2017] GOTN: *Tiruvannamalai Statistical Handbook 2016-2017*. Government of Tamil Nadu, Department of Economics and Statistics, 2017. – 103 S
- [Grombach u. a. 2000] GROMBACH, G. ; HABERER, K. ; MERKL, G. ; TRÜEB, E.U.: *Handbuch der Wasserversorgungstechnik*. 3. Auflage. München, Deutschland : Oldenbourg Industrieverlag GmbH, 2000. – 1342 S
- [GWI 2016] GWI: *Global Water Market 2017. Meeting the world's water and wastewater needs until 2020*. Oxford, UK : Global Water Intelligence, 2016
- [Haider u. a. 2014] HAIDER, Husnain ; SADIQ, Rehan ; TESFAMARIAM, Solomon: *Performance indicators for small- and medium-sized water supply systems: a review*. In: *Environmental Reviews* 22 (2014), Nr. 1, S. 1–40

- [Heeringa u. a. 2010] HEERINGA, Steven G. ; WEST, Brady T. ; BERGLUND, Patricia A.: *Applied Survey Data Analysis*. Boca Raton, USA : Chapman and Hall/CRC Press, 2010. – 442 S
- [Hirner und Merkel 2005] HIRNER, Wolfram ; MERKEL, Wolf: *Kennzahlen für Benchmarking in der Wasserversorgung*. Bonn : wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, 2005. – 349 S
- [Hoehn 2011] HOEHN, John: *Economic Principles for Water Conservation Tariffs and Incentives*. S. 129–152. In: JHA, Manoj (Hrsg.): *Water Conservation*. London, UK : InTech, 2011
- [Hofmann 2000] HOFMANN, Friedrich: *Grundlagen der Ultraschall-Durchflussmessung für den industriellen Einsatz*. Duisburg : KROHNE Messtechnik GmbH & Co. KG, 2000
- [Hofmann u. a. 2010] HOFMANN, Georg ; MÜLLER, Andreas ; GROTH, Hartmut ; JUNGBAUER, Reinhard: Mangelnde Messrichtigkeit von überdimensionierten Hauswasserzählern in Wohngebäuden. In: *energie / wasser-praxis* 61 (2010), Oktober, Nr. 10, S. 32–37
- [Holt und Smith 1979] HOLT, D. ; SMITH, T.M.F.: Post Stratification. In: *Journal of the Royal Statistical Society, Series A (General)* 142 (1979), Nr. 1, S. 33–46
- [Howard und Bartram 2003] HOWARD, G. ; BARTRAM, J.: *Domestic Water Quantity, Service Level and Health*. Bd. WHO/SDE/WSH/03.02. Genf, Schweiz : World Health Organisation (WHO), 2003
- [HPEC 2011] HPEC: Report on Indian Urban Infrastructure and Services / High Powered Expert Committee (HPEC) of Ministry of Urban Development. New Delhi, Indien, März 2011. – Bericht
- [Idelchik und Fried 1986] IDELCHIK, I.E. ; FRIED, E.: *Handbook of Hydraulic Resistance*. 2nd edition. Washington D.C., USA : Hemisphere Publishing Corporation, 1986. – 640 S
- [IEEM 2017] IEEM: *Water Losses in Urban Environment (WaLUE)*. Projektthomepage. 2017. – URL <http://www.walue-india.de/>
- [ISO/IEC 2008] ISO/IEC: *Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*. 1. Auflage. Genf, Schweiz : International Organization for Standardization, 2008. – 114 S
- [IWW 2014] IWW: Entwicklung eines Hauptkennzahlensystems der deutschen Wasserversorgung, Abschlussbericht / IWW Rheinisch-Westfälisches Zentrum für Wasserforschung gGmbH. Bonn, 2014. – Bericht

- [Jain 2014] JAIN, A.: Complacency: Compounding the urban water crisis. In: *The Indian journal of public administration* 60 (2014), Nr. 1, S. 105–116
- [Jha 2010] JHA, N.: *Access of the poor to water supply and sanitation in India: salient concepts, issues and cases*. Brasilia, Brasilien : International Policy Centre for Inclusive Growth, May 2010
- [Kalinowski-Gausepohl und Block 2017] KALINOWSKI-GAUSEPOHL, Annabelle ; BLOCK, Thomas: Verbundprojekt: Entwicklung und Demonstration eines technologie-basierten Geschäftsmodelles zum nachhaltigen Management der Wasserverluste im urbanen Umfeld am Beispiel der EZ-finanzierten Wasserbetriebe der Stadt Tiruvannamalai, Teilprojekt F: Betriebsmodell und Finanzmodell: fachlicher Schlussbericht. Witten : GWFA Global Water Franchise Agency GmbH, 2017. – Bericht
- [Kanakoudis und Tsitsifli 2010] KANAKOUDIS, V. ; TSITSIFLI, S.: Water volume vs. revenues oriented water balance calculation for urban water networks: the "Minimum Charge Difference" component makes a difference. In: *Proceedings of the IWA International Specialised Water Loss Management 2010 Conference*. Sao Paulo, Brasilien, Juni 2010
- [Karger und Hoffmann 2013] KARGER, Rosemarie ; HOFFMANN, Frank: *Wasserversorgung*. Bd. 14. Auflage. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2013. – 340 S
- [Kauermann und Küchenhoff 2011] KAUERMANN, Göran ; KÜCHENHOFF, Helmut: *Stichproben*. Springer Berlin Heidelberg, 2011. – 261 S
- [Kingdom u. a. 2006] KINGDOM, B. ; LIEMBERGER, R. ; MARIN, P.: *The Challenge of Reducing Non-Revenue Water (NRW) in Developing Countries*. Washington DC, USA : The World Bank Group, Dezember 2006 (2)
- [Kölbl und Martinek 2010] KÖLBL, J. ; MARTINEK, P.: Innovative Netzüberwachungstechnologien zur Unterstützung der Sisyphusarbeit des Wasserverlust-Managements. In: *gwf Wasser / Abwasser* 151 (2010), November, Nr. 11, S. 1002–1006
- [Klemm 2002] KLEMM, Elmar: *Einführung in die Statistik : Für die Sozialwissenschaften*. 1. Auflage. Wiesbaden : Westdeutscher Verlag, 2002. – 397 S
- [Klingel 2010] KLINGEL, P.: *Von intermittierender zu kontinuierlicher Wasserverteilung in Entwicklungsländern*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, Dissertation, 2010
- [Klingel 2018] KLINGEL, Philipp: *Modellierung von Wasserverteilungssystemen*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018

- [Knobloch 2014] KNOBLOCH, A.: *Automatisierte Wassermengenanalyse in der Trinkwasserversorgung*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, Dissertation, 2014
- [Kohn 2005] KOHN, Wolfgang: *Statistik : Datenanalyse und Wahrscheinlichkeitsrechnung*. Berlin : Springer, 2005. – 624 S
- [Komives u. a. 2005] KOMIVES, K. ; FOSTER, V. ; HALPERN, J. ; WODON, Q. ; ABDULLAH, R.: *Water, Electricity, and the Poor: Who Benefits from Utility Subsidies?* Washington D.C., USA : The World Bank, 2005
- [Kumpel und Nelson 2014] KUMPEL, Emily ; NELSON, Kara L.: Mechanisms Affecting Water Quality in an Intermittent Piped Water Supply. In: *Environmental Science & Technology* 48 (2014), Nr. 5, S. 2766–2775
- [Lambert u. a. 2014] LAMBERT, A. ; CHARALAMBOUS, B. ; FANTOZZI, M. ; KOVAC, J. ; RIZZO, A. ; ST JOHN, S.G.: 14 Years Experience of using IWA Best Practice Water Balance and Water Loss Performance Indicators in Europe. In: *Proceedings of the IWA Specialised Conference: Water Loss 2014*. Wien, Österreich : International Water Association (IWA), September 2014
- [Lambert und Hirner 2000] LAMBERT, A. ; HIRNER, W.: *Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures*. London, UK : International Water Association (IWA), Oktober 2000
- [Lambert u. a. 1999] LAMBERT, A.O. ; BROWN, T.G. ; TAKIZAWA, M. ; WEIMER, D.: A Review of Performance Indicators for Real Losses from Water Supply Systems. In: *aqua / Journal of Water Supply: Research and Technology* 48 (1999), Dezember, S. 227–237
- [Laskowski 2012] LASKOWSKI, S. R.: Das Menschenrecht auf Wasser, Interview von Wißler, C. In: *Spektrum-Magazin der Universität Bayreuth* 8. Auflage, Ausgabe 1 (2012), November, S. 70–75
- [Laskowski 2010] LASKOWSKI, Silke R.: *Das Menschenrecht auf Wasser*. 1. Auflage. Tübingen : Mohr Siebeck Verlag, 2010. – ISBN 9783161495076
- [Le Blanc 2007] LE BLANC, D.: *A Framework for Analyzing Tariffs and Subsidies in Water Provision to Urban Households in Developing Countries*. Division for Sustainable Development, United Nations, Februar 2007
- [Liemberger u. a. 2007] LIEMBERGER, R. ; BROTHERS, K. ; LAMBERT, A. ; MCKENZIE, R. ; RIZZO, A. ; WALDRON, T.: Water Loss Performance Indicators. In: *Proceedings of the IWA International Specialised Conference 'Water Loss 2007'*. Bukarest, Rumänien : International Water Association (IWA), September 2007, S. 148–160

- [Liemberger und Farley 2004] LIEMBERGER, R. ; FARLEY, M.: Developing a Non-Revenue Water Reduction Strategy Part 1: Investigating and Assessing Water Losses. In: *Proceedings of the 4th IWA World Water Congress*. Marrakesch, Marokko, September 2004
- [Liemberger und Wyatt 2018] LIEMBERGER, R. ; WYATT, A.: Quantifying the global non-revenue water problem. In: *Water Supply* 19 (2018), Nr. 3, S. 831–837
- [Lohr 2009] LOHR, Sharon L.: *Sampling: Design and Analysis*. Second Edition. Boston, USA : Brooks/Cole, Cengage Learning, 2009. – 608 S
- [Majuru u. a. 2016] MAJURU, Batsirai ; SUHRCKE, Marc ; HUNTER, Paul: How Do Households Respond to Unreliable Water Supplies? A Systematic Review. In: *International Journal of Environmental Research and Public Health* 13 (2016), Nr. 12, S. 1222
- [Marchis u. a. 2010] MARCHIS, M. D. ; FONTANAZZA, C. M. ; FRENI, G. ; LOGGIA, G. L. ; NAPOLI, E. ; NOTARO, V.: A model of the filling process of an intermittent distribution network. In: *Urban Water Journal* 7 (2010), Nr. 6, S. 321–333
- [McIntosh 2003] MCINTOSH, Arthur C.: *Asian Water Supplies - Reaching The Urban Poor*. Asian Development Bank and IWA Publishing, August 2003
- [McKenzie 2007] MCKENZIE, R.: *AquaLite Water balance software*. Version 2.0.2. Gezina, Südafrika: Water Research Commission (WRC) (Veranst.), September 2007. – Software-Handbuch
- [McKenzie u. a. 2007] MCKENZIE, R. ; SEAGO, C.J. ; LIEMBERGER, R.: Benchmarking of losses from potable water reticulation systems - Results from IWA Task Team. In: *Proceedings of the IWA International Conference 'Water Loss 2007'*, International Water Association (IWA), 2007, S. 161–175
- [McKenzie u. a. 2012] MCKENZIE, R. ; SIQALABA, Z. ; WEGELIN, W.: The State of Non-Revenue Water in South Africa (2012), Report TT 522/12 / South African Water Research Commission. Pretoria, Südafrika, August 2012. – Bericht
- [MDWS 2013] MDWS: *Uniform Drinking Water Quality Monitoring Protocol*. New Delhi; Indien : Ministry of Drinking Water and Sanitation, Government of India, Februar 2013
- [Merkel 2005] MERKL, G.: *Trinkwasserbehälter: Planung, Bau, Betrieb, Schutz und Instandsetzung*. München : Oldenbourg Industrieverlag GmbH, Oktober 2005. – 360 S
- [Merkel 2008] MERKL, G.: *Technik der Wasserversorgung: Praxisgrundlagen für Führungskräfte*. München : Oldenbourg Industrieverlag GmbH, 2008. – 680 S

- [Mühl 2017] MÜHL, Thomas: *Elektrische Messtechnik*. 5. Auflage. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. – 306 S
- [MoUD 2008] MoUD: *Handbook of Service Level Benchmarking*. New Delhi, Indien : Ministry of Urban Development (MoUD), Government of India, 2008. – 83 S
- [MoUD 2010] MoUD: *Service Level Benchmarking Databook - Improving Service Outcomes 2008 - 2009*. New Delhi, Indien : Ministry of Urban Development (MoUD), Government of India, Juni 2010. – 148 S
- [MOWR 2012] MOWR: *National Water Policy (2012)*. New Delhi, Indien : Ministry of Water Resources (MOWR), Government of India, 2012
- [MOWR 2014] MOWR: *Guidelines for Improving Water Use Efficiency in Irrigation, Domestic & Industrial Sectors*. New Delhi, Indien : Ministry of Water Resources (MOWR), Government of India, November 2014
- [Mugabi u. a. 2009] MUGABI, Josses ; KAYAGA, Sam ; SMOUT, Ian ; NJIRU, Cyrus: Determinants of customer decisions to pay utility water bills promptly. In: *Water Policy* 12 (2009), Nr. 2, S. 220–236
- [Murthy 2013] MURTHY, S. L.: The Human Right(s) to Water and Sanitation: History, Meaning, and the Controversy Over-Privatization. In: *Berkeley Journal of International Law* 31 (2013), Nr. 1
- [Mutikanga 2012] MUTIKANGA, H.: *Water Loss Management: Tools and Methods for Developing Countries*, Delft University of Technology and Academic Board of UNESCO-IHE Institute for Water Education, Dissertation, 2012
- [Mutikanga u. a. 2010] MUTIKANGA, H. E. ; SHARMA, S. K. ; VAIRAVAMORTHY, K.: Assessment of apparent losses in urban water systems. In: *Water and Environment Journal* 25 (2010), Nr. 3, S. 327–335
- [Mutschmann u. a. 2014] MUTSCHMANN, J. ; STIMMELMAYR, F. ; FRITSCH, P. ; HOCH, W. ; MERKL, G. ; OTILLINGER, F. ; RAUTENBERG, J. ; WEISS, M. ; WRICKE, B.: *Taschenbuch der Wasserversorgung*. 16. Auflage. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014. – 975 S. S
- [Myers 2003] MYERS, Stephen ; WATER AND SANITATION PROGRAM - SOUTH ASIA (Hrsg.): *24-hour Water Supply: Is this Goal Achievable? Drawing lessons from rapid distribution system diagnostic assessments in Indian cities. Fifteenth Meeting of the Urban Think Tank Sept. 23-24, 2003 Hyderabad, India*. Hyderabad : Nagari, 2003
- [Nestmann u. a. 2017] NESTMANN, Franz ; KLINGEL, Philipp ; MASTALLER, Miran: Water Losses in Urban Environment (WaLUE): Entwicklung und Demonstration eines technologie-basierten Geschäftsmodelles zum nachhaltigen Management

- der Wasserverluste im urbanen Umfeld: Schlussbericht Teilprojekt B / Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Karlsruhe, 2017. – Bericht
- [NIUA 2005] NIUA: *Status of Water Supply, Sanitation and Solid Waste Management in Urban Areas*. New Delhi, Indien : National Institute of Urban Affairs, Juni 2005
- [Noß und Schubert 2017] NOSS, Dominik ; SCHUBERTH, Harald: WaLUE (Water Losses in Urban Environment): Entwicklung und Demonstration eines technologiebasierten Geschäftsmodells zum nachhaltigen Management der Wasserverluste im urbanen Umfeld am Beispiel der EZ-finanzierten Wasserbetriebe Stadt Tiruvannamalai : Abschlussbericht. Baunach : Seba Dynatronic Mess- und Ortungstechnik GmbH, 2017. – Bericht
- [Osterhaus 2009] OSTERHAUS, J.: *Menschenrechte in der Entwicklungszusammenarbeit mit Indien*. Eschborn : Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Juli 2009
- [OTT 2010] OTT: *Betriebsanleitung Grundwasser-Datensammler OTT Orpheus Mini*. Kempten : OTT Hydromet GmbH, August 2010
- [Panickar 2007] PANICKAR, M.: *State responsibility in the drinking water sector - An overview of the Indian scenario*. Genf, Schweiz : International Environmental Law Research Centre, Juni 2007
- [Plath und Wichmann 2009] PLATH, Michael ; WICHMANN, Knut: Energieverbrauch der deutschen Wasserversorgung. In: *energie / wasser-praxis* 60 (2009), Juli, Nr. 7+8, S. 54–55
- [Pozos-Estrada u. a. 2016] POZOS-ESTRADA, O. ; SÁNCHEZ-HUERTA, A. ; BREÑA-NARANJO, J.A. ; PEDROZO-ACUÑA, A.: Failure Analysis of a Water Supply Pumping Pipeline System. In: *Water* 8 (2016), Nr. 9, S. 395
- [Raghupathi und Foster 2002] RAGHUPATHI, P.U. ; FOSTER, V.: *A scorecard for India. Water and Sanitation Program, No. 2 Water tariffs and subsidies in South Asia*. Washington D.C., USA : The World Bank, Dezember 2002
- [Renaud u. a. 2009] RENAUD, E. ; LAPUYADE, F. ; GRISSAC, B. D. ; BREMOND, B.: Annualizing Metered Volumes in Water Balance. In: *Proceedings of the 5th IWA Water Loss Reduction Specialist Conference*. Cape Town, Südafrika : International Water Association (IWA), April 2009, S. 43–50
- [RIC 2018] RIC: *Universal Water Metering in Trinidad and Tobago - A Concept Outline*. Port-of-Spain, Trinidad : Regulated Industries Commission, Juni 2018
- [Roscher u. a. 2015] ROSCHER, H. ; BERGER, W. ; MÄLZER, D. ; BECK, M. ; KROPP, I. ; BOSSELER, B. ; DIBURG, B.: *Rehabilitation von Rohrleitungen -*

- Sanierung und Erneuerung von Ver- und Entsorgungsnetzen*. 3. Auflage. Weimar : Bauhaus-Universitätsverlag, 2015. – 406 S
- [Roscher 2009] ROSCHER, Harald: *Rehabilitation von Wasserversorgungsnetzen : Strategien - Verfahren - Fallbeispiele*. 2. Auflage. Berlin : HUSS-MEDIEN GmbH, 2009. – 421 S
- [Roscher 2018] ROSCHER, Harald: *Instandhaltung und Instandsetzung von Rohrleitungssystemen*. S. 943–951. In: HORLACHER, Hans-Burkhard (Hrsg.) ; HELBIG, Ulf (Hrsg.): *Rohrleitungen 2: Einsatz, Verlegung, Berechnung, Rehabilitation*, Springer Berlin Heidelberg, 2018
- [Rouse 1946] ROUSE, Hunter: *Elementary Mechanics of Fluids*. New York, USA : John Wiley & Sons, Inc., 1946. – 376 S
- [Rudolph u. a. 2019] RUDOLPH, Karl-Ulrich ; STRÖMER, Keno ; WEIL, Sebastian ; GREGAREG, Daniel ; BOYSEN, Birte ; HILBIG, Jens ; GRISKO, Florian ; ZIMMER, Judith ; HÖRTER, Stefan ; WALENZIK, Gabriele: Entwicklung und Demonstration eines technologiebasierten Geschäftsmodelles zum nachhaltigen Management der Wasserverluste im urbanen Umfeld am Beispiel der EZ-finanzierten Wasserbetriebe Stadt Tiruvannamalai: Abschlussbericht WaLUE-Verbundprojekt / Institut für Umwelttechnik und Management gGmbH (IEEM) an der Universität Witten/Herdecke. 2019. – Bericht
- [Scheday und Kugler 2018] SCHEDAY, Maria ; KUGLER, Stephan: Verbundprojekt: Water Losses in Urban Environment (WaLUE) - Teilprojekt C : Abschlussbericht des Projektes. München : Dorsch International Consultants GmbH, 2018. – Bericht
- [Schlüter 2006] SCHLÜTER, T.: *Trinkwasserversorgung im internationalen Vergleich: Versorgungssituation, wasserwirtschaftliche Strukturen und Trinkwasserpreise*. 1. Auflage. Hamburg : Diplomica Verlag, 2006. – 132 S
- [Schonlau und Hölting 2018] SCHONLAU, H. ; HÖLTING, D.: Zur Schadensrate von Armaturen in der Wasserverteilung. In: *Energie Wasser-Praxis* (2018), Nr. 01/2018, S. 12–15
- [Seago und McKenzie 2007] SEAGO, C.J. ; MCKENZIE, R.: An Assessment of Non-Revenue Water in South Africa (Report TT 300/07) / South African Water Research Commission. Pretoria, Südafrika, January 2007. – Bericht
- [Sheel u. a. 2017] SHEEL, Tushar ; RÖSING, Andreas ; DEICHMANN, Stefan: Schlussbericht: Water Loss in Urban Environment (WaLUE) : AP 3.4: Optimierung des Pumpbetriebs hinsichtlich Druck und Energieeffizienz : Teilprojekt E. Dortmund : WILO SE, 2017. – Bericht

- [Siebert 2014] SIEBERT, A.: Die Global Governance des Wassers - Eine Untersuchung der Wasserpolitik und städtischen Versorgungslage in Uganda. In: *Working Papers on Development and Global Governance - No.5*. Duisburg/Bochum : UAMR Graduate Centre for Development Studies, April 2014
- [Singh u. a. 2005] SINGH, M.R. ; UPADHYAY, V. ; MITTAL, A.K.: Urban water tariff structure and cost recovery opportunities in India. In: *Water Science and Technology* 52 (2005), Februar, Nr. 12, S. 43–51. – ISSN 0273-1223
- [SPT 2010] SPT: Detailed Project Report for Improvements to Water Supply System in Thiruvannamalai Municipality / SPT Consultancy Services. Chennai, Indien, 2010. – Bericht
- [Stadtverwaltung Tiruvannamalai 2013a] STADTVERWALTUNG TIRUVANNAMALAI: *Wardwise water supply house service connections as on December 2013*. Tiruvannamalai Municipality, 2013
- [Stadtverwaltung Tiruvannamalai 2013b] STADTVERWALTUNG TIRUVANNAMALAI: *Water Supply Bye Law – Sub-rules for distribution of water supply*. Tiruvannamalai, Indien : Tiruvannamalai Municipality, 2013
- [StBA 2006] STBA: Fachserie 19, Reihe 2.1, Heft 2004 Umwelt Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung / Statistisches Bundesamt Deutschland. Wiesbaden, September 2006. – Bericht
- [StBA 2009] STBA: Fachserie 19, Reihe 2.1, Heft 2007 Umwelt Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung / Statistisches Bundesamt Deutschland. Wiesbaden, September 2009. – Bericht
- [StBA 2015] STBA: Fachserie 19, Reihe 2.1, Heft 2013 Umwelt Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung / Statistisches Bundesamt Deutschland. Wiesbaden, Juli 2015. – Bericht
- [StBA 2019a] STBA: *Entgelt für die Trinkwasserversorgung in Tarifgebieten nach Tariftypen*. 2019. – URL <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Tabellen/tw-06-entgelt-trinkwasserversorgung-tarifgeb-nach-tariftypen-2014/2016-land-bund.html>. – zuletzt besucht am 06.05.2020
- [StBA 2019b] STBA: Fachserie 19, Reihe 2.1.1, Heft 2016 Umwelt Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung -Öffentliche Wasserversorgung- / Statistisches Bundesamt Deutschland. Wiesbaden, Juli 2019. – Bericht
- [Stefanski 2007] STEFANSKI, Frank: EG-Messgeräte richtlinie - Welche Auswirkungen sind für die Wasserversorgungsunternehmen zu erwarten? In: *gwf Wasser / Abwasser* 148 (2007), Dezember, Nr. 13, S. 56–61

- [Stefanski 2009] STEFANSKI, Frank: Wassermessung. In: *gwf Wasser / Abwasser* 150 (2009), Dezember, Nr. 13, S. 95–100
- [STS 2017] STS: *Infografik: Gesamtfehler oder Genauigkeit?* Webseite. 2017. – URL <https://campaign.stssensors.com/blog/de/druckmesstechnik-gesamtfehler-genauigkeit-wiederholbarkeit>. – zuletzt besucht am 06.05.2020
- [Thornton und Lambert 2005] THORNTON, J. ; LAMBERT, A. O.: Progress in practical prediction of pressure: leakage, pressure: burst frequency and pressure: consumption relationships. In: *Proceedings of the IWA Specialised Conference 'Leakage 2005'*. Halifax, Nova Scotia, Kanada : International Water Association (IWA), September 2005, S. 1–11
- [Thornton u. a. 2008] THORNTON, Julian ; STURM, Reinhard ; KUNKEL, George: *Water Loss Control*. Second Edition. New York, USA : McGraw-Hill, 2008. – 632 S
- [Tiwari und Nair 2011] TIWARI, P. ; NAIR, R.: *Transforming Water Utilities - Policy Imperatives for India*. S. 240 – 259. In: *India Infrastructure Report 2011 - Water: Policy and Performance for Sustainable Development*. New Delhi, Indien : Oxford University Press, 2011
- [Totsuka u. a. 2004] TOTSUKA, N. ; TRIFUNOVIC, N. ; VAIRAVAMOORTHY, K.: Intermittent urban water supply under water starving situations. In: *Proceedings of the 30th WEDC International Conference*. Vientiane, 2004, S. 505–512
- [Toutenburg und Heumann 2008] TOUTENBURG, H. ; HEUMANN, C.: *Induktive Statistik*. Springer Berlin Heidelberg, 2008. – 483 S
- [Trow und Farley 2004] TROW, S. ; FARLEY, M.: Developing a strategy for leakage management in water distribution systems. In: *Water Science and Technology: Water Supply* 4 (2004), Nr. 3, S. 149–168
- [Tsagarakis 2005] TSAGARAKIS, K.P.: New directions in water economics, finance and statistics. In: *Water Science and Technology: Water Supply* 5 (2005), Nr. 6, S. 1–15
- [UBA 2014] UBA: *Wassersparen in Privathaushalten: sinnvoll, ausgereizt, übertrieben? Fakten, Hintergründe, Empfehlungen*. Dessau-Roßlau : Umweltbundesamt, September 2014
- [UBA 2015] UBA: *Wasserabgabe der öffentlichen Wasserversorgung an Letztverbraucher, Eigenverbrauch der Wasserwerke und Wasserverluste*. 2015. – URL <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/wasserwirtschaft/oeffentliche-wasserversorgung#textpart-2>. – Zugriffsdatum: 09.01.2020. – zuletzt besucht am 06.05.2020

- [UBA 2019] UBA: *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2018*. Dessau-Roßlau : Umweltbundesamt, April 2019
- [UN 2010] UN: *Resolution A/RES/64/292: The human right to water and sanitation*. New York, USA : United Nations General Assembly, 2010
- [UN 2014] UN: *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights / Department of Economic and Social Affairs, Population Division*. New York, USA, 2014. – Bericht
- [UNHRC 2010a] UNHRC: A/HRC/15/31. Report of the independent expert on the issue of human rights obligations related to access to safe drinking water and sanitation, Catarina de Albuquerque / United Nations Human Rights Council (UNHRC). Genf, Schweiz, Juni 2010. – Bericht
- [UNHRC 2010b] UNHRC: A/HRC/15/31/Add1. Report of the independent expert on the issue of human rights obligations related to access to safe drinking water and sanitation, Catarina de Albuquerque / United Nations Human Rights Council (UNHRC). Genf, Schweiz, 2010. – Bericht
- [UNHRC 2010c] UNHRC: *Resolution 15/9. Human rights and access to safe drinking water and sanitation*. Genf, Schweiz : United Nations General Assembly, Human Rights Council, 2010
- [UNHRC 2011] UNHRC: *Resolution 18/1. The human right to safe drinking water and sanitation*. United Nations General Assembly, Human Rights Council, 2011
- [UNICEF und WHO 2019] UNICEF ; WHO: *Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2017. Special focus on inequalities*. / United Nations International Children’s Emergency Fund (UNICEF) and World Health Organization (WHO). New York, USA, 2019. – Bericht
- [Vairavamoorthy u. a. 2008] VAIRAVAMOORTHY, Kala ; GORANTIWAR, Sunil D. ; PATHIRANA, Assela: *Managing urban water supplies in developing countries - Climate change and water scarcity scenarios*. In: *Physics and Chemistry of the Earth* 33 (2008), S. 330–339
- [Vairavamoorthy u. a. 2001] VAIRAVAMOORTHY, Kalanithy ; AKINPELU, Ebenezer ; LIN, Zhuhai ; ALI, Mohammed: *Design of sustainable water distribution systems in developing countries*. In: *Proceedings of World Water and Environmental Resources Congress 2001* Bd. 111, American Society of Civil Engineering, 2001
- [Van Zyl und Clayton 2007] VAN ZYL, E. ; CLAYTON, C. R. I.: *The effect of pressure on leakage in water distribution systems*. In: *Proceedings of the Institution*

- of Civil Engineers Water Management* Bd. 160. London, UK : ice publishing, Juni 2007, S. 109–114
- [Vermersch u. a. 2016] VERMERSCH, M. ; CARTEADO, F. ; RIZZO, A. ; JOHNSON, E. ; ARREGUI, F. ; LAMBERT, A.: *Guidance Notes on Apparent Losses and Water Loss Reduction Planning*. London, UK : IWA Water Loss Specialist Group, 2016
- [Walter u. a. 2016] WALTER, D. ; MASTALLER, M. ; KLINGEL, P.: Genauigkeit von Einstrahl-Flügelradzählern bei Füllung des Rohrnetzes in der intermittierenden Wasserversorgung. In: *gwf-Wasser/Abwasser* (2016), Nr. 157(12), S. 1125–1134
- [WEF 2019] WEF: *The Global Risks Report 2019, 14th Edition*. Cologny/Genf, Schweiz : World Economic Forum, 2019
- [Weimer 1999] WEIMER, D.: Technische und wirtschaftliche Bewertungskriterien für Wasserverluste. In: *gwf Wasser / Abwasser* 140 (1999), Nr. 13, S. 83–90
- [Wendt 2011] WENDT, G. ; (PTB), Physikalisch-Technische B. (Hrsg.): *Neuer Ansatz zur Untersuchung des Wasserzählerverhaltens unter realen Entnahmebedingungen*. Webseite. Juni 2011. – URL https://www.ptb.de/cms/presseaktuelles/zeitschriften-magazine/ptb-jahresbericht/nicht-in-navigation/fruehere-jahresberichte/nachricht.html?tx_news_pi1%5Bnews%5D=4045&tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&tx_news_pi1%5Bday%5D=2&tx_news_pi1%5Bmonth%5D=5&tx_news_pi1%5Byear%5D=2011&cHash=a0cc03e2d32948a64729520ff66c3cfd. – zuletzt besucht am 06.05.2020
- [Whittington u. a. 2002] WHITTINGTON, D. ; BOLAND, J. ; FOSTER, V.: *Understanding the basics. Water and Sanitation Program, No. 1 Water tariffs and subsidies in South Asia*. Washington, D.C., USA : The World Bank, Dezember 2002
- [WHO 2017] WHO: *Guidelines for drinking-water quality. Fourth edition incorporating the first addendum*. Genf, Schweiz : World Health Organization (WHO), 2017
- [WHO und UNICEF 2015] WHO ; UNICEF: *Progress on Sanitation and Drinking Water – 2015 Update and MDG Assessment*. / World Health Organization and United Nations International Children’s Emergency Fund. Genf, Schweiz, 2015. – Bericht
- [Winkler 2012] WINKLER, I.T.: *The Human Right to Water: Significance, Legal Status and Implications for Water Allocation*. Oxford, UK : Hart Publishing, 2012. – 376 S
- [World Bank 2007] WORLD BANK: *Making the Most of Scarcity : Accountability for better water management results in the Middle East and North Africa*. Washington D.C., USA : The World Bank, 2007

- [World Bank 2008] WORLD BANK: Phase II : benchmarking urban water utilities in India / The World Bank, Water and Sanitation Program - South Asia. New Delhi, Indien, September 2008. – Bericht
- [WWAP 2019] WWAP: The United Nations World Water Development Report 2019. Leaving No One Behind / UNESCO World Water Assessment Programme. Geneva, Switzerland, 2019. – Bericht
- [Wyatt 2010] WYATT, Alan: Non-Revenue Water: Financial Model for Optimal Management in Developing Countries. RTI Press, jun 2010. – Bericht
- [Zanke 2013] ZANKE, Ulrich: *Hydraulik für den Wasserbau*. Springer Berlin Heidelberg, 2013. – 331 S
- [ZENNER 2011] ZENNER: *ZENNER informiert: Informationen zur MID Measurement Instrument Directive*. November 2011. – URL https://www.zenner.de/files/content/AAA_Dokumente/Services/MID_neu_01032012_DE.pdf. – zuletzt besucht am 06.05.2020
- [Zoebl und Kruschik 1978] ZOEBL, H. ; KRUSCHIK, J. ; ZOEBL, H. (Hrsg.) ; KRUSCHIK, J. (Hrsg.): *Strömung durch Rohre und Ventile Tabellen und Berechnungsverfahren zur Dimensionierung von Rohrleitungssystemen*. Wien, Österreich : Springer Verlag, 1978. – 314 S